



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de pós-graduação em engenharia urbana

- Mestrado -

**“EficientE” – UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
ECONÔMICO PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Por

Paulo Sergio Oliveira de Carvalho

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba*

para obtenção do grau de Mestre

João Pessoa – Paraíba

Março, 2007

Universidade Federal da Para

Centro de Tecnologia

Programa de pós-graduação em engenharia urbana

- Mestrado -

**“EficientE” – UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
ECONÔMICO PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação submetida ao Programa de
de
Pós-Graduação em Engenharia
Urbana da Universidade Federal da
Paraíba, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do
título de Mestre

Paulo Sergio Oliveira de Carvalho

ORIENTADOR: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

João Pessoa – Paraíba

Março, 2007

ii

C331e

Carvalho, Paulo Sergio Oliveira de.

“EficientE” – Um método de dimensionamento econômico para redes de distribuição de água./ Paulo Sergio Oliveira de Carvalho. - João Pessoa, 2007.

128 p.: il.

Orientador: Heber Pimentel Gomes.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). UFPB/CT.

1. Recursos hídricos. 2. Água-Abastecimento. 3. EPANET-simulador hidráulico. 4. Otimização econômica-água. 5. Programação dinâmica.

UFPB/BC

CDU: 556.18(043)

**“EficientE” – UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO
ECONÔMICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Por

Paulo Sergio Oliveira de Carvalho

Dissertação aprovada em 26 de março de 2007

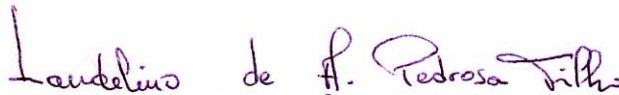
Período Letivo: 2007.1



Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES – UFPB
Orientador



Prof. Dr. TARCISO CABRAL DA SILVA - UFPB
Examinador Interno



Prof. Dr. LAUDELINO DE ARAÚJO PEDROSA FILHO – UFPB
Examinador Interno



Prof. Dr. KENNEDY FLAVIO MEIRA DE LUCENA – CEFET-PB
Examinador Externo

João Pessoa-PB
2007

Dedicatória,

Aos meus pais Wallace Mendes de Carvalho e Maria da Conceição Oliveira Mendes de Carvalho.

A minha esposa Marluce Acyoman Moura Costa de Carvalho.

Aos meus Filhos Paulo Sergio Oliveira de Carvalho Filho e Paulo Henrique Moura Costa de Carvalho.

As minhas avós Odete de Castro Oliveira e Maria de Lourdes Carvalho Tinoco.

A minha tia Maria Vanda de Oliveira.

Ao meu sogro Arnaldo Donato da Costa.

A minha sogra Eugênia de Moura Costa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a vida e a oportunidade de poder chegar até aqui.

- Aos meus familiares, amigos, colegas de mestrado e professores, e a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente da minha caminhada.
- Ao professor Heber Pimentel Gomes pela orientação, disponibilidade, estímulo para atingir os objetivos da pesquisa, paciência e, principalmente, a amizade construída e consolidada ao longo deste trabalho.
- Ao professor Tarciso Cabral da Silva, pelo acolhimento e orientações quando decidi me submeter à seleção do mestrado.
- Aos professores José Estevam de Medeiros Filho e Edson Leite Ribeiro, cujas cartas de recomendação fornecidas foram fundamentais para o meu ingresso no mestrado.
- À Prefeitura Universitária da Universidade Federal da Paraíba pelo apoio e viabilização de recursos que ajudaram na minha formação acadêmica.
- Aos meus queridos colegas da equipe do LENHS Leonardo Leite Brasil Montenegro e Saulo de Tarso Marques Bezerra, pelo desprendimento, companheirismo, amizade e préstimos.
- Aos prestimosos e competentes estagiários: Daniela da S. Santos e João Silvino O. P. da Silva.
- Ao colega e amigo Moisés Menezes Salvino, pelo empenho e competência na implementação de uma otimização no *software* EficientE, reduzindo drasticamente o tempo de processamento.
- Ao programador Antônio Carlos de Araújo Sobrinho pela amizade, lealdade e, principalmente, pela ajuda na construção e desenvolvimento do *software* EficientE que foi uma ferramenta de suporte fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

“EficientE” – UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

RESUMO

O presente estudo tem o objetivo de elaborar um método de dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água, composto pela rede de tubulações, com seu sistema de impulsão. O método, aqui denominado “EficientE”, busca alcançar a solução de custo mínimo para redes malhadas, ramificadas e para ampliações de redes já existentes. Para o desenvolvimento da metodologia de otimização, foram utilizadas técnicas de programação dinâmica, aliadas a conceitos econômicos básicos. Esta junção de técnicas e conceitos propiciou o desenvolvimento de um algoritmo matemático iterativo de convergência, para a obtenção da solução de custo mínimo. Para a determinação das variáveis de estado do sistema, a cada iteração, foi desenvolvido e utilizado um programa, associado a um software de simulação hidráulica do escoamento permanente em redes malhadas de distribuição de água. O método proposto foi testado em cinco exemplos de redes com características distintas, quanto ao traçado, tamanho e condições de contorno. Em todas as redes estudadas, o método funcionou perfeitamente e apresentou excelente desempenho. Os resultados alcançados indicam que o método pode ser utilizado em redes de qualquer porte, pois não foram encontradas quaisquer restrições a sua aplicação.

Palavras-chave: recursos hídricos; água – abastecimento; EPANET - simulador hidráulico; otimização econômica – água; programação dinâmica.

**“EfficientE” – A METHOD OF ECONOMICAL
MEASUREMENT OF WATER
SUPPLY NETWORKS**

ABSTRACT

It was aimed in the present study to carry out a method of economical measurement of water supply system, composed by pipes network, including its propulsion system. This method is denominated here as “EfficientE”, which was carried out on search of a minimal cost solution for thressed networks, with branches intended to amplify the existing networks. In order to develop the optimization methodology, techniques of dynamic programming were used here, in association with basic economical concepts. This technique-concept association enabled the development of a mathematical algorithm iteration of convergence, aiming to obtain a minimum cost solution. For estimating the variables of state of the system, it was performed for each iteration a special program associated to software of hydraulic simulation of continuous water flow in thressed networks of water supply. The method proposed here was tested in five situations of water networks with distinct features concerning their design, size, and contour conditions. This method showed to be effective in all situations, resulting in excellent performance, which means that it can be applied to networks of water distribution of any proportion, since no restrictions were detected when simulating its application.

Key words: water resources; water – supply; EPANET - hydraulic simulator; economical optimization – water; dynamic programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Traçados de redes de distribuição, adaptado de Gomes (2004)	8
Figura 2.2 – Custo de investimento e valores presentes dos custos variáveis.....	26
Figura 3.1 – Semelhança de triângulos, para determinar a equação da cota do terreno.....	32
Figura 3.2 – Método EficientE - Fluxograma do Algoritmo	35
Figura 4.1 – Interface do software EficientE.....	37
Figura 4.2 – Formulário de seleção do tipo de relatório.....	41
Figura 4.3 – Configuração da rede Dois Anéis	42
Figura 4.4 – Configurações de contorno da rede Dois Anéis.....	44
Figura 4.5 – Rede Dois Anéis, tela de confirmação (folga de pressão)	45
Figura 4.6 – Tela de informação da realização do dimensionamento	45
Figura 4.7 – Rede Dois Anéis dimensionada com e sem folga de pressão	46
Figura 4.8 – Relatório Resumo para a rede de dois anéis.....	49
Figura 4.9 – Configuração da rede de parte do Bairro do Bessa.....	51
Figura 4.10 – Configurações de contorno da rede do Bairro do Bessa (Exemplo 2)	53
Figura 4.11 – Rede do Bairro do Bessa, tela de confirmação (folga de pressão)	53
Figura 4.12 – Rede do Bairro do Bessa dimensionada com e sem folga de pressão.....	54
Figura 4.13 – Relatório Resumo para a rede do Bairro do Bessa.....	56
Figura 4.14 – Configuração da rede Apucarana.....	60
Figura 4.15 – Configurações de contorno da rede Apucarana	63
Figura 4.16 – Rede Apucarana, tela de confirmação (folga de pressão)	63
Figura 4.17 – Rede Apucarana dimensionada com folga de pressão	64
Figura 4.18 – Rede Apucarana dimensionada sem folga de pressão.....	65
Figura 4.19 – Relatório Resumo para a rede Apucarana.....	70
Figura 4.20 – Configuração da rede Paranoá	74
Figura 4.21 – Configurações de contorno da rede Paranoá.....	77
Figura 4.22 – Rede Paranoá, tela de confirmação (folga de pressão)	77
Figura 4.23 – Rede Paranoá dimensionada com folga de pressão.....	78
Figura 4.24 – Rede Paranoá dimensionada sem folga de pressão.....	79
Figura 4.25 – Relatório Resumo para a rede Paranoá	85

Figura 4.26 – Configuração da rede Grande Setor	89
Figura 4.27 – Configurações de contorno da rede Grande Setor.....	91
Figura 4.28 – Rede Grande Setor dimensionada	92
Figura 4.29 – Relatório Resumo para o Grande Setor.....	94
Figura 4.30 – Configuração da rede Setor Secundário.....	97
Figura 4.31 – Configurações de contorno da rede Setor Secundário	98
Figura 4.32 – Rede Setor Secundário, tela de confirmação (folga de pressão)	98
Figura 4.33 – Rede Setor Secundário dimensionada com folga de pressão	99
Figura 4.34 – Rede Setor Secundário dimensionada sem folga de pressão	99
Figura 4.35 – Relatório Resumo para a rede Setor Secundário.....	102
Figura 4.36 – Relatório Resumo para a rede Setor Secundário (cota piezométrica 31 mca)	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados dos nós e trechos da rede Dois Anéis	43
Tabela 4.2 – Custo das tubulações para a rede Dois Anéis	43
Tabela 4.3 – Iteração-46 para o dimensionamento da rede Dois Anéis	47
Tabela 4.4 – Iteração-47 para o dimensionamento da rede Dois Anéis	47
Tabela 4.5 – Iteração-48 para o dimensionamento da rede Dois Anéis	47
Tabela 4.6 – Dados dos nós da rede Dois Anéis	48
Tabela 4.7 – Dados nos trechos da rede Dois Anéis	48
Tabela 4.8 – Resultados obtidos para o custo por vários estudos para a rede Dois Anéis	50
Tabela 4.9 – Custo das tubulações para a rede do Bairro do Bessa	52
Tabela 4.10 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede do Bairro do Bessa	52
Tabela 4.11 – Iteração-39 para o dimensionamento da rede do Bairro do Bessa.....	55
Tabela 4.12 – Iteração-40 para o dimensionamento da rede do Bairro do Bessa.....	55
Tabela 4.13 – Iteração-41 para o dimensionamento da rede do Bairro do Bessa.....	55
Tabela 4.14 – Dados nos nós da rede do Bairro do Bessa.....	55
Tabela 4.15 – Dados nos trechos da rede do Bairro do Bessa.....	56
Tabela 4.16 – Comparativo com outros estudos para a rede do Bairro do Bessa – pressões...	57
Tabela 4.17 – Comparativo com outros estudos para a rede do Bairro do Bessa – diâmetros.	57
Tabela 4.18 – Resultados obtidos por outros estudos para rede do Bairro do Bessa – custos .	58
Tabela 4.19 – Tubulação existente da rede Apucarana	61
Tabela 4.20 – Custo das tubulações para a rede Apucarana.....	61
Tabela 4.21 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede Apucarana	62
Tabela 4.22 – Iteração-6 para o dimensionamento da rede Apucarana.....	66
Tabela 4.23 – Iteração-7 para o dimensionamento da rede Apucarana.....	67
Tabela 4.24 – Iteração-8 para o dimensionamento da rede Apucarana.....	67
Tabela 4.25 – Dados nos nós da rede Apucarana	68
Tabela 4.26 – Dados nos nós da rede Apucarana	69
Tabela 4.27 – Comparativo com outros estudos para a rede Apucarana – pressões	71
Tabela 4.28 – Comparativo com outros estudos para a rede Apucarana – diâmetros.....	71
Tabela 4.29 – Resultados obtidos por outros estudos para rede de Apucarana – custos.....	72

Tabela 4.30 – Tubulação existente da rede Paranoá (LOPES, 2002)	75
Tabela 4.31 – Custo das tubulações para a rede Paranoá	75
Tabela 4.32 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede Paranoá.....	76
Tabela 4.33 – Iteração-32 para o dimensionamento da rede Paranoá	80
Tabela 4.34 – Iteração-33 para o dimensionamento da rede Paranoá	81
Tabela 4.35 – Iteração-34 para o dimensionamento da rede Paranoá	82
Tabela 4.36 – Dados nos nós da rede Paranoá	83
Tabela 4.37 – Dados nos trechos da rede Paranoá	84
Tabela 4.38 – Comparativo com outros estudos para a rede Paranoá – pressões.....	86
Tabela 4.39 – Comparativo com outros estudos para a rede Paranoá – diâmetros	87
Tabela 4.40 – Resultados obtidos por outros estudos para rede Paranoá – custos	88
Tabela 4.41 – Custo das tubulações para a rede Grande Setor.....	90
Tabela 4.42 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede do Grande Setor	90
Tabela 4.43 – Iteração-36 para o dimensionamento do Grande Setor.....	93
Tabela 4.44 – Iteração-37 para o dimensionamento do Grande Setor.....	93
Tabela 4.45 – Iteração-38 para o dimensionamento do Grande Setor.....	93
Tabela 4.46 – Dados nos nós da rede Grande Setor	94
Tabela 4.47 – Dados nos trechos da rede Grande Setor	95
Tabela 4.48 – Métodos PNL2000 e EficientE aplicados ao Grande Setor – pressões	95
Tabela 4.49 – Métodos PNL2000 e EficientE aplicados ao Grande Setor – diâmetros	95
Tabela 4.50 – Métodos PNL2000 e EficientE aplicados ao Grande Setor – custos.....	96
Tabela 4.51 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede Setor Secundário	97
Tabela 4.52 – Iteração-64 para o dimensionamento da rede Setor Secundário.....	100
Tabela 4.53 – Iteração-65 para o dimensionamento da rede Setor Secundário.....	101
Tabela 4.54 – Iteração-66 para o dimensionamento da rede Setor Secundário.....	101
Tabela 4.55 – Dados dos nós da rede Setor Secundário.....	102
Tabela 4.56 – Dados dos trechos da rede Setor Secundário.....	103
Tabela 4.57 – Resultados obtidos para a rede Exemplo 5	104

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA	iii
DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos.....	3
1.2 Descrição dos Capítulos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Redes de Distribuição de Água	5
2.1.1 Traçado.....	7
2.1.2 Variáveis de Estado.....	8
2.1.3 Escoamento	10
2.1.4 Tubulações	10
2.2 Métodos de Dimensionamento Econômico.....	11
2.2.1 Enumeração Exaustiva.....	13
2.2.2 Programação Linear	14
2.2.3 Programação Não Linear.....	16
2.2.4 Programação Dinâmica	19
2.2.5 Algoritmos Evolucionários (Genéticos)	21
2.2.6 Otimização Global	22
2.3 Simulador Hidráulico (EPANET2)	23
2.4 Conceitos Econômicos Aplicados	24

3. METODOLOGIA.....	27
3.1 Desenvolvimento Metodológico – Método EficientE	27
3.2 Situação de Contorno Com a Cota de Cabeceira Fixa	30
3.3 Situação de Contorno Com a Cota de Cabeceira Variável.....	32
4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	36
4.1 Software EficientE.....	36
4.1.1 Características e Funcionalidades	39
4.1.2 Linguagem de Programação.....	41
4.2 Aplicações e Resultados	42
4.2.1 Rede Exemplo 1	42
4.2.2 Rede Exemplo 2	51
4.2.3 Rede Exemplo 3	59
4.2.4 Rede Exemplo 4	73
4.2.5 Rede Exemplo 5	89
4.2.5.1 Grande Setor – Cota de Alimentação Variável	89
4.2.5.2 Setor Secundário – Cota de Alimentação Fixa.....	96
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
5.1 Conclusões.....	106
5.2 Recomendações	107
REFERÊNCIAS	109

1 INTRODUÇÃO

Uma rede de distribuição de água é a parte do sistema de abastecimento formada por tubulações e órgãos acessórios, destinados a distribuir água potável à disposição dos consumidores, de forma contínua, em quantidade, qualidade, e pressão adequadas.

Normalmente, a rede de distribuição de água representa a maior parcela de custo de um sistema de abastecimento, representando cerca de 50% a 75% do custo total de todas as obras do abastecimento.

Diante da afirmativa anterior, qualquer redução no custo dessa parcela do sistema, provocará uma significativa diminuição financeira em termos percentuais no investimento do sistema como um todo. Daí a necessidade do desenvolvimento de metodologias modernas de cálculo que propiciem um dimensionamento com eficiência, considerando não só o aspecto técnico, mas, sobretudo, a busca do custo mínimo para as redes de distribuição de água.

Segundo Gomes (2004), o dimensionamento hidráulico de sistemas de tubulações é hidráulicamente 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.

Historicamente, foram propostos vários métodos para o dimensionamento de redes de abastecimento. No início a preocupação com o dimensionamento se restringia, apenas, ao equilíbrio hidráulico da rede. A introdução do aspecto econômico voltado ao dimensionamento de redes de abastecimento de água é matéria relativamente recente. Porém, 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, a proposição e utilização de métodos de cálculos complexos são uma realidade corrente.

Aproveitando esta vertente atual, que se utiliza de recursos computacionais e técnicas avançadas de dimensionamento, que envolvem variáveis econômicas visando à minimização dos custos, o novo método de cálculo proposto, denominado de EficientE, é baseado em técnicas de programação dinâmica, associado a um modelo de simulação hidráulica, capaz de determinar a alternativa de custo mínimo para o dimensionamento de uma rede de distribuição de água. Para o seu funcionamento, parte-se de uma solução inicial, com diâmetros mínimos, associada a uma situação de contorno pré-definida. O processo iterativo de cálculo otimizado vai paulatinamente aumentando criteriosamente os diâmetros da rede, até obter a configuração ótima, de acordo com as variáveis limitantes e restritivas, impostas para o cálculo.

Vale ressaltar que o algoritmo do novo método proposto, foi desenvolvido para modelar e dimensionar não só novas redes, mas também ampliações. Associado à metodologia proposta, visando a sua implementação e aplicabilidade, foi desenvolvido um software intitulado de EficientE, onde foi possível incorporar, sistematizar e calibrar a nova metodologia de cálculo desenvolvida. Este software, ainda em fase de desenvolvimento, será disponibilizado em breve para utilização por toda a sociedade técnica, de forma gratuita.

1.1 Objetivo Geral e Objetivos Específicos

Desenvolver um modelo matemático de cálculo, capaz de determinar a alternativa de custo mínimo para o dimensionamento de redes de distribuição de água, levando-se em conta o custo de investimento das tubulações e o custo de operação da estação elevatória.

- Desenvolver um algoritmo iterativo que convirja para a solução de custo mínimo;
- Construir um software que incorpore o algoritmo desenvolvido, projetando uma interface amigável ao projetista, aliando desempenho, praticidade e flexibilidade, para se adaptar às diversas condições de contorno e particularidades de novas redes e até mesmo ampliações;
- Realizar o dimensionamento em redes exemplos publicadas na literatura, visando à validação e comprovação da eficácia do método.

1.2 Descrição dos Capítulos

O texto está estruturado em cinco capítulos, sendo este o Capítulo 1, incluindo esta Introdução.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica onde são abordados os 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, apresentando o estado da arte.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação da metodologia e da estratégia de ação do método EficientE proposto, apresentando o seu algoritmo e as suas variáveis.

O Capítulo 4 mostra a aplicação do método EficientE, analisando e comparando os resultados obtidos com outros estudos realizados, utilizando outros métodos de dimensionamento.

O Capítulo 5 sintetiza as conclusões do presente estudo, e apresenta as recomendações do autor, para implementações futuras utilizando a metodologia proposta. Também versa a respeito da abrangência e do escopo de utilização do novo método proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Redes de Distribuição de Água

As redes de distribuição de água são compostas por elementos hidráulicos interconectados, tais como: tubulações, bombas, válvulas e reservatórios.

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

- **Objetivos técnicos:** ligados ao desempenho hidráulico, tais como a garantia das pressões mínimas e máximas, a garantia de água suficiente para seus variados destinos, confiabilidade operacional, etc.;

- **Objetivos econômicos:** traduzidos pela minimização dos custos associados aos componentes do sistema e aos custos operacionais.

As partes constituintes de um sistema de abastecimento de água são concebidas em função do porte da cidade, topografia, sua posição em relação aos mananciais etc. De um modo geral, os sistemas de abastecimento são constituídos das seguintes partes:

Manancial	É o corpo de água superficial ou subterrâneo, de onde é retirada a água para o abastecimento.
Captação	Estrutura montada junto ao manancial, para a retirada de água destinada ao sistema de abastecimento.
Estação elevatória	Quando há necessidade de elevar a água para a unidade seguinte.
Aduutora	Canalização destinada a conduzir água entre as unidades que precedem a rede de distribuição.
Estação de tratamento	Conjunto de unidades destinadas a tratar a água adequando as suas características aos padrões de potabilidade.
Reservatório	Elemento destinado ao armazenamento de água responsável pela regularização das variações entre as vazões de adução e de distribuição, promovendo pressões adequadas na rede de distribuição.
Rede de distribuição	Parte do sistema formada por tubulações e órgãos acessórios, destinado a disponibilizar água nos nós da rede, de modo a atender as demandas exigidas pelo projeto.
Ligações domiciliares	Disponibiliza água potável aos consumidores.

Segundo Santana (1999), dentre as diversas partes que compõem um sistema de abastecimento de água, a rede de distribuição apresenta maior grau de complexidade, uma vez que o consumo é, por natureza, aleatório e sazonal, não só em termos de oscilações diárias, como também, devido às oscilações em função das estações do ano.

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

- **Trecho:** compreende cada um dos percursos da rede de distribuição, onde a vazão permanece constante, para efeito de dimensionamento;

- **Nó:** ponto de conexão entre dois trechos. Nos nós se produzem modificações na vazão circulante;
- **Nó de derivação:** nó que conecta três ou mais trechos;
- **Ramal:** conjunto de trechos conectados em série sem nenhum nó de derivação;
- **Artérias:** percursos principais da rede de distribuição, formados por ramais agrupados em série;
- **Traçado da rede:** configuração da distribuição das tubulações, com a definição da situação topográfica de todos os componentes da rede;
- **Alimentação ou cabeceira da rede:** origem da rede de distribuição. Normalmente coincide com o ponto inicial do sistema de transporte, onde se localiza o reservatório de distribuição ou o bombeamento direto. Algumas redes são alimentadas diretamente por mais de um reservatório.

2.1.1 Traçado

Quanto à tipologia do traçado, as redes de distribuição de água são, basicamente, classificadas de dois tipos, a saber: malhada e ramificada. Outra nomenclatura, resultante da combinação destes dois tipos básicos é a do tipo mista.

As redes ramificadas caracterizam-se por apresentarem um único sentido de fluxo para o escoamento.

As redes malhadas caracterizam-se por apresentarem os seus trechos interligados em forma de anéis, ou malhas, fazendo com que o sentido de fluxo das vazões possa mudar, dependendo da demanda dos nós. Em virtude destas características, o dimensionamento de uma rede malhada é muito mais complexo do que uma rede ramificada.

Apesar das redes de distribuição do tipo ramificada apresentarem um menor custo e complexidade, em comparação com as malhadas, para os sistemas de abastecimento urbano são recomendadas, prioritariamente, redes do tipo malhada, pois as mesmas possuem redundância no traçado, evitando interrupção no fornecimento de água, quando se faz necessária a manutenção de algum trecho.

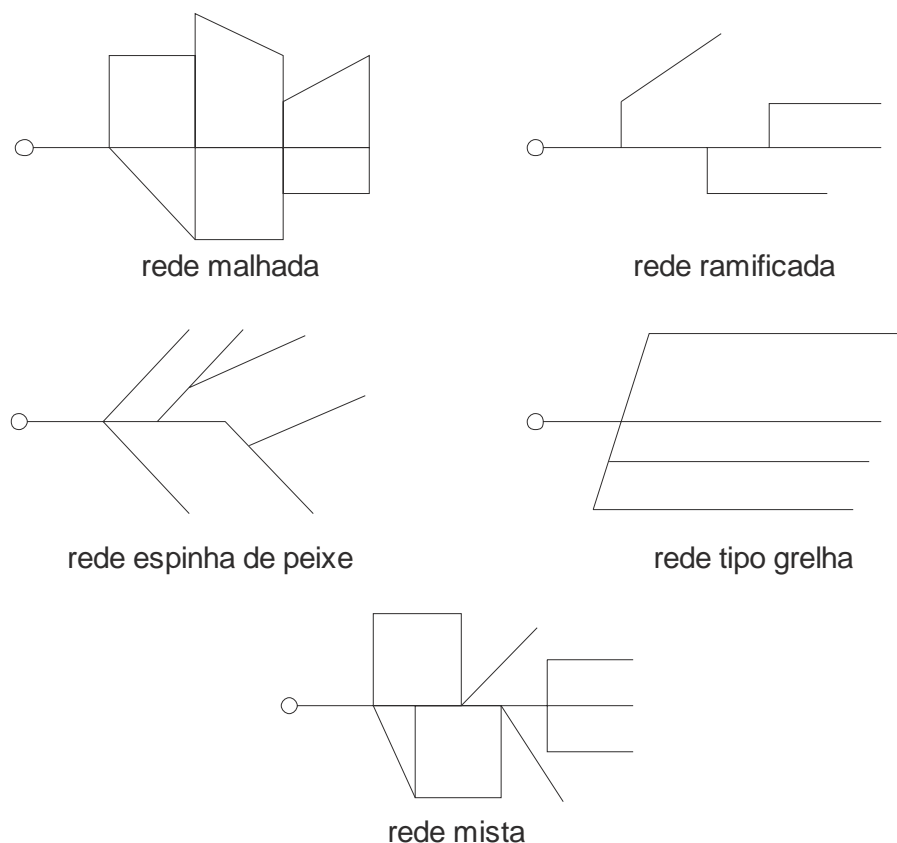


Figura 2.1 – Traçados de redes de distribuição, adaptado de Gomes (2004).

2.1.2 Variáveis de Estado

O controle das pressões hidráulicas efetivas que irão atuar em uma rede de distribuição de água é um fator fundamental, pois ele interfere diretamente na qualidade do serviço e no custo de implantação e operação do sistema.

No Brasil 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, estabelece que 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.

Face ao exposto, deve-se tentar trabalhar com um nível de pressão que satisfaça as necessidades de consumo, sem, no entanto sobrecarregar a rede com pressões demasiadas e desnecessárias, mesmo que elas estejam dentro dos valores que a norma limita.

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 velocidade mínima que é recomendada pela norma, visa manter uma permanente circulação de água na rede, como forma de não prejudicar a qualidade da água tratada, que chegará aos consumidores finais.

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 diferirem 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 como turbulento, pela caracterização de movimentos aleatórios e tridimensionais das partículas do fluido, concomitantemente ao movimento principal.

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

Os métodos de dimensionamento tradicionais levam 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. No entanto, é indiscutível a importância destes métodos para a evolução da busca por um melhor dimensionamento dos sistemas de distribuição de água. Um exemplo de um método tradicional que se utiliza de tais características é o consagrado método de *Hardy-Cross* de 1936.

A preocupação com a economia no dimensionamento de sistemas de abastecimento de água foi intensificado, sobretudo na década de 1940, quando houve uma aceleração no processo de urbanização (HAMBERG and SHAMIR, 1988). Antes desta época, muito pouco se conhecia sobre métodos para a otimização numérica de funções contendo muitas variáveis. Com a evolução dos sistemas computacionais e as ferramentas matemáticas disponíveis atuais, torna-se possível a introdução de outros critérios e variáveis na formulação de novas metodologias de dimensionamento. Mas foi na década de 1940 que ocorreu o desenvolvimento de métodos de otimização, com destaque ao método Simplex, básico dentro

da Programação Linear, com finalidade de logística militar. Os primeiros métodos de otimização Não Linear eram bastante restritos e tornaram-se mais significativos no final da década de 1950 com a introdução de muitas variáveis em pequeno tempo (MATEUS e LUNA, 1986).

O objetivo da otimização é encontrar a melhor opção, dentre todas as soluções, em potencial, de um determinado problema. Os problemas não lineares, em geral, não podem ser resolvidos utilizando técnicas clássicas de cálculo diferencial, devendo-se utilizar para resolvê-los, métodos numéricos iterativos que geram soluções intermediárias a cada passo do processo, tornando dependente da utilização de processamento computacional. Esses métodos apresentam algumas dificuldades: necessidade de uma solução inicial para se começar o processo iterativo; o escalonamento de variáveis de forma que se reduzam os erros numéricos computacionais; a aproximação do problema original para uma função matemática, entre outras.

Na década de 1960, com a consolidação do uso de computadores, nos centros de pesquisas e nas universidades, ocorreu o desenvolvimento e aplicações das técnicas de otimização matemática a problemas práticos como: alocação de recursos na indústria, planejamento de rotas de transportes, etc. Com isso, surgiram as primeiras idéias sobre a aplicação de técnicas de simulação e otimização no dimensionamento de redes de abastecimento de água. Entretanto, foi no final da década de 1960, e início dos anos 1970, que ocorreu o surgimento de métodos mais elaborados para a otimização de redes de abastecimento. Esses métodos eram baseados em técnicas heurísticas de busca, ou no emprego da Programação Linear e da Programação Dinâmica (WALSKI, 1987).

A década de 1980 foi caracterizada pela consolidação das metodologias existentes (SANTANA e SOARES, 1977). Na conferência “*Computer in Water Resources*”, realizada na cidade de *Nova York* em 1985, ocorreu uma série de seções denominadas “*The Battle of the Networks Models*”. Naquele encontro, diversos grupos de pesquisa apresentaram suas soluções para uma rede hipotética previamente estabelecida. Uma análise dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias e algoritmos empregados foi feita por Walski (1987), onde se verificou que as diferentes soluções otimizadas apresentavam uma diferença de aproximadamente 10% entre a de menor e a de maior custo.

A década de 1990 se confunde com a década atual, através da consolidação e popularização da informação através dos meios de comunicação, a exemplo da internet. A modernização e acessibilidade aos sistemas computacionais, por toda comunidade científica, impulsionou o desenvolvimento de vários estudos indo de simplistas a complexos, reformulando desde antigos métodos de dimensionamento até a criação de novos conceitos baseados em técnicas até então consideradas futuristas.

2.2.1 Enumeração exaustiva

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 que satisfaça as restrições de pressão dos nós. A principal desvantagem que esta técnica apresenta é a grande quantidade de cálculos envolvidos.

Em virtude disso, Gessler (1985) propôs o uso da enumeração seletiva, de modo a restringir severamente a quantidade de soluções possíveis para a rede, restrições essas que tiveram por base a experiência do autor. Loubser e Gessler (1990) sugeriram algumas diretrizes para a redução da quantidade de cálculo efetuado pelo computador. As principais são:

- Agrupar uma série de trechos e fazer com que o mesmo diâmetro seja utilizado em todo o grupo;
- Armazenar progressivamente as combinações de diâmetro que proporcionam o menor custo e que satisfazem as restrições, eliminando assim possíveis combinações de custos maiores;
- Checar as combinações que violam as restrições e eliminar aquelas que incluem tamanhos de tubos iguais ou menores aos rejeitados.

Apesar do auxílio dessas diretrizes, no caso de grandes redes, ainda é necessário um tempo computacional elevado para se chegar a uma solução de menor custo e não existe nenhuma garantia de que a solução ótima tenha sido descartada por essas diretrizes que simplificam o espaço das possíveis soluções (SIMPSON et al. 1994).

Um dos resultados dessa técnica de otimização foi o programa WADISO (GESSLER and WALSKI, 1985), utilizado por Leal (1995) para fazer a otimização de um sistema de abastecimento de água em João Pessoa-PB.

2.2.2 Programação Linear.

Entre as metodologias desenvolvidas nestes últimos anos para a otimização de sistemas de distribuição de água, as técnicas baseadas na programação linear formam um dos mais importantes grupos. 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 decompõe o problema da otimização em duas etapas: na primeira, algumas variáveis são tidas como fixas, enquanto outras são utilizadas através da Programação Linear (PL); na segunda etapa, uma técnica de pesquisa é utilizada para determinar como as variáveis, tidas como fixas na primeira etapa, devem ser modificadas de forma a melhorar a solução preliminarmente obtida. As duas etapas são repetidas até que não haja redução nos custos da rede.

A técnica GLP foi originalmente proposta por Alperovits e Shamir (1977). Na primeira etapa do método a vazão nos tubos foi considerada como constante. Por assumir a vazão nos tubos como constantes e conhecidas, a rede pode ser utilizada através de técnicas de programação linear, utilizando-se uma metodologia semelhante à empregada por Karmeli et al. (1968). Por esse método, cada trecho da rede é composto por uma ou mais séries de tubos com diâmetros comerciais, e os comprimentos desses sub-trechos são tidos como variáveis de decisão. Para restringir a quantidade de tubos a ser empregada em cada trecho, e conseqüentemente o número de variáveis do problema, os diâmetros comerciais, que irão ser utilizados em cada trecho, podem ser escolhidos segundo o julgamento do projetista, ou limitando a máxima e mínima perda de carga unitária.

Na segunda fase, a solução ótima obtida na etapa anterior é usada para determinar o Gradiente da Função Objetivo (GFO). Alperovits e Shamir (1977) sugeriram o uso de um algoritmo de busca simples do gradiente para:

- Determinar a direção em que o GFO irá modificar a vazão do anel;
- Definir o incremento de vazão fixo que deve sofrer cada anel da rede.

Modificada às vazões o problema inicial é novamente resolvido de forma a se encontrar uma redução do custo da rede (BHAVE and SONAK, 1992). Esse procedimento se repete até que não haja mais redução desse custo.

Quindry et al. (1979) fizeram uma correção matemática na expressão do GFO proposta por Alperovits e Shamir (1977) considerando a interação entre os trechos que pertenciam a anéis distintos da rede. Gouter e Coals (1986) consideraram diferentes configurações de fluxo para os nós da rede e observaram que a solução final é afetada pela escolha do "caminho" do fluxo entre a fonte (reservatório ou bomba) e os nós, na definição das restrições de mínima pressão nodal.

Fujiwara et al. (1987) apresentaram a derivação completa das expressões do GFO, e propuseram o uso do método Quasi-Newton para determinar a direção do fluxo e um método de busca linear, para determinar o tamanho do incremento de vazão que irá ocorrer em cada anel. Foi observado que a solução final do problema era bastante sensível ao incremento de vazão arbitrado inicialmente pelo projetista. Isso ocorre devido à existência de muitos ótimos locais próximos. Dessa forma foi sugerido o emprego de vários valores para os incrementos de vazão antes que a solução final fosse aceita.

Em outro estudo realizado, Klessler e Shamir (1989), apresentaram o problema na forma de matriz e mostraram que a solução final é independente da escolha dos caminhos de fluxo, contrariando dessa forma a afirmação feita por Gouter e Coals (1986).

2.2.3 Programação Não Linear

Até o momento, já foram aplicados vários pacotes de otimização no dimensionamento ótimo de redes malhadas. Dentre esses se pode citar o MINOS (MURTAGH and SAUNDERS 1987), GINO (LIEBMAN et al. 1986) e o GAMS (BROOK et al. 1988). Todos esses pacotes usam a técnica do Gradiente Reduzido Generalizado (ABADIE and CARPENTIER, 1969) para identificar a configuração ótima do problema. A partir desses pacotes, vários pesquisadores desenvolveram aplicações da otimização não linear para o problema das redes de abastecimento de água (EL-BAHARAWY and SMITH 1985, 1987; SU et al. 1987; LANSEY and MAYS 1989; LANSEY et al. 1989 e DUAN et al. 1990).

O modelo de Programação Não Linear - PNL consiste na otimização de uma função-objetivo sujeita ou não a restrições, onde as funções de restrições podem ser não-lineares e/ou lineares (NASH and SOFER, 1996). Essa programação é caracterizada por não possuir um único algoritmo para resolução de seus problemas (FIRMINO et al., 2004).

O maior problema desse tipo de programação está na incerteza de que a solução obtida para o problema seja realmente a melhor, isto é, muitas vezes chega-se a um ótimo local ao invés de um ótimo global, sendo este um fato inerente à natureza não linear do problema; enquanto que a sua grande vantagem é a abrangência, isto é, uma vez elaborado o modelo matemático do problema a otimizar, com sua função objetivo e suas restrições, normalmente, nenhuma simplificação será necessária em termos de formulação (CIRILO, 1997).

El-Baharawy e Smith (1985) aplicaram o MINOS no dimensionamento de sistemas de coleta e distribuição de água. Seu modelo é composto de três etapas: na primeira fase ocorre a montagem do problema, a partir do banco de dados; na segunda etapa é realizada a otimização propriamente dita e na terceira fase ocorre o arredondamento do tamanho dos tubos para diâmetros comercialmente disponíveis. Neste modelo de distribuição podem ser simuladas diversas partes que compõem o sistema de abastecimento de água como: bombas, reservatórios, válvulas de redução de pressão, válvulas de manobra, etc. El-Baharawy e Smith (1987) aplicaram este modelo em um grande número de estudos de caso onde mostraram que a sua metodologia era hábil para: trabalhar com bombas e válvulas; achar o posicionamento ótimo de um sistema auxiliar de bombas ao longo da tubulação, bem como a sua altura ótima de operação; e determinar o layout ótimo para o problema.

Su et al. (1987) usaram a programação não linear para otimizar rede malhadas. Neste trabalho, além das restrições físicas do problema (continuidade nos nós, pressão mínima requerida, etc.), foram adicionadas as restrições que envolvem a confiabilidade do sistema. Segundo os autores, a confiabilidade do sistema é a probabilidade deste executar uma tarefa, dentro de certos limites, em um determinado intervalo de tempo. A confiabilidade, relacionada aos sistemas de distribuição de água indica a capacidade que o sistema tem para suprir as demandas nos nós, ou em pontos de um sistema, com um mínimo de pressão requerida. Para aplicação dessa metodologia, foi desenvolvido um método para determinação da probabilidade de falha dos diversos componentes do sistema de abastecimento de água. As possíveis falhas dos componentes que podem acontecer incluem: ruptura da tubulação, parada do sistema de bombas, quebra de válvulas, etc.

Para a solução desse problema, o modelo de otimização foi embasado na técnica dos Gradientes Reduzidos Generalizados - GRG. O programa de simulação KYPIPE (WOOD, 1980) foi usado em cada interação para calcular a pressão ao longo do sistema. Paralelamente foi utilizado modelo para simular a confiabilidade do sistema. Este modelo define confiabilidade como a probabilidade da pressão de projeto ser mantida em todos os nós do sistema, dada a possibilidade de algum trecho da tubulação se tornar indisponível devido à quebra. Este modelo não inclui outros elementos do sistema como bombas, válvulas, reservatórios, etc.

Lansey et al. (1989) consideraram as incertezas do dimensionamento ótimo de redes, pois os sistemas de abastecimento de água, de que estas redes fazem parte, são projetados para serem utilizados durante um longo período de tempo. Devido ao número e ao tipo de futuros consumidores, torna-se impossível definir com precisão as futuras demandas e pressões requeridas para o projeto, sendo essas as grandes incertezas do problema. Outro parâmetro de incerteza no dimensionamento é o estado de conservação do sistema, que é afetado pela corrosão e pela incrustação de substâncias nos tubos. Essa mudança na conservação do sistema é refletida no coeficiente de rugosidade dos tubos (HUDSON, 1966). Como o impacto dos diferentes processos que influenciam na conservação do sistema é desconhecido, acarreta uma incerteza nas projeções dos coeficientes de rugosidade a serem utilizados no projeto.

O problema acima descrito foi solucionado, utilizando-se uma restrição de probabilidade para converter o problema probabilístico em um determinístico. Nessas

restrições são especificadas a capacidade do sistema de satisfazer as demandas e as pressões nodais.

Lancey e Mays (1989) usaram a programação não linear para fazer o dimensionamento ótimo, inclusive do layout, de redes de distribuição de água. Eles adicionaram o programa KYPIPE (WOOD, 1980) ao seu modelo, para assegurar que a continuidade e a conservação de energia fossem atendidas. O método GRG é utilizado para encontrar a solução ótima para o problema e um método Lagrangiano é usado para incluir as restrições. Posteriormente Duan et al. (1990) fizeram um aprimoramento do método de Lancey e Mays (1989). Foi desenvolvido um modelo de otimização generalizado no qual podem ser incluídos bombas, reservatórios e suas alocações. Este modelo é dividido em três fases: na primeira fase (problema principal) é identificado o número e a alocação de tanques e reservatórios utilizando métodos de enumeração exaustiva. Na fase seguinte (subproblema) é utilizada a técnica GRG para se fazer a otimização dos tubos, para layout de bombas e reservatórios especificados no problema principal. A terceira etapa é um *loop* dentro do subproblema que serve para segurar que as equações de continuidade e de pressão mínima requerida nos nós sejam satisfeitas. Ainda nesta etapa é feita uma análise da confiabilidade do sistema.

Silva (1997) aplicou a PNL na otimização de redes ramificadas. O problema foi resolvido em duas etapas: na primeira foram consideradas como variáveis de decisão a cota de cabeceira e os diâmetros contínuos dos tubos. Na segunda fase adotam-se diâmetros discretos, dentre os comercialmente disponíveis e utiliza-se como variáveis de decisão o comprimento dos tubos juntamente com a cota de cabeceira. Verificou-se que, para redes ramificadas, a PNL apresenta resultados semelhantes àqueles obtidos pelas metodologias de Granados (GRANADOS, 1990) e da programação linear (KARMELI et al., 1968).

Cirilo (1997) propõe um modelo de otimização de redes malhadas, em que o problema é resolvido sem a necessidade de se utilizar um programa para o balanceamento de vazões da rede, a fim de se assegurar a continuidade e a pressão mínima nodal. Para isso é considerado como variáveis de decisão a vazão e os diâmetros da tubulação. A função objetivo proposta não visa à minimização dos custos, mas sim a determinação de diâmetros mínimos e máximas vazões, que estejam dentro dos limites impostos pelas restrições.

Gomes e Formiga (2001) propuseram uma metodologia denominada PNL2000. Esta metodologia de dimensionamento 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 no processo de otimização. Em seguida, com os resultados obtidos no pré-dimensionamento, executa-se uma segunda etapa, na qual se realiza um ajuste da solução inicialmente obtida. Este ajuste se faz necessário, porque os valores dos diâmetros encontrados na primeira etapa do processo (valores contínuos) não coincidem com as bitolas nominais disponíveis no mercado. O ajuste trata da substituição, em cada trecho, do diâmetro calculado inicialmente pelo comercial mais próximo. No processo de otimização, o PNL2000, utiliza o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG2), desenvolvido por Lasdon et al. (1984). O modelo foi formulado e processado através da ferramenta *Solver* da planilha eletrônica *Excel* da *Microsoft*. Este método aplica-se a redes malhadas para as seguintes situações de contorno: cota piezométrica de cabeceira fixa ou variável.

2.2.4 Programação Dinâmica

Monbaliu et al. (1990) propôs uma técnica de gradiente de pesquisa para alcançar um projeto eficiente. Inicialmente, fixa-se um diâmetro mínimo para cada tubo, em seguida, utiliza-se um pacote de simulação para se determinar as pressões nos nós da rede. Se os limites mínimos de pressão não são satisfeitos, o tubo com a maior perda de carga unitária tem o seu diâmetro elevado para o imediatamente superior, em seguida é feita uma nova simulação. Este processo é repetido até que todos os limites de pressão sejam satisfeitos.

Leal e Gomes (1997) propõem uma metodologia semelhante só que ao invés de utilizar a maior perda de carga unitária como parâmetro para a escolha de qual tubo irá ter o seu diâmetro modificado, é utilizado o acréscimo de custos de um determinado trecho, produzido pela mudança de seu diâmetro pelo nominal consecutivo superior, relacionado com a diminuição da perda de carga correspondente, o que se chama de Gradiente de Câmbio (GRANADOS, 1990). Para se aplicar o método Granados no dimensionamento de redes malhadas, é necessário transformar essas redes em ramificadas, através de um seccionamento semelhante ao efetuado no método do Seccionamento Fictício (Leal, 1995).

A metodologia de trabalho de Leal (1995) consistiu basicamente em se utilizar o programa REDES (GOMES, 1995) para se fazer o dimensionamento da rede ramificada, obtida a partir do seccionamento. O balanceamento da rede é efetuado, através do método de *Hardy-Cross*, a cada iteração, de modo a atender as restrições de energia e continuidade características das redes malhadas.

Bezerra (2005) propôs uma metodologia mais elaborada fundamentada no algoritmo de otimização de Granados, e se divide em duas etapas. A primeira consiste na determinação da solução inicial, na qual a rede será composta pelos diâmetros das tubulações existentes submetidos às vazões do projeto de reabilitação. A segunda etapa compreende uma seqüência de interações, onde se diminui paulatinamente (a partir da solução inicial) a cota piezométrica de alimentação e, obtém-se, para cada decréscimo dessa cota, um novo custo de reabilitação para a rede de distribuição, decorrente de diversas opções de reabilitações (substituição das tubulações antigas por novas de maiores diâmetros, limpeza e reparo das tubulações antigas, etc.). O processo interativo termina quando o custo de intervenção numa determinada interação superar o custo energético. Esta interação apresentará os dados que resultam no custo ótimo do conjunto - investimento (intervenção física da rede) mais operação (custo atualizado da energia) do sistema de abastecimento/bombeamento. No seu processo interativo o método utiliza-se do conceito do Gradiente de Câmbio – “G” (GRANADOS, 1990). Originalmente, o “G” de um determinado trecho será definido como sendo o acréscimo de custo gerado pela substituição de uma tubulação específica por outra de maior diâmetro, relacionada com a diminuição da perda de carga correspondente. Na metodologia proposta por Bezerra (2005) este conceito foi ampliado, passando a sua definição a ser seu custo marginal da diminuição da perda de carga, alcançado num determinado trecho, mediante a aplicação de uma opção de reabilitação. Para a determinação do custo atualizado da energia de bombeamento, por metro de elevação, chamado de Gradiente Energético - G_e , que corresponde ao barateamento alcançado em termos de consumo de energia, para um metro na redução da cota piezométrica de alimentação. Desta forma, a cota piezométrica de alimentação que proporciona o custo ótimo da reabilitação da rede de distribuição mais a energia capitalizada consumida pelo bombeamento, é obtida quando o valor do gradiente energético é igualado ou superado pelo valor do Gradiente de Câmbio Ótimo – “G*”, no processo interativo.

2.2.5 Algoritmos Evolucionários (Genéticos)

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

O AG é um algoritmo de busca baseado na seleção natural e nos mecanismos da genética das populações (HOLLAND, 1975 e GOLDBERG, 1989). O AG tem por fundamento o processo biológico de sobrevivência e adaptação. O resultado disso é um algoritmo eficiente e flexível que permite a solução de problemas complexos como a otimização de redes malhadas (SAVIC and WALTERS, 1977).

Simpson et al. (1994) utilizaram um algoritmo genético simples composto por três operadores: reprodução, cruzamento e mutação. Foram utilizadas cadeias de números binários para a codificação das variáveis de decisão, onde foram considerados diâmetros comerciais. O modelo desenvolvido se divide em três partes, onde a primeira ocorre a geração de uma "população inicial" de soluções para o problema. Na segunda etapa, é feita a simulação hidráulica da rede, através de um método de balanceamento tradicional. Em seguida, é feita a geração de uma nova população, a partir dos "indivíduos" que compõe a população inicial. As duas últimas etapas são repetidas até que não haja mais redução do custo mínimo da rede, à medida que vão surgindo novas populações.

Savic e Walters (1977) desenvolveram um modelo computacional chamado GENET, utilizado para a solução do problema de menor custo de uma rede. Esse programa utiliza basicamente os mesmos operadores empregados por Simpson et al. (1994). O algoritmo de simulação da rede é baseado no programa EPANET (ROSSMAN, 1993), que emprega o método do gradiente (TODINI and PILATI, 1987) para determinar as vazões nos trechos e as pressões dos nós da rede. Esse método é mais eficiente do que as técnicas tradicionais de balanceamento de rede, o que implica em uma quantidade menor de tempo de processamento do que o utilizado por Simpson et al. (1994).

2.2.6 Otimização Global

Normalmente os métodos baseados na Programação Linear e Não Linear, apresentam como principais desvantagens, respectivamente, a dificuldade de representar adequadamente redes mais complexas e a dependência da solução final está ligada diretamente aos valores iniciais arbitrados sobremaneira em redes de médio e grande porte. Como não se garante que a resposta encontrada no processo de otimização seja a melhor solução, ou seja, o ótimo global para o problema, estudos passaram a empregar técnicas para se obter esta solução. Essas técnicas fazem parte de um ramo da Pesquisa Operacional denominado Otimização Global – OG. Embora seja viável, este tipo de metodologia ainda possui deficiências e limitações que comprometem o seu uso em alguns casos. A elevada enumeração de nós provoca elevados tempos de processamento computacional, sobretudo em redes de grande porte.

Segundo Neumaier (2001), a OG é uma ferramenta capaz de determinar o conjunto absoluto de soluções admissíveis para se encontrar a melhor solução que atende um objetivo sob determinadas condições, assumindo que ambos possam ser expressos em termos matemáticos. Os métodos numéricos utilizados na Otimização Global podem ser classificados em três categorias: Métodos Heurísticos, Métodos de Aproximação e Métodos Sistemáticos.

Segundo Lopes (2002) não se pode garantir formalmente que a solução encontrada é o ótimo global, pois os métodos de OG são capazes de encontrar soluções muito próximas do mesmo, não sendo necessariamente o próprio. De um modo geral, as soluções encontradas pelos métodos sistemáticos são mais confiáveis do que os heurísticos, devido à forma com que estes delimitam o problema e executam a busca, porém necessitam, na maioria dos casos, de uma quantidade computacional maior do que os algoritmos heurísticos.

A partir de meados da década de 1990, diversas técnicas de Otimização Global - OG foram aplicadas ao problema de minimização dos custos das redes de abastecimento, a saber: Métodos *Branch and Bound* (EIGER, SHAMIR and BEM-TAL, 1994; SHERALI TOTLANI and LOGANATHAN 1998; COSTA MEDEIROS and PESSOA, 2001 e LOPES 2002), Algoritmos Genéticos (SIMPSON, DANDY and MURPHY, 1994 e SAVIC and WATERS, 1997b), *Simulated Annealing* (CUNHA and SOUZA, 1999), *Ant Colony Optimization* – (MAIER et al., 2001, 2003), *Shuffled Frog Leaping Algorithm* (EUSUFF and LANCEY, 2001; LIONG and ATIQUZZAMAN, 2004).

2.3 Simulador Hidráulico (EPANET2)

Os modelos de simulação de sistemas de transporte e distribuição de água classificados como simuladores hidráulicos são instrumentos computacionais, utilizados em larga escala no campo do planejamento, do projeto e do diagnóstico de funcionamento dos sistemas de abastecimento, sendo um complemento na tomada de decisão do projetista e empresas. O desenvolvimento de um modelo de simulação confiável não é uma tarefa fácil. Ademais, os disponíveis no mercado possuem um custo de investimento elevado. A utilidade de um modelo de simulação, tanto para a correta exploração dos sistemas – na procura da garantia do atendimento das condições hidráulicas – como também para um melhor planejamento das suas expansões e outras intervenções, é incontestável.

Um dos simuladores mais atrativos para as entidades gestoras, consultores, investigadores e acadêmicos é o EPANET2 (ROSSMAN, 2000), desenvolvido por *Lewis A. Rossman da U. S. Environmental Protection Agency (USEPA)*, 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. Além do atrativo técnico e qualitativo, o EPANET2 é *freeware*. Ele se constitui num modelo de simulação do comportamento hidráulico e da qualidade da água de sistemas de abastecimento 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, etc. É indicado para verificar o desempenho dos sistemas de distribuição para diversas configurações; dentre as várias características do programa, Rossman (2000) destaca:

- Podem ser consideradas as perdas de carga em curvas, alargamentos e estreitamentos, associando à tubulação um coeficiente de perda de carga singular;
- As bombas podem ser modeladas como sendo de velocidade constante ou variável. Tal como as tubulações, as bombas podem ser ligadas ou desligadas em determinados períodos de tempo ou quando ocorrem determinadas condições de operação na rede;
- As condições de operação da bomba podem ser descritas associando-lhe um padrão temporal relativo à variação da regulação da velocidade;
- Pode-se determinar o consumo de energia e o custo de bombeamento;

- Permite a modelação de reservatórios de nível variável, cuja secção transversal varia com a altura, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Capacidade de associar múltiplas categorias de consumo num nó, cada categoria com um padrão próprio de variação no tempo; e
- As condições de operação do sistema podem ser baseadas em controlos simples, dependentes de uma só condição (período do dia, altura de água num reservatório de nível variável), ou em controlos com condições múltiplas.

O EPANET2 possui uma interface gráfica que possibilita ao usuário cadastrar um projeto e configurá-lo com todos os seus elementos e características. Desta forma, estando o projeto devidamente cadastrado e configurado, 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 apresentado um método baseado em programação dinâmica, que se propõe a buscar a solução de custo mínimo para o dimensionamento de redes de distribuição de água, sendo o EPANET2 o simulador hidráulico utilizado no processo iterativo, para obtenção das variáveis de estado a cada iteração.

2.4 Conceitos Econômicos Aplicados

Para o dimensionamento que objetiva a minimização dos custos, deverão ser utilizados conceitos matemáticos e econômicos. Isto possibilitará um dimensionamento não só apenas válido sob o ponto de vista de satisfazer as condições hidráulicas, mas também buscar a melhor alternativa de cálculo para o sistema, em termos econômicos.

A análise econômica envolve os custos fixos (investimentos) e os custos variáveis (operação do sistema de propulsão). Os custos de investimentos são relativos à implantação das tubulações. Os custos variáveis são os que incidem logo após as intervenções físicas, ou seja, no decorrer do alcance do projeto ou da vida útil dos equipamentos (energia elétrica).

As concessionárias de energia elétrica cobram dois tipos de tarifas: uma correspondente à energia realmente consumida - tarifa de consumo - e outra, que é um valor cobrado mensalmente pela potência instalada - tarifa de demanda (é cobrada mesmo que não haja o consumo da energia). O custo total (C_e) da energia elétrica anual de um sistema propulsor é dado pela Equação (2.1):

$$C_e = P \times T_c \times n_b + P_d \times T_d \times 12 \quad (2.1)$$

onde:

C_e - custo anual total da energia elétrica, em R\$/ano;

P - potência requerida do motor elétrico, em kW;

T_c - preço da tarifa relativa ao consumo de energia elétrica, em R\$/kWh;

n_b - número de horas de bombeamento anual, em horas/ano;

P_d - demanda contratada, em kW; e

T_d - preço da tarifa relativa à demanda de energia elétrica, em R\$/kW.mês.

Para a obtenção do custo mínimo do projeto, faz-se necessário converter, através de um artifício aritmético financeiro, os gastos variáveis em gastos fixos, ou vice-versa (os fixos em variáveis), permitindo a avaliação conjunta dos mesmos. Desta forma, podem-se comparar as várias alternativas e escolher aquela que apresenta o menor custo total (investimento mais operação). Neste caso, será empregada a análise econômica através do valor presente, onde as despesas anuais de exploração serão convertidas em valores fixos atualizados. A Figura 2.2 mostra o diagrama do fluxo de caixa dos custos anuais (C_{ei}) ao longo da vida útil do projeto,

considerando que as despesas com operação ocorrerão após a realização das despesas com investimento (I).

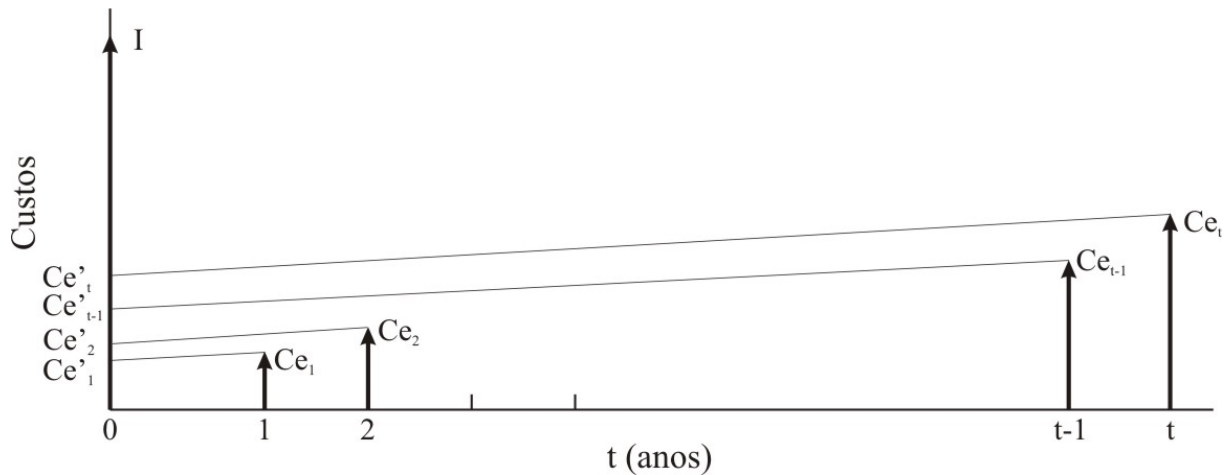


Figura 2.2 – Custo de investimento e valores presentes dos custos variáveis.

O fator de atualização (Fa), para o alcance do projeto (“n” anos), também chamado de fator de valor presente, que efetua a conversão de uma série de custos anuais para um valor presente, sujeita a uma taxa de juros “i” e de aumento de tarifa de energia “e”, para “i” diferente de “e” é dado pela Equação (2.2).

$$Fa = \frac{(1+e)^n - (1+i)^n}{(1+e) - (1+i)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2.2)$$

“A estimativa dos valores da taxa de juro anual (i), da taxa de aumento anual do custo da energia (e) e do número do alcance do projeto, estará sempre sujeita a um determinado grau de incerteza. As taxas de juros e de aumento da energia dependem de fatores econômicos, financeiros e também políticos. A estimativa, mais ou menos precisa, dos valores de “i”, “e” e “n”, dependerá muito da experiência do projetista, embora, na maioria dos sistemas de abastecimento, que são financiados por bancos de desenvolvimento ou entidades de fomento, os valores das taxas de juros, de aumento da energia e do alcance do projeto sejam de antemão estabelecidos pelos órgãos financiadores” afirma Gomes (2004).

3 METODOLOGIA

3.1 Desenvolvimento Metodológico - Método EficientE

O método EficientE é um algoritmo iterativo de dimensionamento otimizado de redes de distribuição pressurizada de água, composto pela rede de abastecimento, com seu conjunto de impulsão (equipamento capaz de pressurizar uma rede – bombeamento, reservatório, etc.). O método proporciona como resposta ao dimensionamento, os diâmetros de todos os trechos da rede e a cota piezométrica da impulsão, de forma a alcançar o custo mínimo total do sistema, composto pela rede de tubulações e a energia de bombeamento. O método proposto utilizou os mesmos princípios do método de Reabilitação de Redes Pressurizadas de Distribuição de Água, elaborado por Bezerra et al., (2006), diferindo na sua aplicabilidade que foi modificada, modelada, adaptada e validada, com vistas ao dimensionamento econômico.

O processo de otimização do método EficientE compreende um processo iterativo, dinâmico, que parte de uma solução inicial (de contorno), onde a rede de distribuição é composta, inicialmente, pelos diâmetros mínimos admitidos para o projeto em consideração.

Esta solução inicial possui um custo mínimo de implantação da rede, já que está composta pelos diâmetros mínimos atribuídos. No entanto, esta solução inicial, na grande maioria das vezes, não é uma alternativa factível para o sistema, pois ela proporciona perdas de carga excessivas nos trechos, acarretando níveis insuficientes de pressão disponível nos nós da rede.

A partir da solução inicial da metodologia proposta, o processo de cálculo se desenvolve, iterativamente, de maneira que cada solução subsequente, a ser obtida, dependerá da solução anterior. As soluções subsequentes serão obtidas, passo a passo, aumentando-se os diâmetros de cada trecho da rede, de forma que o acréscimo de custo da rede seja o mínimo possível. O processo iterativo termina quando a configuração dos diâmetros da rede atende às restrições hidráulicas impostas no projeto.

Para o funcionamento do algoritmo do método proposto, este deve ser associado, em paralelo, a um *simulador hidráulico*, que fornecerá a cada iteração, o equilíbrio hidráulico do sistema e os valores das variáveis de estado do escoamento do fluxo d'água na rede (vazão, velocidade e perda de carga nos trechos e pressão disponível nos nós), segundo as diversas configurações de diâmetros testadas nos trechos. O simulador escolhido para trabalhar com o método foi o EPANET2 (ROSSMAN, 2000).

No método de otimização proposto, os aumentos dos diâmetros da rede, com o menor acréscimo de custo possível, dependerão do estado de pressão no sistema de abastecimento, especificamente, no nó mais desfavorável da configuração inicial de diâmetros de cada iteração.

Com a solução inicial estabelecida, na qual a rede é composta pelos mínimos diâmetros admitidos, efetua-se uma primeira simulação de escoamento na rede, com o EPANET2, para a obtenção das pressões em todos os nós da rede.

O nó mais desfavorável da rede será aquele, onde a pressão disponível é a mínima. Normalmente, nas primeiras iterações, este valor será negativo, pois na solução de partida os diâmetros mínimos atribuídos aos trechos da rede, acarreta elevadas perdas de carga ao longo do sistema. Uma vez detectado o nó mais desfavorável e a sua respectiva pressão, inicia-se o processo de cálculo otimizado, para a obtenção, na correspondente iteração, da mudança de configuração da rede que proporciona o menor aumento de custo possível, por ganho de pressão (alívio de perda de carga).

Na correspondente iteração, testar-se-ão as várias configurações de diâmetros, relativas à quantidade de trechos da rede, ou seja, o número de configurações de diâmetros da rede, em cada iteração, será igual ao seu número de trechos. A mudança física a ser realizada em cada configuração, em relação à iteração correspondente, será a substituição do diâmetro de apenas um dos trechos da rede, pela bitola imediatamente superior. A mudança efetiva, em uma iteração, do diâmetro de um determinado trecho da rede, pelo seu superior, será definida em função do menor acréscimo de custo da rede, pelo ganho de pressão proporcionado. O trecho que terá confirmada a sua modificação será o que resultar o menor *gradiente de pressão* correspondente ao nó mais desfavorável. O gradiente de pressão, relativo a um determinado trecho da rede, correspondente ao nó mais desfavorável, é dado pela Equação (3.1). Ele representa o custo marginal do alívio de perda de carga na rede, proporcionado pela troca do diâmetro do trecho da rede pelo seu adjacente superior.

$$Gp = \frac{P_2 - P_1}{\Delta p} \quad (3.1)$$

onde:

- Gp - Gradiente de pressão, em unidades monetárias, por metro de alívio de perda de carga (\$/mca);
- P₁ - Custo da tubulação do trecho com o seu diâmetro atual, em \$;
- P₂ - Custo da tubulação do trecho com o diâmetro imediatamente superior ao atual, em \$;
- Δp - Ganho de pressão no nó mais desfavorável, proporcionado pela diminuição da perda de carga, em razão da troca do diâmetro do trecho considerado pelo seu superior, em mca.

Em cada iteração haverão “n” gradientes de pressão, correspondentes às “n” configurações de mudanças de diâmetros dos “n” trechos da rede. O gradiente de pressão ótimo (Gp*) será o menor entre todos os calculados, em cada iteração. O trecho correspondente ao gradiente de pressão ótimo será chamado de trecho ótimo (t*), para cada iteração.

A determinação do gradiente de pressão ótimo, em cada iteração, é feita calculando-se

o gradiente para todos os trechos da rede. O preço “ P_1 ”, para cada trecho, é o seu custo unitário de implantação, multiplicado pelo respectivo comprimento, e “ P_2 ” é o preço correspondente ao mesmo trecho com o diâmetro imediatamente superior. O valor de “ Δp ”, referente ao cálculo do gradiente de pressão, corresponde à diferença entre a pressão no nó mais desfavorável (naquela iteração) e a pressão neste mesmo nó, quando a rede se encontra com o diâmetro superior ocupando o trecho em questão. Para a determinação do gradiente de pressão ótimo, em cada iteração, deve-se calcular o gradiente de todos os trechos, em relação ao nó mais desfavorável. Para o cálculo do gradiente de pressão de cada trecho, em cada iteração, deve-se simular o escoamento na rede, para cada configuração, com o simulador hidráulico (EPANET2), para se conhecer a pressão final no nó mais desfavorável. Após o cálculo do gradiente de pressão de cada trecho, em cada iteração, o diâmetro superior deste trecho volta a sua bitola imediatamente anterior para que sejam determinados os cálculos dos próximos gradientes. Definido o gradiente de pressão ótimo, a rede assumirá uma nova configuração, onde o trecho ótimo passará a ser ocupado pelo diâmetro imediatamente superior. Esta última configuração será a configuração de partida para a iteração seguinte. O processo iterativo de otimização segue a metodologia antes mencionada até atingir a solução final, definitiva, que será a solução buscada, de custo ótimo, para o sistema pressurizado de distribuição de água, atendendo às condições de contorno do projeto considerado.

O método trabalha com duas alternativas de dimensionamento, que determinam as condições de convergência ou de parada do processo iterativo de otimização. Na primeira alternativa a rede é abastecida por um reservatório elevado e, portanto, sua cota piezométrica na cabeceira é fixa e conhecida. Neste caso, o custo do sistema corresponderá ao custo de implantação da rede de tubulações. Na segunda alternativa a água é impulsionada para o sistema através de bombeamento e o custo total do sistema será composto pelo custo da rede de tubulações, mais o custo energético, atualizado, da estação elevatória. Neste último caso a cota na cabeceira será uma variável de decisão a mais no processo de otimização.

3.2 Situação de Contorno Com a Cota Piezométrica de Cabeceira Fixa

Na primeira alternativa quando a cota piezométrica na cabeceira é fixa, a condição de parada das iterações ocorrerá quando a pressão no nó mais desfavorável atinja ou supere o valor da pressão mínima requerida para a rede.

Na conclusão do processo iterativo de otimização, normalmente, existirá uma folga de pressão no nó mais desfavorável da rede, que poderá ser aproveitada no processo de otimização, eliminando-a para se diminuir, ainda mais, o custo do sistema. Neste caso, o método prevê a divisão do trecho modificado na última iteração em dois novos trechos, um composto pelo diâmetro final do dimensionamento do trecho e o outro com o imediatamente inferior, de forma que se aumente a perda de carga no trecho para compensar a folga de pressão no nó mais desfavorável. Esta divisão se dará da seguinte forma: criar-se-á um nó intermediário entre os nós limítrofes do trecho em questão, e os dois novos trechos resultantes ficarão um com o diâmetro original e o outro com o diâmetro disponível imediatamente inferior. Para a escolha efetiva dos comprimentos das tubulações dos dois sub-trechos, será necessário determinar o sentido de fluxo no trecho em estudo. O sentido de fluxo no trecho considerado será determinado pelo simulador hidráulico, na direção da maior para a menor carga piezométrica nos dois nós do trecho. Em seguida, determinam-se os comprimentos dos novos sub-trechos, de modo que o nó mais desfavorável da rede atinja, exatamente, o valor da pressão mínima requerida. Os comprimentos dos sub-trechos são obtidos com base no algoritmo de busca otimizada, conhecido como “*divida e conquiste*”. Ou seja, por tentativa o trecho a ser dividido será repartido, repetidamente, buscando-se adequar as perdas de carga totais nos dois sub-trechos, de maneira que a pressão no nó mais desfavorável se ajuste à pressão mínima requerida.

Finalmente, resta determinar a cota do terreno para o nó intermediário criado. Esta cota determina-se utilizando a relação expressa na Equação (3.2), deduzida a partir da semelhança de triângulos (ver Figura 3.1).

$$X = \frac{t1b (Cn1-Cn2)}{t1a+t1b} \quad (3.2)$$

onde:

t1a - Comprimento do trecho t1a, m;

t1b - Comprimento do trecho t1b, m;

Cn1 - Cota do terreno no nó n1, m;

Cn2 - Cota do terreno no nó n2, m;

- X - Valor a ser somado com a cota do nó n2 (Cn2), para obtenção da cota no nó n1a, m.

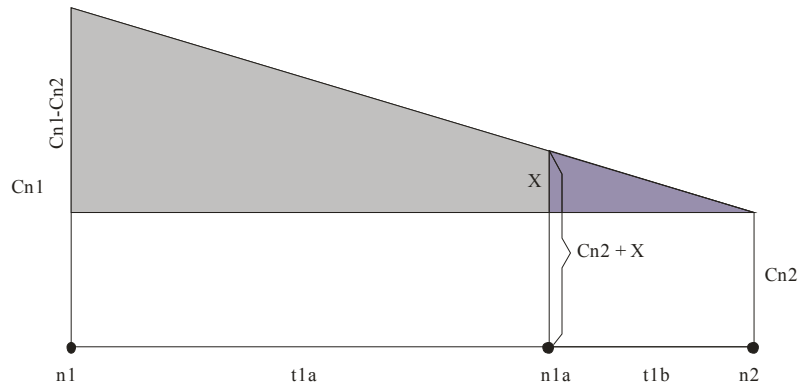


Figura 3.1 - Semelhança de triângulos, para determinar a equação da cota do terreno.

Realizados todos estes procedimentos, uma simulação hidráulica final deverá ser realizada na rede, para a determinação definitiva das variáveis de estado.

3.3 Situação de Contorno Com a Cota Piezométrica de Cabeceira Variável

No dimensionamento do sistema, em que a rede é pressurizada através de um estação elevatória, o método EficientE leva em conta o custo da energia de bombeamento, em que a altura manométrica na cabeceira será uma variável a mais no processo de otimização. Neste caso, o processo de otimização dependerá, também, do custo de pressurização da água, que será considerado aqui mediante a grandeza denominada *gradiente energético*. O gradiente energético representa o custo anual, atualizado, de pressurização da água, por metro de elevação, e é dado pela Equação (3.3).

$$Ge = Pm \times T \times N_b \times Fa \quad (3.3)$$

onde:

- Ge - Gradiente energético anual, atualizado, em \$/m;
Pm - Potência requerida pelo conjunto elevatório, por metro de elevação (potência unitária), em kW/m;

- T - Tarifa de energia elétrica, em \$/kWh;
- N_b - Número de horas de bombeamento anual;
- Fa - Fator de Atualização, ou Fator de Valor Presente, dado pela Equação (2.2).

Obs.: \$ = Unidades Monetárias.

A potência requerida, por metro de elevação de água, em kW/m, é dada pela Equação (3.4).

$$P_m = \frac{9,81 \times Q}{\eta} \quad (3.4)$$

onde:

- Q - Vazão demandada pelo sistema, em m³/s;
- η - Rendimento esperado do conjunto motor-bomba, em decimal;

O número de horas de bombeamento anual, determinado pela Equação (3.5).

$$N_b = N_h \times 365 \quad (3.5)$$

onde:

- N_h - Número de horas diárias de bombeamento.

No dimensionamento otimizado, com a cota na cabeceira variável, o valor adotado desta cota, na solução inicial, será igual a zero.

Com a configuração inicial da rede, composta pelos diâmetros mínimos admitidos, executa-se a primeira simulação para identificar o nó mais desfavorável, analogamente ao que foi feito para a situação de contorno, em que a cota piezométrica na cabeceira é fixa. A partir da solução inicial, com a cota piezométrica nula na cabeceira, o procedimento iterativo obedece à mesma metodologia descrita para a situação de dimensionamento com a cota fixa de cabeceira. Ao final de cada iteração do processo de otimização, compara-se o gradiente de pressão ótimo encontrado (G_p^*) com o Gradiente Energético (G_e) calculado. Caso o G_p^* seja

inferior ao G_e , o custo de investimento para diminuir as perdas de energia na rede de tubulações - e conseqüentemente aumentar a pressão no nó mais desfavorável - será inferior ao custo energético para aumentar a carga na rede (aumentando, também, a pressão no nó mais desfavorável). Neste último caso, a modificação do sistema ocorrerá com a troca de diâmetro no trecho ótimo (de menor gradiente de pressão).

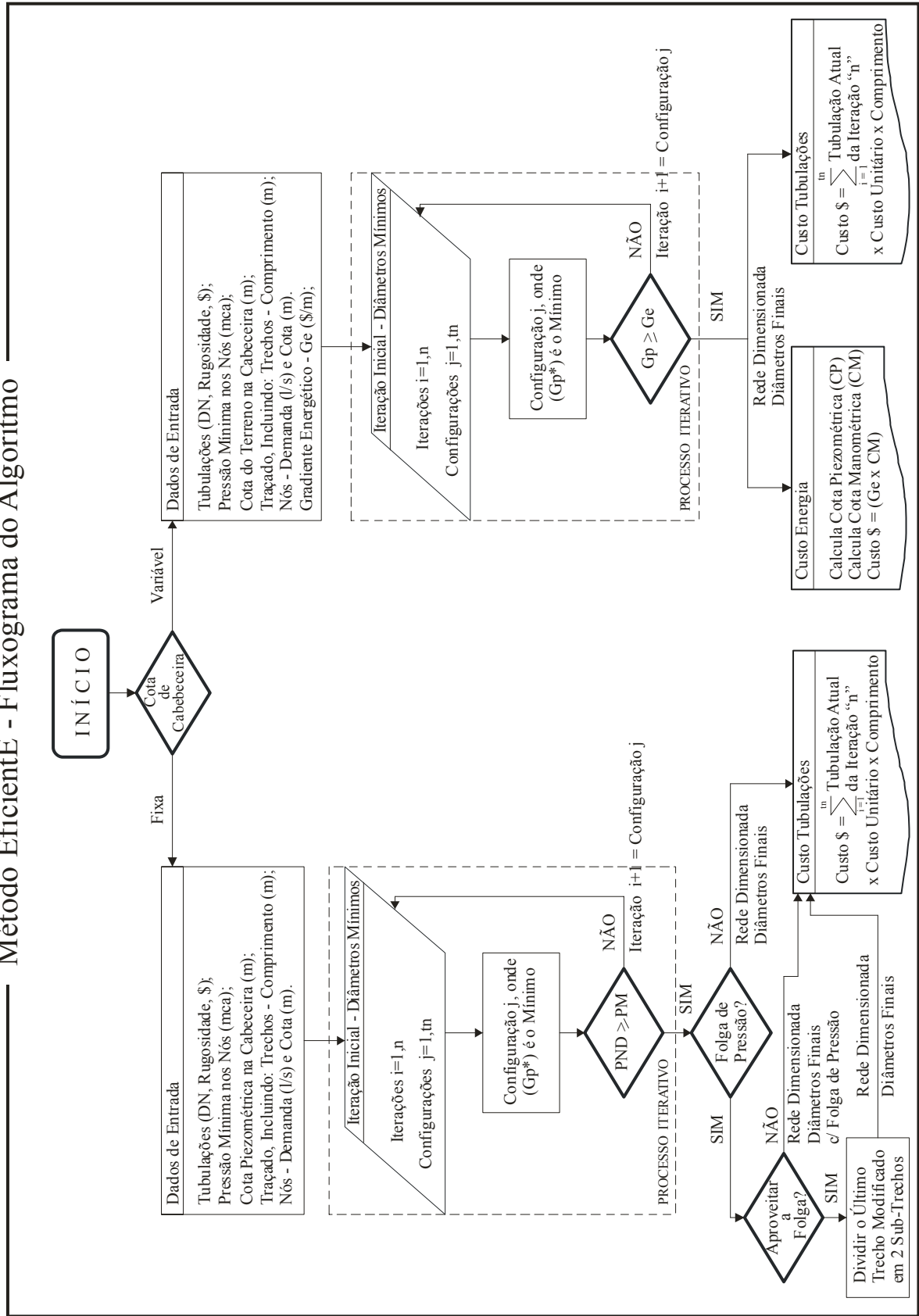
O processo iterativo seguirá aumentando os diâmetros dos trechos ótimos até que o valor do G_p^* iguale ou supere o valor do G_e . Nesta última condição o processo iterativo de otimização alcança a sua solução de parada e a configuração de diâmetros nos trechos da rede será a definitiva.

Com a obtenção da solução da última iteração, deve-se determinar o valor da cota piezométrica e da altura manométrica na cabeceira da rede. Para a obtenção da cota piezométrica de cabeceira, deve-se somar o valor encontrado para a pressão no nó mais desfavorável, em módulo, ao valor da pressão mínima estabelecida para os nós da rede. Este valor obtido corresponderá à cota piezométrica na cabeceira definitiva do sistema. A cota piezométrica definitiva será configurada na rede, como sendo o nível de água na alimentação do sistema. Após esta configuração, a rede deverá ser simulada hidraulicamente uma última vez. Dessa forma, todas as variáveis de estado serão atualizadas, de modo que a pressão obtida no nó mais desfavorável atinja exatamente o valor da pressão mínima requerida.

Na solução definitiva, o valor presente do custo total, otimizado, do sistema de distribuição de água, será igual ao custo de implantação das tubulações, mais o custo capitalizado da energia de bombeamento. O custo das tubulações é determinado baseado nos diâmetros dos trechos da última iteração, e é determinado pelo somatório da multiplicação dos seus respectivos comprimentos pelos custos unitários correspondentes. Para o cálculo da componente de custo da energia, se faz necessário determinar a cota manométrica na cabeceira. A cota manométrica na cabeceira é obtida subtraindo-se da cota piezométrica na cabeceira dimensionada anteriormente, a cota do terreno neste ponto. Assim, o cálculo do custo da energia do sistema será o valor da cota manométrica, multiplicada pelo gradiente energético (G_e), previamente calculado.

A Figura 3.2 mostra, em detalhes, a metodologia utilizada no método EficientE, através de um fluxograma que apresenta, esquematicamente, todo o desenvolvimento do algoritmo.

Método EfficientE - Fluxograma do Algoritmo



n - número genérico de iterações; tn - número de trechos; PND - pressão no nó mais desfavorável; PM - pressão mínima requerida; \$ - unidades monetárias.

Figura 3.2 – Método EfficientE - Fluxograma do Algoritmo.

4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Software EficientE

Visando a utilização prática do método proposto, foi desenvolvido um software denominado EficientE. Este software possui uma interface com o EPANET2, e se propõe a efetuar o dimensionamento de uma rede de distribuição de água, considerando além das variáveis hidráulicas limitantes, a variável custo.

Segundo Jacobi (1968), os métodos de otimização que utilizam critérios de ordem econômica, tendem a dimensionar uma rede malhada transformando-a em ramificada. Entretanto, em virtude da flexibilidade que o método EficientE de otimização oferece, o projetista poderá montar a sua configuração inicial ou de partida, arbitrando os diâmetros iniciais para a rede livremente, estabelecendo, desta forma, uma configuração personalizada para a rede. A solução nestes casos poderá não ser a mais econômica, porém será a mais adequada.

Para o dimensionamento de uma rede de distribuição de água através do software EficientE, faz-se necessário que o traçado da rede seja previamente realizado, incluindo todos os dados básicos necessários ao seu escoamento, utilizando o software EPANET2, ou o próprio software EficientE. O software EficientE trabalha com arquivos com extensão “inp” válidos. Esses tipos de arquivos possuem um formato nativo compatível com a arquitetura EPANET2 e podem ser facilmente manipulados e exportados. Após a importação de um arquivo válido, o software EficientE processa o arquivo, de acordo com situação de contorno pré-definida e após a aplicação do seu processo iterativo de otimização, apresenta automaticamente o dimensionamento das tubulações para a rede.

O software EficientE é um módulo de dimensionamento otimizado, que foi criado dentro do EPANET2, incorporando a metodologia proposta neste trabalho. Vale salientar que o desenvolvimento deste módulo de otimização, aproveitando as funcionalidades de simulação do escoamento de uma rede, existentes no EPANET2, só foi possível pelo fato do mesmo ser um programa de código fonte aberto.

Ao executar o programa EficientE, ele apresenta uma interface análoga a do EPANET2 (Figura 4.1), acrescentando na sua barra de menu a opção “EficientE” e na barra de ferramentas cinco botões de acesso rápido, relativos às funcionalidades do menu.

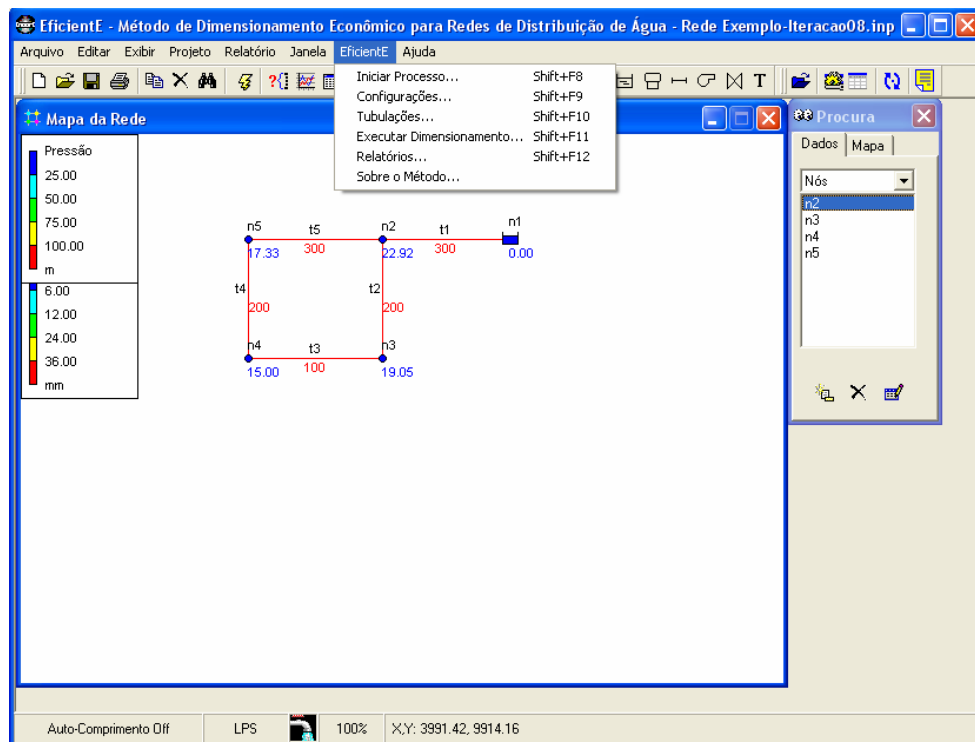


Figura 4.1 – Interface do software EficientE.

Dentro do menu “EficientE” existem seis opções, que serão descritas a seguir:

- Iniciar Processo – opção inicial que permite a seleção de uma rede no formato “inp”. Ao selecionar o arquivo, o programa cria automaticamente uma pasta com o nome da rede. Dentro dela serão criados dois arquivos: o banco de dados do projeto e a iteração inicial. Todas as iterações necessárias ao dimensionamento, também serão armazenadas nesta pasta;
- Configurações – permitem ao usuário configurar os parâmetros de entrada limitantes a serem utilizados para o projeto corrente, além da escolha do tipo da situação de contorno da rede, ou seja, cota piezométrica de cabeceira fixa ou variável;
- Tubulações – tabela configurável que tem por finalidade cadastrar todas as características físicas e de custo das tubulações disponíveis para o dimensionamento da rede;
- Executar Dimensionamento – executa as iterações para o dimensionamento otimizado, baseado na configuração inicial da rede e na metodologia proposta. Esta configuração inicial deverá estar devidamente salva como sendo um arquivo do tipo “inp”;
- Relatórios – estão disponibilizados em quatro tipos:
 - Iterações - mostra o relatório das iterações contendo as tabelas auxiliares de cálculo, apresentando ao final de cada iteração o custo atualizado da tubulação. Para facilitar a visualização da melhor escolha para a tubulação de substituição, a cada iteração, a linha onde ocorre o G_p^* é realçada;
 - Nós – apresenta uma tabela contendo as informações detalhadas dos dados referentes aos nós da rede na última iteração;
 - Trechos - apresenta uma tabela contendo as informações detalhadas dos dados referentes aos trechos da rede na última iteração;
 - Resumo – mostra o relatório sintético do dimensionamento, que apresenta de forma resumida, todas as informações fundamentais referentes aos dados de entrada, parâmetros hidráulicos, bem como o custo final para da rede.
- Sobre o Método EficientE – apresenta as informações autorais e a versão do programa.

4.1.1 Características e Funcionalidades


As principais características do software EficientE são: facilidade de uso, dimensionamento confiável e flexibilidade de configuração. A facilidade de uso deve-se à interface gráfica e intuitiva proporcionada. A confiabilidade do dimensionamento está embasada nos resultados obtidos no dimensionamento das redes divulgadas na literatura, utilizando o software desenvolvido. A flexibilidade de configuração caracteriza-se pelo fato do programa dimensionar não só redes novas, mas também ampliações de redes já existentes.

Além do exposto, o software EficientE, apresenta relatórios detalhados de todo o cálculo, bem como possibilita o acesso a todos os arquivos correspondentes às iterações geradas pelo processo otimizado de dimensionamento.

Dentre as inúmeras funcionalidades do programa, destaca-se a possibilidade de fixar trechos da tubulação, ou seja, a possibilidade de se modelar e dimensionar projetos de ampliação. Em dois exemplos integrantes da aplicação da metodologia proposta e análise dos resultados, são apresentadas duas variantes deste tipo de modelagem. A primeira, representada pela rede da cidade de Apucarana utilizada por Vieira (1980), Koide (1984) e Lopes (2002) na aplicação de seus modelos de otimização e na comparação com o projeto original elaborado pela empresa SERETE, que apresenta trechos de uma rede existente que possuem diâmetros de dimensões consideráveis e suportam a vazão da expansão proposta. Já no segundo caso a rede Paranoá utilizada por Lopes (2002) na aplicação de seu modelo de otimização e na comparação com o projeto original elaborado pela empresa ETEP Engenharia, que também apresenta trechos de rede existente, esta possui uma variação em relação à rede Apucarana, pois existem trechos cujos diâmetros são insuficientes para comportar as novas vazões. Neste caso, a opção para esses trechos, foi a implantação de uma nova tubulação em paralelo.

Uma característica que difere de outros métodos que são alvo de comparação nesta dissertação, se refere à prática usual em métodos de dimensionamento econômico, que se utilizam de critérios para divisão de trechos de forma indiscriminada, no intuito de baixar o custo, sendo na maioria das vezes estas soluções não exequíveis na prática. Por outro lado, alguns métodos além de possuírem algoritmos de cálculo muito complexos restringindo a sua aplicabilidade em redes de pequeno porte.

O método EficientE aqui proposto dimensiona a rede com trechos de tubulação única. A exceção se dá, quando a situação de contorno é do tipo cota de cabeceira fixa, pois normalmente ao convergir por esta opção, à pressão no nó mais desfavorável da rede apresenta uma folga de carga.

Ao criar um novo projeto, o projetista deve cadastrar todas as tubulações disponíveis para o dimensionamento, bem como eventualmente as tubulações pré-existentes. Em seguida deve importar um arquivo “inp” válido, configurado previamente, inicializando-o com as tubulações de bitola mínima disponibilizada. Após o cadastramento das tubulações, devem-se realizar as configurações necessárias para a situação de contorno da rede e escolher a opção “Executar Dimensionamento” no menu EficientE ou através do botão , localizado na barra de ferramentas, para que o programa encontre a solução de dimensionamento econômico otimizado para a rede em estudo. Não serão apresentadas aqui as telas de tubulações e configurações, pois elas serão repetidamente mostradas, por ocasião do dimensionamento das redes exemplos que integram o presente estudo.

No caso da situação de contorno cota piezométrica de cabeceira fixa, normalmente, haverá uma sobra de pressão no nó mais desfavorável. Nestes casos, o programa oferece ao usuário a possibilidade de transformar essa sobra de pressão em economia. Maiores explicações serão dadas nos parágrafos seguintes.

Após todas as configurações necessárias realizadas para alimentar o software EficientE, conforme formulários do programa que serão repetidamente apresentados nos exemplos deste capítulo executam-se as iterações para o cálculo do dimensionamento da rede. Após as iterações necessárias para a determinação da solução ótima, o programa apresenta uma tela de confirmação, informando ao projetista que ainda existe uma folga de pressão e que a critério do mesmo, ela pode ser convertida em economia.

Após todo o processo de dimensionamento otimizado, o programa apresenta a configuração solução para a rede na área de trabalho do programa. Ao acessar o menu “EficientE”, o projetista pode escolher a opção “Relatórios” (Figura 4.2) para gerar o relatório pretendido, dentre os quatro disponíveis. Esses relatórios contêm a análise completa dos resultados, incluindo a determinação do custo para a rede, dependendo da condição de contorno pré-estabelecida, bem como todo o histórico das iterações e valores para os dados em relação aos nós e trechos da rede.



Figura 4.2 – Formulário de seleção do tipo de relatório.

4.1.2 Linguagem de Programação

O *software* EficientE desenvolvido foi codificado utilizando a linguagem de programação *Object Pascal*, através da ferramenta Delphi 7.0. Foi utilizado o código fonte disponibilizado no endereço <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html>, referente ao simulador hidráulico EPANET2, aproveitando todas as suas funcionalidades e interface gráfica.

A escolha da utilização do simulador hidráulico EPANET2 como base para o desenvolvimento da ferramenta de dimensionamento, visando à utilização do novo algoritmo de cálculo formulado, foi consubstanciada na disponibilização gratuita do seu código fonte, na confiabilidade, robustez e na usabilidade deste simulador em nível mundial.

4.2 Aplicações e Resultados

O aplicativo desenvolvido será utilizado em cinco redes exemplos, com características distintas, visando comparar os resultados obtidos com outros métodos pesquisados, com o objetivo de validá-lo.

4.2.1 Rede Exemplo 1

A primeira aplicação da metodologia proposta será em uma rede hipotética, aqui denominada Dois Anéis, utilizada por Alperovits e Shamir (1977) e posteriormente adotada como referência por vários autores, para avaliar o desempenho de seus modelos de otimização, para o dimensionamento de redes de distribuição de água (ver Figura 4.3).

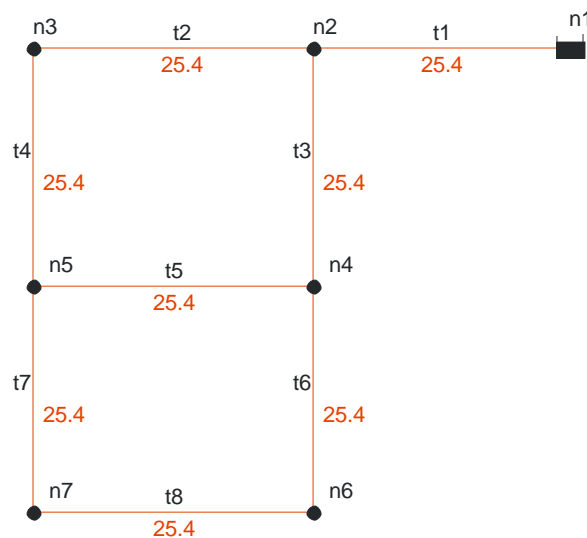


Figura 4.3 – Configuração da rede Dois Anéis.

A rede é composta por dois anéis, sete nós e oito trechos, sendo alimentada por gravidade por apenas um reservatório de nível constante. Todos os trechos possuem 1000 m de comprimento e coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* (Chw) é igual a 130. A pressão mínima requerida para a rede é de 30 mca e a cota de cabeceira é 210 m. Os dados referentes aos nós e trechos da rede Dois Anéis estão na Tabela 4.1. Os custos dos tubos,

numa unidade arbitrária, apresentados na Tabela 4.2, estão em conformidade com o exemplo original citado. Como o método EficientE trabalha sempre testando o diâmetro imediatamente superior em cada trecho, para garantir a obtenção do dimensionamento de menor custo, a configuração de partida ou inicial para a rede deverá ser realizada com o menor diâmetro disponibilizado no trabalho de Alperovits e Shamir (1977), que foi DN 25. Vale realçar que essa bitola não se enquadra nas prescrições das normas brasileiras, mas foi considerado neste trabalho, apenas para cotejar, com idênticas condições iniciais os resultados do EficientE, com os outros modelos de otimização.

Tabela 4.1 – Dados dos nós e trechos da rede Dois Anéis.

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento (m)
n1	-	210	t1	1.000
n2	27,78	150	t2	1.000
n3	27,78	160	t3	1.000
n4	33,33	155	t4	1.000
n5	75,00	150	t5	1.000
n6	91,67	165	t6	1.000
n7	55,56	160	t7	1.000
			t8	1.000

Tabela 4.2 – Custo das tubulações para a rede Dois Anéis.

Código	DN	DI	Rugosidade	Tubo	Custo da Implantação	Limitador
0	25	25.4	130	PVC	2	<input type="checkbox"/>
1	50	50.8	130	PVC	5	<input type="checkbox"/>
2	75	76.2	130	PVC	8	<input type="checkbox"/>
3	100	101.6	130	PVC	11	<input type="checkbox"/>
4	150	152.4	130	PVC	16	<input type="checkbox"/>
5	200	203.2	130	PVC	23	<input type="checkbox"/>
6	250	254	130	PVC	32	<input type="checkbox"/>
7	300	304.4	130	PVC	50	<input type="checkbox"/>
8	350	355.6	130	PVC	60	<input type="checkbox"/>
9	400	406.4	130	PVC	90	<input type="checkbox"/>
10	450	457.2	130	PVC	130	<input type="checkbox"/>
11	500	508	130	PVC	170	<input checked="" type="checkbox"/>

Como o dimensionamento envolve a variável custo, as tubulações devem, necessariamente, estar associadas ao custo da implantação. A seguir serão descritos todos os campos da Tabela 4.2, que deverão ser devidamente configurados no software EficientE.

- Código – valor único referente a cada tubulação;
- DN – diâmetro nominal da tubulação;
- DI – diâmetro interno da tubulação (valor efetivamente utilizado para efeito de cálculo);
- Rugosidade – coeficiente de rugosidade da tubulação;
- Tubo – material da tubulação;
- Custo de implantação – valor unitário do custo de implantação da tubulação;
- Limitador – campo que indica o diâmetro máximo de substituição de uma série de tubulações.

De posse de todos os dados da rede e com a tabela de tubulações definida, parte-se para as configurações relativas à situação de contorno, na qual a rede se enquadra. Para a rede Dois Anéis, a situação de contorno enquadra-se na cota piezométrica de cabeceira fixa. Para esta situação de contorno, o programa solicita que sejam configuradas a pressão mínima exigida nos nós da rede ($PM = 30$ mca) e a cota piezométrica na cabeceira ($CP = 210$ m). A Figura 4.4 mostra as configurações necessárias para a rede.

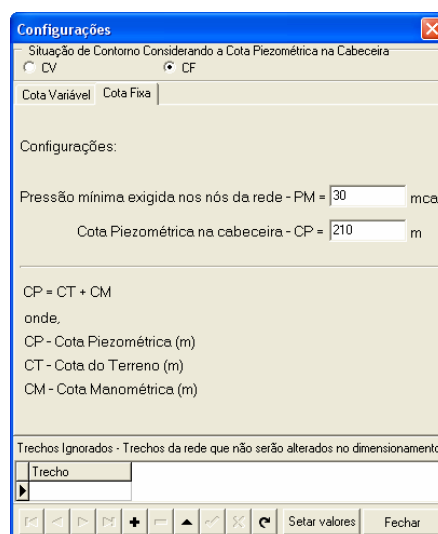




Figura 4.4 – Configurações de contorno da rede Dois Anéis.

Com o *software* EficientE devidamente configurado, para inicializar o processo basta acessar o menu “EficientE” e escolher a opção “Iniciar Processo” ou através do botão , escolhendo o arquivo do projeto previamente preparado no formato “inp”. Em seguida, para começar o processo de dimensionamento basta acessar novamente o menu “EficientE” e escolher a opção “Executar Dimensionamento” ou através do botão , localizado na barra de ferramentas.

Após a escolha da opção “Executar Dimensionamento”, o programa executa as iterações do método de otimização apresentando o resultado parcial do dimensionamento. Na tela de confirmação o projetista é informado que existe uma folga de pressão de 0,56 mca no nó mais desfavorável (n6), conforme mostra a Figura 4.5.

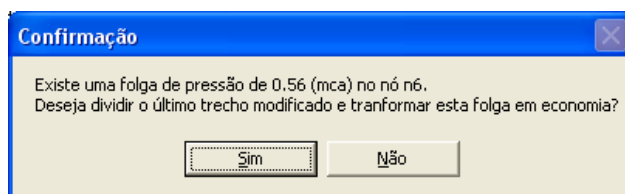


Figura 4.5 – Rede Dois Anéis, tela de confirmação (folga de pressão).

Caso não seja desejável o aproveitamento desta folga de pressão, a rede já estará dimensionada com os seus diâmetros finais e o programa apresenta uma tela de informação (ver Figura 4.6). Como o método EficientE se propõe a obter o menor custo possível, por padrão, todas as folgas existentes nas redes exemplos aqui dimensionadas serão transformadas em economia. Após a confirmação e aceite, o método divide o último trecho modificado (t2) em dois sub-trechos (t2a e t2b), criando um nó intermediário (n2a), conforme Figura 4.7. Após este procedimento o programa também apresenta a tela de informação da Figura 4.6.

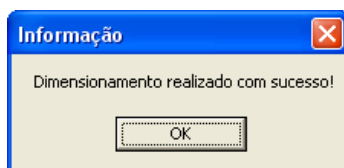


Figura 4.6 – Tela de informação da realização do dimensionamento.

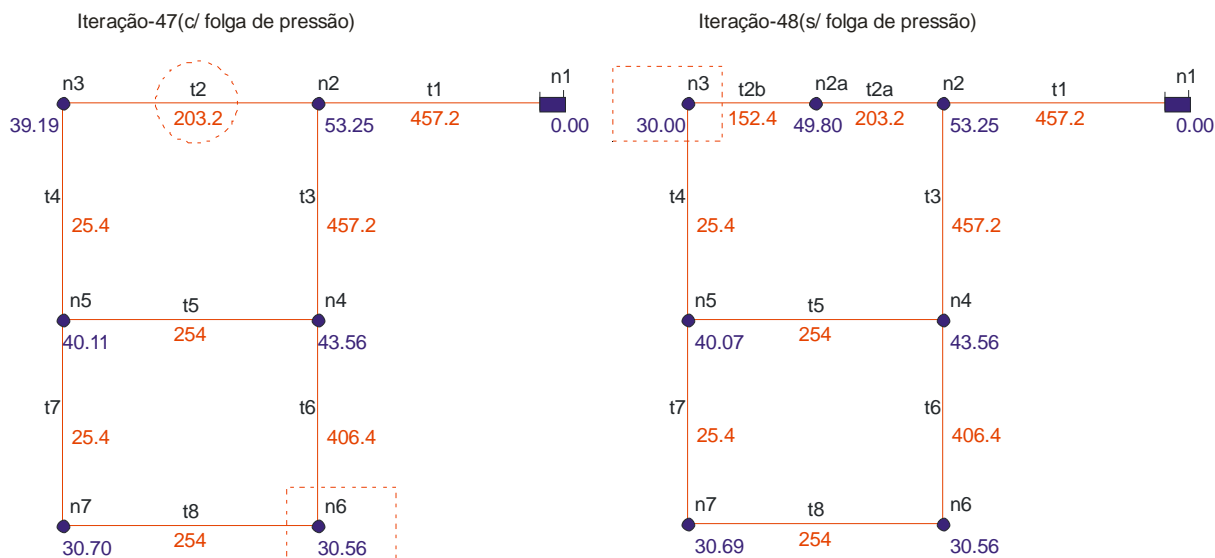



Figura 4.7 – Rede Dois Anéis dimensionada com e sem folga de pressão.

Com o dimensionamento concluído, basta acessar o menu “Eficiente” e escolher a opção “Relatórios” ou clicar o botão , para geração dos quatro tipos de relatórios disponíveis. O primeiro apresenta as tabelas auxiliares utilizadas no processo iterativo de dimensionamento otimizado. O segundo apresenta os dados nos nós da rede. O terceiro apresenta os dados nos trechos da rede e o quarto apresenta um resumo detalhado do dimensionamento como um todo.

As tabelas auxiliares referentes às três últimas iterações estão nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5.

A Tabela 4.3, mostra a iteração 46. Esta iteração apresenta o último Gradiente de Pressão Ótimo (Gp^*) encontrado, antes do estabelecimento da condição de parada ocorrida na iteração 47 (Tabela 4.4). A condição de parada foi estabelecida quando a pressão no nó mais desfavorável da rede ($n6 = 30,56$ mca) – ver Figura 4.7 - ultrapassou a pressão mínima exigida para rede que foi de 30 mca. Portanto, o último trecho efetivamente modificado (t2) ocorreu na iteração 46, onde ocorreu o último Gp^* válido. Nesta iteração o diâmetro do (t2) mudou do DN 150 para o DN 200 (Tabela 4.3). A Tabela 4.5, apresenta a iteração 48, contendo as configurações finais para a rede, após a divisão do trecho (t2).

Tabela 4.3 - Iteração-46 para o dimensionamento da rede Dois Anéis.

Iteração: 46 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 210,00 **Nó mais desfavorável:** n3

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Cp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	450	500	1.000,00	130,00	130.000,00	170,00	170.000,00	40.000,00	27,08	29,79	2,71	14.754,1588
t2	150	200	1.000,00	16,00	16.000,00	23,00	23.000,00	7.000,00	27,08	39,19	12,11	577,8343
t3	450	500	1.000,00	130,00	130.000,00	170,00	170.000,00	40.000,00	27,08	27,18	0,08	488.400,4884
t4	25	50	1.000,00	2,00	2.000,00	5,00	5.000,00	3.000,00	27,08	27,59	0,52	5.821,8513
t5	250	300	1.000,00	32,00	32.000,00	50,00	50.000,00	18.000,00	27,08	27,23	0,15	119.920,0533
t6	400	450	1.000,00	90,00	90.000,00	130,00	130.000,00	40.000,00	27,08	27,08	0,00	200.000,0000
t7	25	50	1.000,00	2,00	2.000,00	5,00	5.000,00	3.000,00	27,08	27,12	0,04	77.519,3798
t8	250	300	1.000,00	32,00	32.000,00	50,00	50.000,00	18.000,00	27,08	27,08	0,00	30.000,0000
Custo Total Atual (\$)				434.000,00								

Tabela 4.4 - Iteração-47 para o dimensionamento da rede Dois Anéis.

Iteração: 47 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 210,00 **Nó mais desfavorável:** n6

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Cp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	450	500	1.000,00	130,00	130.000,00	170,00	170.000,00	40.000,00	30,56	33,28	2,71	14.754,1588
t2	200	250	1.000,00	23,00	23.000,00	32,00	32.000,00	9.000,00	30,56	30,57	0,00	90.000,0000
t3	450	500	1.000,00	130,00	130.000,00	170,00	170.000,00	40.000,00	30,56	32,44	1,88	21.286,7862
t4	25	50	1.000,00	2,00	2.000,00	5,00	5.000,00	3.000,00	30,56	30,59	0,03	102.040,8163
t5	250	300	1.000,00	32,00	32.000,00	50,00	50.000,00	18.000,00	30,56	30,57	0,00	15.000,0000
t6	400	450	1.000,00	90,00	90.000,00	130,00	130.000,00	40.000,00	30,56	31,87	1,31	30.602,0962
t7	25	50	1.000,00	2,00	2.000,00	5,00	5.000,00	3.000,00	30,56	30,56	0,00	280.869,5652
t8	250	300	1.000,00	32,00	32.000,00	50,00	50.000,00	18.000,00	30,56	30,56	0,00	3.000,0000
Custo Total Atual (\$)				441.000,00								

Tabela 4.5 - Iteração-48 para o dimensionamento da rede Dois Anéis.

Iteração: 48 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 210,00 **Nó mais desfavorável:** n3

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Cp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	450	450	1.000,00	130,00	130.000,00	130,00	130.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t2a	200	200	246,43	23,00	5.667,89	23,00	5.667,89	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t2b	150	150	753,57	16,00	12.057,12	16,00	12.057,12	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t3	450	450	1.000,00	130,00	130.000,00	130,00	130.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t4	25	25	1.000,00	2,00	2.000,00	2,00	2.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t5	250	250	1.000,00	32,00	32.000,00	32,00	32.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t6	400	400	1.000,00	90,00	90.000,00	90,00	90.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t7	25	25	1.000,00	2,00	2.000,00	2,00	2.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
t8	250	250	1.000,00	32,00	32.000,00	32,00	32.000,00	0,00	30,00	30,00	0,00	0,0000
Custo Total Atual (\$)				435.725,01								

Os dados referentes aos nós e trechos da rede, após o dimensionamento, estão relacionados nas Tabelas 4.6 e 4.7, respectivamente. O custo otimizado do dimensionamento foi de \$ 435.725,01, conforme somatório apresentado na última iteração (ver Tabela 4.5).

Tabela 4.6 – Dados dos nós da rede Dois Anéis.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo-Base (l/s)	Pressão (mca)	Piezométrica Disponível (mca)
n2	150,00	27,78	53,25	203,25
n2a	152,46	0,00	49,80	202,26
n3	160,00	27,78	30,00	190,00
n4	155,00	33,33	43,56	198,56
n5	150,00	75,00	40,07	190,07
n6	165,00	91,67	30,56	195,56
n7	160,00	55,56	30,69	190,69

Tabela 4.7 – Dados nos trechos da rede Dois Anéis.

Trecho	Comprimento (m)	Vazão (l/s)	DI	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)
t1	1.000,00	311,12	457,2	1,8951	6,75
t2a	246,43	27,8097	203,2	0,8575	0,99
t2b	753,57	27,8097	152,4	1,5245	12,26
t3	1.000,00	255,5303	457,2	1,5565	4,69
t4	1.000,00	0,0297	25,4	0,0587	0,07
t5	1.000,00	74,992	254	1,48	8,48
t6	1.000,00	147,2083	406,4	1,1348	3,00
t7	1.000,00	0,0217	25,4	0,0429	0,62
t8	1.000,00	55,5383	254	1,0961	4,86

O último relatório “Resumo” apresenta de forma sintética, os principais parâmetros de entrada (pressão mínima exigida, cota piezométrica na cabeceira, quantidade de nós e trechos da rede), os valores e os nós onde ocorreram as pressões máxima e mínima na rede, os valores e os trechos onde ocorreram às velocidades máxima e mínima na rede, a data do processamento, o número de iterações necessárias para o processo de dimensionamento otimizado, tempo de processamento, identificação do sistema operacional utilizado e do hardware (processador e quantidade de memória RAM) e finalmente o custo total, referente às tubulações do sistema (Figura 4.8).

EficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água			
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Fixa			
Rede de Dois Anéis			
Dados de Entrada		Sobre o Processamento	
Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca)	30,00	Data:	05/03/2007
Cota Piezométrica na cabeceira (m)	210,00	Número de iterações.....	048
Quantidade de nós da rede (unid)	007	Tempo das iterações.....	00:00:59
Quantidade de trechos da rede (unid)	009	Tempo div. do trecho.....	00:00:04
		Total.....	00:01:03
Faixa de Pressões na Rede		Sistema Operacional e Hardware	
Mínima (mca) n3	30,00	Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)	
Máxima (mca) n2	53,25	AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+	
		Memória RAM: 1024 Mb	
Faixa de Velocidades na Rede			
Mínima (m/s) t7	0,04		
Máxima (m/s) t1	1,90		
<hr/>			
Componente	Custo em \$		
Tubulações	435.725,01		
\$ = Unidades Monetárias			

Figura 4.8 – Relatório Resumo para a rede de dois anéis.

O dimensionamento mostrou que se configurando as tubulações iniciais com diâmetros DN 25, a rede foi calculada da forma mais econômica possível para este método. Vale salientar, que a critério do projetista, os diâmetros iniciais podem ser livremente arbitrados, criando outras variações de cálculo que podem não ser as mais econômicas, mas certamente serão as mais factíveis.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados obtidos por outras metodologias e estudos em relação à mesma rede. Faz-se necessário destacar que a grande maioria dos métodos apresentados, a exceção de Alperovits e Shamir (1997) utilizou, nos seus procedimentos de cálculo, o recurso da divisão indiscriminada de trechos em dois sub-trechos. Outro ponto a destacar deve-se à complexidade na formulação de determinados modelos que demandam tempos elevados de processamento computacional, pois estabelecem uma grande quantidade de variáveis e restrições.

Comparando o valor obtido para a rede utilizando o método proposto, em relação ao maior custo encontrado por (Alperovits e Shamir = \$ 479.525), a redução percentual foi de 9,13%. Já em relação ao menor custo obtido por (Kessler and Shamir = \$ 417.500), o acréscimo foi de 4,37%.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos para o custo por vários estudos para a rede Dois Anéis.

Estudo	Custo \$
Alperovits e Shamir (1977)	479.525
Costa et al. (2001)	437.552
Otimização Global - Lopes (2002)	436.928
Sherali et al. (1998)	436.915
Sherali e Smith (1997)	436.684
EfficientE	435.725
Gouter et al. (1986)	435.015
Savic e Walters - GA (1997)	419.000
Kessler and Shamir (1989)	417.500

\$ = Unidades Monetárias

4.2.2 Rede Exemplo 2

Esta segunda rede exemplo refere-se ao dimensionamento de parte do sistema de distribuição de água do Bairro do Bessa da cidade de João Pessoa, Estado da Paraíba. A rede projetada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA, em 1982, foi utilizada por Leal (1995), na aplicação dos modelos *Hardy-Cross* - WADISO (Walski et al. 1990) e o modelo GRANADOS, utilizada por Formiga (1999), na aplicação de um modelo de Programação Não Linear - PNL e também por Lopes (2002), na aplicação do modelo de Otimização Global.

O objetivo do dimensionamento deste anel, utilizando o método Eficiente de otimização, é avaliar o desempenho do modelo proposto, em relação aos outros modelos anteriormente citados.

A rede é composta por um único anel, constituído por 7 trechos e 7 nós, sendo o nó (n1) o ponto de alimentação da rede (reservatório), conforme Figura 4.9.

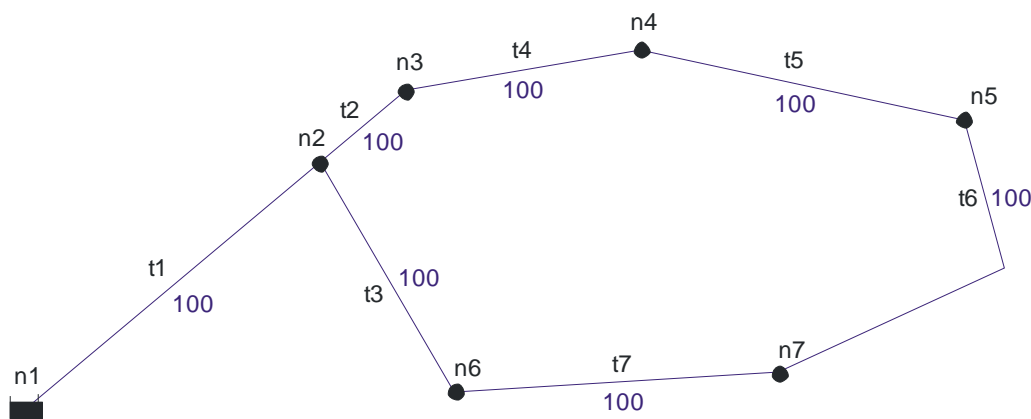


Figura 4.9 - Configuração da rede de parte do Bairro do Bessa.

Os dados deste exemplo foram extraídos do projeto original do dimensionamento realizado pela CAGEPA (apud LOPES, 2002). O material da rede é PVC para bitolas DN 100 até DN 250, com coeficiente de *Hazen-Williams* de 145, e de ferro fundido para bitolas DN 300 até DN 600, com ($Chw = 130$) - ver Tabela 4.9. A cota piezométrica no reservatório é fixa, 54 m, e a pressão mínima admitida nos nós da rede, limitada a 25 mca. O elevado limite mínimo da pressão exigida deve-se ao fato de que este anel alimentará sub-redes conectadas

aos seus nós. Os demais dados referentes aos nós e trechos da rede, encontram-se na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Custo das tubulações para a rede do Bairro do Bessa.

Codigo	DN	DI	Rugosidade	Tubo	Custo da Implantação	Limitador
0	100	100	145	PVC	1629	<input type="checkbox"/>
1	150	150	145	PVC	4054	<input type="checkbox"/>
2	200	200	145	PVC	5769	<input type="checkbox"/>
3	250	250	145	PVC	7718	<input type="checkbox"/>
4	300	300	130	FoFo	9237	<input type="checkbox"/>
5	350	350	130	FoFo	11012	<input type="checkbox"/>
6	400	400	130	FoFo	12397	<input type="checkbox"/>
7	450	450	130	FoFo	15501	<input type="checkbox"/>
8	500	500	130	FoFo	17696	<input type="checkbox"/>
9	600	600	130	FoFo	23132	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabela 4.10 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede do Bairro do Bessa.

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento (m)
n1	-	54,0	t1	2.540,00
n2	0,00	30,0	t2	350,00
n3	43,44	30,0	t3	1.020,00
n4	40,29	29,0	t4	1.140,00
n5	208,60	29,5	t5	1.430,00
n6	47,78	29,5	t6	1.710,00
n7	80,32	29,5	t7	1.430,00

Após o cadastramento da rede, utilizando em todos os seus trechos a tubulação de menor diâmetro disponibilizada, no caso DN 100, e efetuadas todas as configurações dos nós, inicia-se o processo de dimensionamento da rede, efetuando-se o preenchimento da tabela de tubulações (ver Tabela 4.9). Em seguida, escolhe-se, no formulário “Configurações”, a situação de contorno adequada à rede, no caso pela cota piezométrica de cabeceira fixa, conforme Figura 4.10. Finalmente, executa-se o processo de dimensionamento iterativo de otimização para a rede.

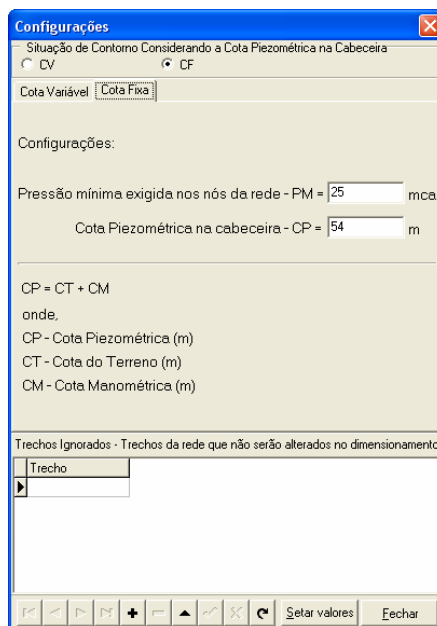


Figura 4.10 – Configurações de contorno da rede do Bairro do Bessa (Exemplo 2).

Após o dimensionamento atingir a condição de parada na iteração 40, houve uma folga de pressão de 1,26 mca no nó mais desfavorável da rede (n5), conforme apresentado na Figura 4.11.

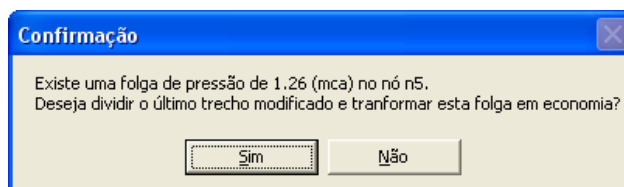


Figura 4.11 – Rede do Bairro do Bessa, tela de confirmação (folga de pressão).

Como o objetivo é conseguir o máximo de economia, após a confirmação e execução do procedimento de cálculo de otimização, para esta etapa, a rede sofreu uma reconfiguração, onde o último trecho modificado (t1) que ocorreu na iteração 30, foi dividido em dois sub-trechos (t1a) e (t1b), através da criação do nó intermediário (n1a). A Figura 4.12, apresenta a situação da rede antes e depois da sua reconfiguração.

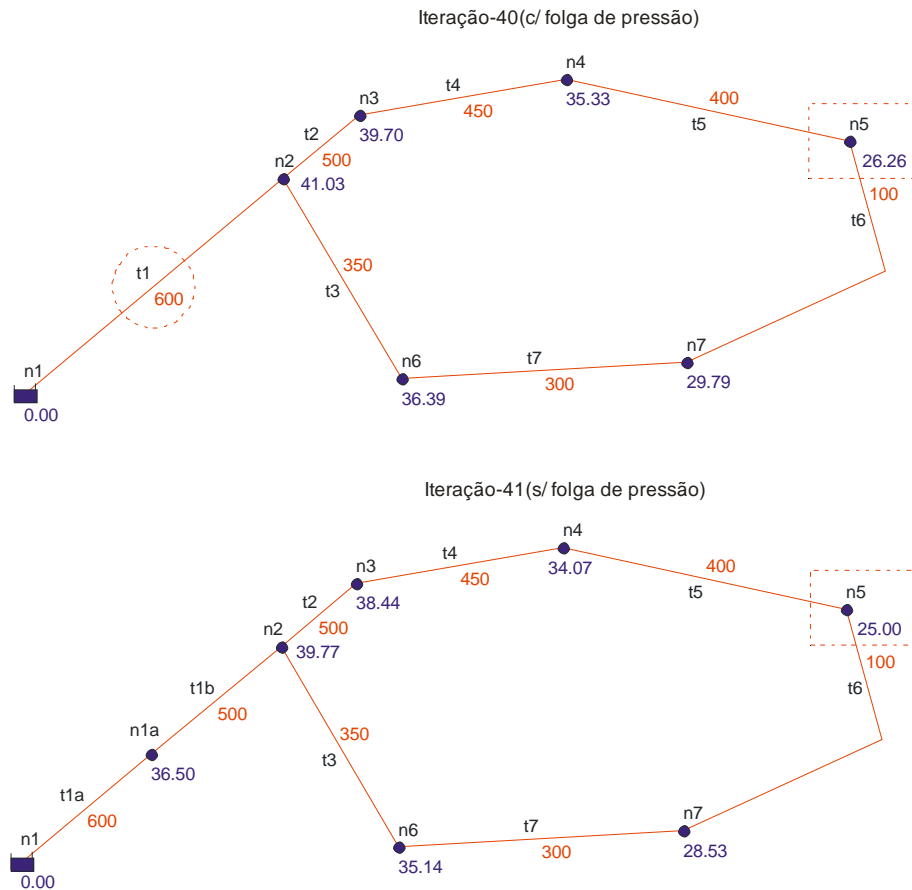


Figura 4.12 – Rede do Bairro do Bessa dimensionada com e sem folga de pressão.

Satisfeitas as condições limites para o dimensionamento, faz-se necessário explicar em detalhes como ocorreu a convergência do dimensionamento, bem como a definição do custo final para a rede. Na iteração 39, apresentada na Tabela 4.11, ocorreu a última substituição referente às tubulações, ou seja, no trecho (t1) onde ocorreu o G_p^* , que passou do DN 500 para o DN 600. Com esta substituição efetivada na iteração 40 (Tabela 4.12), foi atingida a condição de parada, pois a pressão no nó mais desfavorável da rede (n5) superou a pressão mínima estabelecida (25 mca) para os nós da rede em 1,26 mca. No caso da não aceitação da otimização da folga em questão, o custo para a rede seria representado pelo Custo Total Atual totalizado na iteração 40: \$ 127.574.470,00 (ver Tabela 4.12). Como se optou em aceitar o procedimento de otimização para transformação da folga de pressão em economia, o custo para rede é representado pelo Custo Total Atual totalizado na iteração 41: \$ 126.049.943,80 (ver Tabela 4.13). Portanto, a diminuição no custo em unidades monetárias, após a otimização foi de: \$ 1.524.526,20 que equivale a uma redução percentual de 1,21%.

Tabela 4.11 – Iteração-39 para o dimensionamento da rede do Bairro do Bessa.

Iteração: 39 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 54,00 **Nó mais desfavorável:** n5

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	500	600	2.540,00	17.696,00	44.947.840,00	23.132,00	58.755.280,00	13.807.440,00	14,86	26,26	11,40	1.210.828,4444
t2	500	600	350,00	17.696,00	6.193.600,00	23.132,00	8.096.200,00	1.902.600,00	14,86	15,60	0,74	2.564.496,5629
t3	350	400	1.020,00	11.012,00	11.232.240,00	12.397,00	12.644.940,00	1.412.700,00	14,86	14,98	0,12	11.383.561,6438
t4	450	500	1.140,00	15.501,00	17.671.140,00	17.696,00	20.173.440,00	2.502.300,00	14,86	16,89	2,04	1.229.510,6132
t5	400	450	1.430,00	12.397,00	17.727.710,00	15.501,00	22.166.430,00	4.438.720,00	14,86	18,39	3,54	1.255.578,1851
t6	100	150	1.710,00	1.629,00	2.785.590,00	4.054,00	6.932.340,00	4.146.750,00	14,86	15,36	0,51	8.166.108,7042
t7	300	350	1.430,00	9.237,00	13.208.910,00	11.012,00	15.747.160,00	2.538.250,00	14,86	15,03	0,17	14.697.462,2293

Custo Total Atual (\$) 113.767.030,00

Tabela 4.12 - Iteração-40 para o dimensionamento da rede do Bairro do Bessa.

Iteração: 40 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 54,00 **Nó mais desfavorável:** n5

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	600	600	2.540,00	23.132,00	58.755.280,00	23.132,00	58.755.280,00	0,00	26,26	26,26	0,00	0,0000
t2	500	600	350,00	17.696,00	6.193.600,00	23.132,00	8.096.200,00	1.902.600,00	26,26	27,00	0,74	2.564.496,5629
t3	350	400	1.020,00	11.012,00	11.232.240,00	12.397,00	12.644.940,00	1.412.700,00	26,26	26,38	0,12	11.383.561,6438
t4	450	500	1.140,00	15.501,00	17.671.140,00	17.696,00	20.173.440,00	2.502.300,00	26,26	28,23	2,04	1.229.510,6132
t5	400	450	1.430,00	12.397,00	17.727.710,00	15.501,00	22.166.430,00	4.438.720,00	26,26	29,79	3,54	1.255.578,1851
t6	100	150	1.710,00	1.629,00	2.785.590,00	4.054,00	6.932.340,00	4.146.750,00	26,26	26,77	0,51	8.166.108,7042
t7	300	350	1.430,00	9.237,00	13.208.910,00	11.012,00	15.747.160,00	2.538.250,00	26,26	26,43	0,17	14.697.462,2293

Custo Total Atual (\$) 127.674.470,00

Tabela 4.13 - Iteração-41 para o dimensionamento da rede do Bairro do Bessa.

Iteração: 41 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 54,00 **Nó mais desfavorável:** n5

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1a	600	600	2.259,55	23.132,00	62.267.910,60	23.132,00	62.267.910,60	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t1b	500	500	280,45	17.696,00	4.962.843,20	17.696,00	4.962.843,20	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t2	500	500	350,00	17.696,00	6.193.600,00	17.696,00	6.193.600,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t3	350	350	1.020,00	11.012,00	11.232.240,00	11.012,00	11.232.240,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t4	450	450	1.140,00	15.501,00	17.671.140,00	15.501,00	17.671.140,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t5	400	400	1.430,00	12.397,00	17.727.710,00	12.397,00	17.727.710,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t6	100	100	1.710,00	1.629,00	2.785.590,00	1.629,00	2.785.590,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t7	300	300	1.430,00	9.237,00	13.208.910,00	9.237,00	13.208.910,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000

Custo Total Atual (\$) 126.049.943,80

Os dados referentes aos nós e trechos da rede, após o dimensionamento, relativos à configuração final ocorrida na iteração 41, estão relacionados nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14 - Dados nos nós da rede do Bairro do Bessa.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo-Base (l/s)	Pressão (mca)	Piezométrica Disponível (mca)
n1	10,41	0,00	36,50	46,91
n2	5,00	0,00	39,77	44,77
n3	5,00	43,44	38,44	43,44
n4	4,00	40,29	34,07	38,07
n5	4,50	208,60	25,00	29,50
n6	4,50	47,78	35,14	39,64
n7	4,50	80,32	28,53	33,03

Tabela 4.15 - Dados nos trechos da rede do Bairro do Bessa.

Trecho	Comprimento (m)	Vazão (l/s)	DI	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)
t1a	2.259,55	420,43	600	1,487	7,09
t1b	280,45	420,43	500	2,1412	2,14
t2	350,00	288,9712	500	1,4717	1,33
t3	1.020,00	131,4588	350	1,3663	5,13
t4	1.140,00	245,5312	450	1,5438	5,37
t5	1.430,00	205,2411	400	1,6332	8,57
t6	1.710,00	-3,3588	100	0,4277	3,53
t7	1.430,00	83,6788	300	1,1838	6,61

A Figura 4.13 apresenta o relatório com o resumo dos principais dados de entrada e de saída do dimensionamento otimizado.

EfficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água	
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Fixa	
Bairro do Bessa	
Dados de Entrada	Sobre o Processamento
Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca) 25,00	Data: 05/03/2007
Cota Piezométrica na cabeceira (m) 54,00	Número de iterações..... 041
Quantidade de nós da rede (unid) 007	Tempo das iterações..... 00:00:48
Quantidade de trechos da rede (unid) 008	Tempo div. do trecho..... 00:00:03
	Total..... 00:00:51
Faixa de Pressões na Rede	Sistema Operacional e Hardware
Mínima (mca) n5 25,00	Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)
Máxima (mca) n2 39,77	AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+
	Memória RAM: 1024 Mb
Faixa de Velocidades na Rede	
Mínima (m/s) t6 0,43	
Máxima (m/s) t1b 2,14	
<hr/>	
Componente	Custo em \$
Tubulações	126.049.943,80
\$ = Unidades Monetárias	

Figura 4.13 – Relatório Resumo para a rede do Bairro do Bessa.

Comparando os resultados obtidos com a utilização do método de dimensionamento otimizado EficientE, em relação a outros métodos que dimensionaram a mesma rede, considerando fatores econômicos, conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado satisfatório em termos econômicos ultrapassando o menor valor \$ 124.324.826,00 obtido por Lopes (2002) em 1,39%, além de ter apresentado valores limites para pressão (máx. n2 = 39,77 mca) e velocidades (mín. t6 = 0,43 m/s e máx. t1b = 2,15 m/s) compatíveis com as normas vigentes. As Tabelas 4.16, 4.17 e 4.18, mostram as comparações dos valores das pressões, diâmetros utilizados nos trechos e valores de custo.

Faz-se necessário registrar, que os métodos que obtiveram resultados melhores, em termos econômicos, em relação ao método proposto, PNL e GLOBAL, utilizaram o artifício da divisão de trechos duas vezes, enquanto que o método EficientE só utilizou este recurso uma única vez, para regulação da pressão mínima no nó mais desfavorável, para que ele atingisse exatamente a pressão mínima estabelecida para a rede.

Tabela 4.16 – Comparativo com outros estudos para a rede do Bairro do Bessa – pressões.

Nó	Pressão (mca)				
	WADISO	GRANADOS	PNL	GLOBAL	EficientE
n2	41,60	40,80	41,00	40,42	39,77
n3	40,50	38,20	38,80	38,80	38,43
n4	34,30	33,20	34,30	34,30	34,07
n5	27,50	27,20	25,00	25,00	25,00
n6	38,60	36,90	36,70	35,80	35,13
n7	28,50	33,40	25,00	25,00	28,53

Tabela 4.17 – Comparativo com outros estudos para a rede do Bairro do Bessa – diâmetros.

Trecho	WADISO		GRANADOS		PNL		GLOBAL		EficientE	
	DN	L(m)	DN	L(m)	DN	L (m)	DN	L(m)	DN	L (m)
t1	600	2.540	500	180	600	2.540	500	188	500	280,45
			600	2.360			600	2.352	600	2.259,55
t2	400	350	400	350	450	331	500	350	500	350
					500	19				
t3	400	1.020	400	1.020	350	1.020	350	1.020	350	1.020
t4	400	1.140	400	1.140	450	1.140	450	1.140	450	1.140
t5	400	1.430	400	1.430	400	1.430	400	1.430	400	1.430
t6	300	1.710	250	1.710	100	1.710	100	1.710	100	1.710
t7	300	1.430	400	1.430	250	1.316	250	1.110	300	1.430
					300	114				

Tabela 4.18 – Resultados obtidos por outros estudos para rede do Bairro do Bessa – custos.

Estudo	Custo \$
Projeto original (CAGEPA, 1982)	174.481.640,00
Hard-Cross – WADISO (LEAL, 1995)	138.458.323,00
GRANADOS (LEAL, 1995)	137.562.788,00
EfficientE	126.046.954,00
Programação não linear (FORMIGA, 1999)	124.873.088,00
Otimização global (LOPES, 2002)	124.324.826,00

\$ = Unidades Monetárias

4.2.3 Rede Exemplo 3

Esta terceira rede exemplo refere-se ao dimensionamento da rede da cidade de Apucarana (Figura 4.14), Estado do Paraná. Trata-se de uma expansão da rede existente. Neste caso, todas as tubulações existentes, serão aproveitadas e dará vazão integral à nova realidade da rede após o dimensionamento de sua expansão.

A rede foi utilizada por Vieira (1980) e Koide (1984), na aplicação de seus modelos de otimização e na comparação com o projeto original elaborado pela empresa SERETE. A rede existente é composta por tubos de ferro fundido com coeficiente de rugosidade $Chw = 90$ e apenas um reservatório. Já a rede de expansão será formada por tubos de PVC com coeficiente de rugosidade $Chw = 140$. Os diâmetros existentes estão relacionados na Tabela 4.19 e os disponíveis para a ampliação e os seus respectivos custos de implantação, estão na Tabela 4.20. Os tubos da rede existente possuem custo zero, pois não produzirão impacto financeiro no custo total da ampliação da rede.

A cota piezométrica do reservatório é fixada em 888 metros e as cargas hidráulicas nos nós limitadas entre 15 e 50 mca. A rede existente é composta por um anel, constituído pelos nós n01, n02, n03, n04 e n05, e vários trechos ramificados, totalizando 12 trechos e 12 nós. Na nova configuração, a rede passa a ter 9 anéis, 33 trechos e 25 nós, conforme a Figura 4.14. Os demais dados necessários para o dimensionamento, referentes aos nós e trechos da rede, estão apresentados na Tabela 4.21.

Após todos os procedimentos de configuração da rede (que já foram amplamente explicados nos exemplos anteriores), incluindo a utilização inicial da tubulação mínima disponibilizada DN 85, neste caso, nos novos trechos, e da correta escolha da situação de contorno (cota piezométrica de cabeceira fixa), procede-se às configurações conforme apresentado na Figura 4.15. A diferença deste Exemplo 3 em relação aos outros dois já apresentados neste capítulo, em termos de configuração, deve-se ao fato de que, nesta modelagem, os trechos existentes deverão ser configurados como sendo ignorados pelo programa, para que os mesmos não sejam alterados durante o processo iterativo de dimensionamento otimizado.

Legenda:

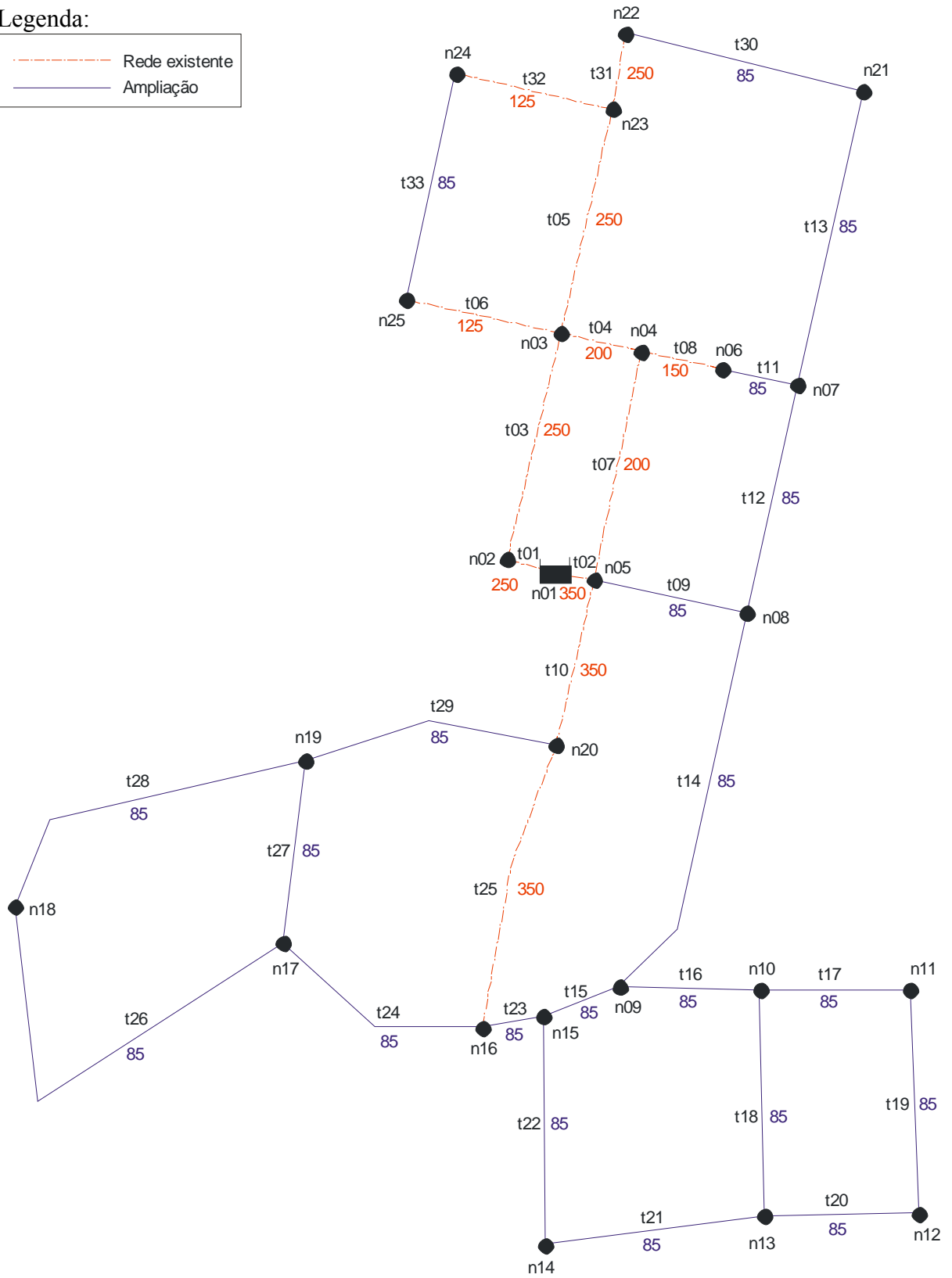
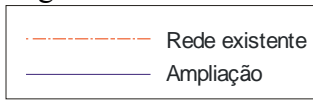


Figura 4.14 – Configuração da rede Apucarana.

Tabela 4.19 – Tubulação existente da rede Apucarana.

Trecho	Rugosidade (Chw)	Tipo	Diâmetro (mm)
t01(01-02)	90	Ferro	250
t02(01-05)	90	Ferro	350
t03(02-03)	90	Ferro	250
t04(03-04)	90	Ferro	200
t05(03-23)	90	Ferro	250
t06(03-25)	90	Ferro	125
t07(04-05)	90	Ferro	200
t08(04-06)	90	Ferro	150
t10(05-20)	90	Ferro	350
t25(16-20)	90	Ferro	350
t31(22-23)	90	Ferro	250
t32(23-24)	90	Ferro	125

Tabela 4.20 – Custo das tubulações para a rede Apucarana.

Codigo	DN	DI	Rugosidade	Tubo	Custo da Implantação	Limitador
1	85	85	140	PVC	116.18	<input type="checkbox"/>
2	110	110	140	PVC	191.99	<input type="checkbox"/>
3	140	140	140	PVC	369.3	<input type="checkbox"/>
4	160	160	140	PVC	478.09	<input checked="" type="checkbox"/>
5	125	125	90	FERRO	0	<input type="checkbox"/>
6	150	150	90	FERRO	0	<input type="checkbox"/>
7	200	200	90	FERRO	0	<input type="checkbox"/>
8	250	250	90	FERRO	0	<input type="checkbox"/>
9	350	350	90	FERRO	0	<input type="checkbox"/>
10	400	400	90	FERRO	0	<input checked="" type="checkbox"/>

Copiar os valores da coluna DN para DI

Fechar

Tabela 4.21 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede Apucarana.

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento(m)
n01	-	888,00	t01(01-02)	70,00
n02	3,00	860,00	t02(01-05)	65,00
n03	8,00	859,00	t03(02-03)	360,00
n04	0,00	862,90	t04(03-04)	130,00
n05	0,00	864,10	t05(03-23)	358,00
n06	0,00	862,20	t06(03-25)	246,00
n07	15,00	860,30	t07(04-05)	360,00
n08	7,00	856,00	t08(04-06)	125,00
n09	4,00	860,50	t09 (05-08)	240,00
n10	5,00	859,00	t10(05-20)	263,00
n11	3,00	852,00	t11(06-07)	120,00
n12	3,00	848,00	t12(07-08)	364,00
n13	6,00	849,00	t13(07-21)	468,00
n14	3,00	838,00	t14(08-09)	509,00
n15	0,00	861,00	t15 (09-15)	122,00
n16	6,00	860,80	t16(09-10)	216,00
n17	6,00	848,50	t17(10-11)	233,00
n18	10,00	855,80	t18(10-13)	348,00
n19	8,00	861,50	t19(11-12)	348,00
n20	5,00	859,50	t20(12-13)	235,00
n21	14,00	852,00	t21(13-14)	338,00
n22	0,00	852,00	t22(14-15)	351,00
n23	9,00	855,00	t23(16-15)	93,00
n24	14,00	851,00	t24(16-17)	358,00
n25	11,00	854,60	t25(16-20)	454,00
n26			t26(17-18)	752,00
n27			t27(17-19)	282,00
n28			t28(18-19)	543,00
n29			t29(19-20)	402,00
n30			t30(21-22)	374,00
n31			t31(22-23)	116,00
n32			t32(23-24)	248,00
n33			t33(24-25)	354,00

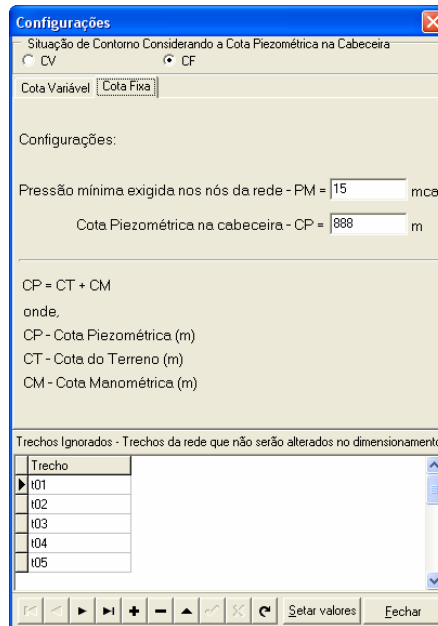


Figura 4.15 – Configurações de contorno da rede Apucarana.

Após a execução do processo de dimensionamento otimizado, através do programa EficientE, houve uma folga de pressão de 1,34 mca no nó mais desfavorável da rede “n10” (ver Figura 4.16).

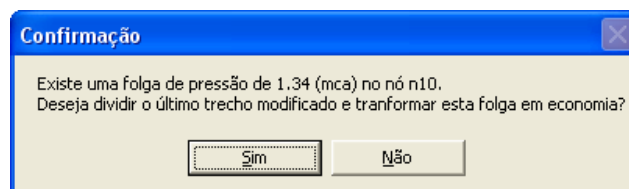


Figura 4.16 – Rede Apucarana, tela de confirmação (folga de pressão).

Como o padrão utilizado neste estudo é obter o menor custo possível, optou-se por transformar esta pressão em economia, dividindo-se o último trecho modificado (t11), na iteração 6, em dois novos sub-trechos (t11a) e (t11b). A Figura 4.17 apresenta as configurações da rede com folga de pressão no nó (n10) e a Figura 4.18 apresenta as configurações da rede sem folga de pressão, ou seja, o nó mais desfavorável da rede que agora é o (n7) atinge exatamente o valor mínimo da pressão estabelecida para a rede que foi de 15 mca.

Legenda:

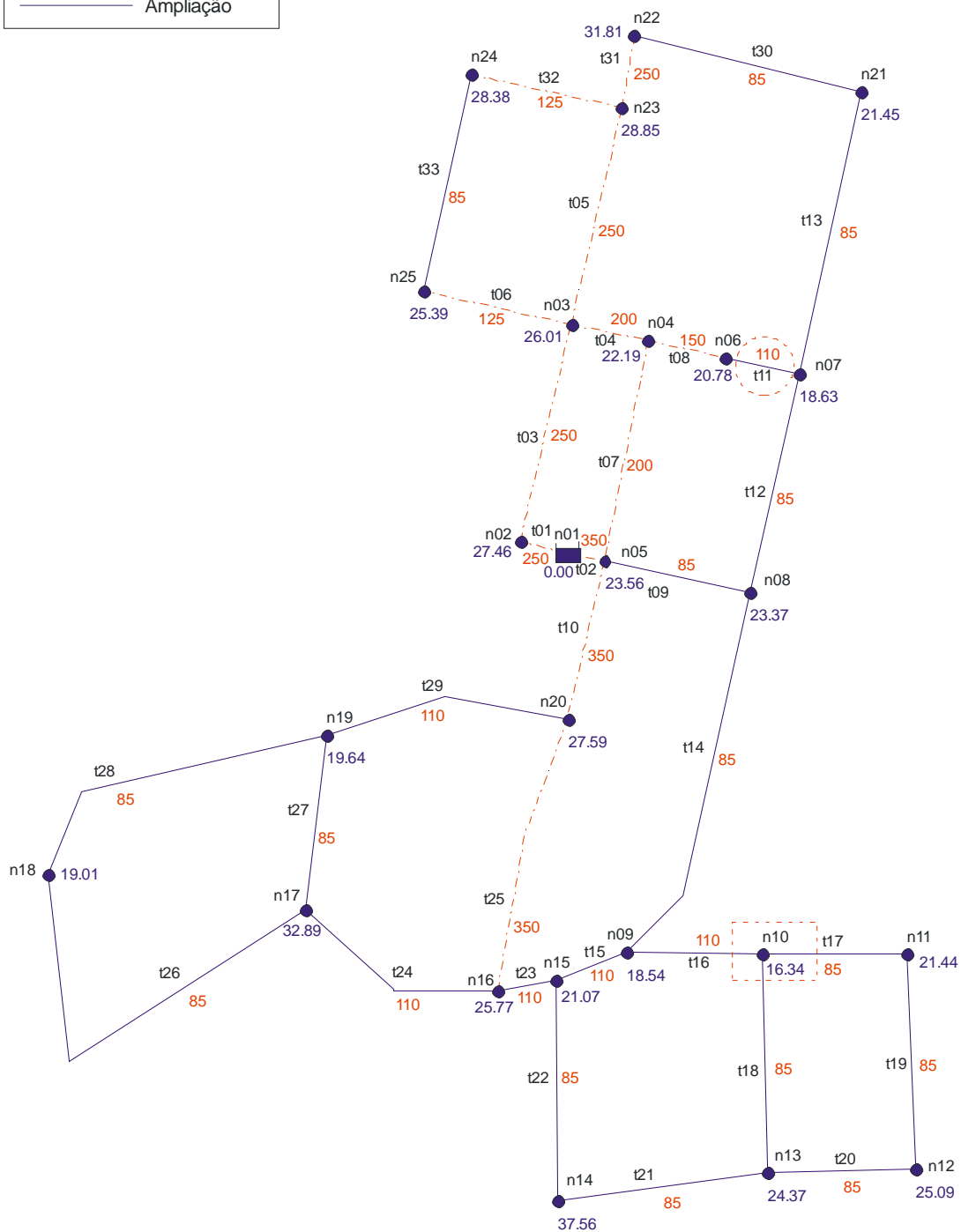


Figura 4.17 – Rede Apucarana dimensionada com folga de pressão.

Legenda:

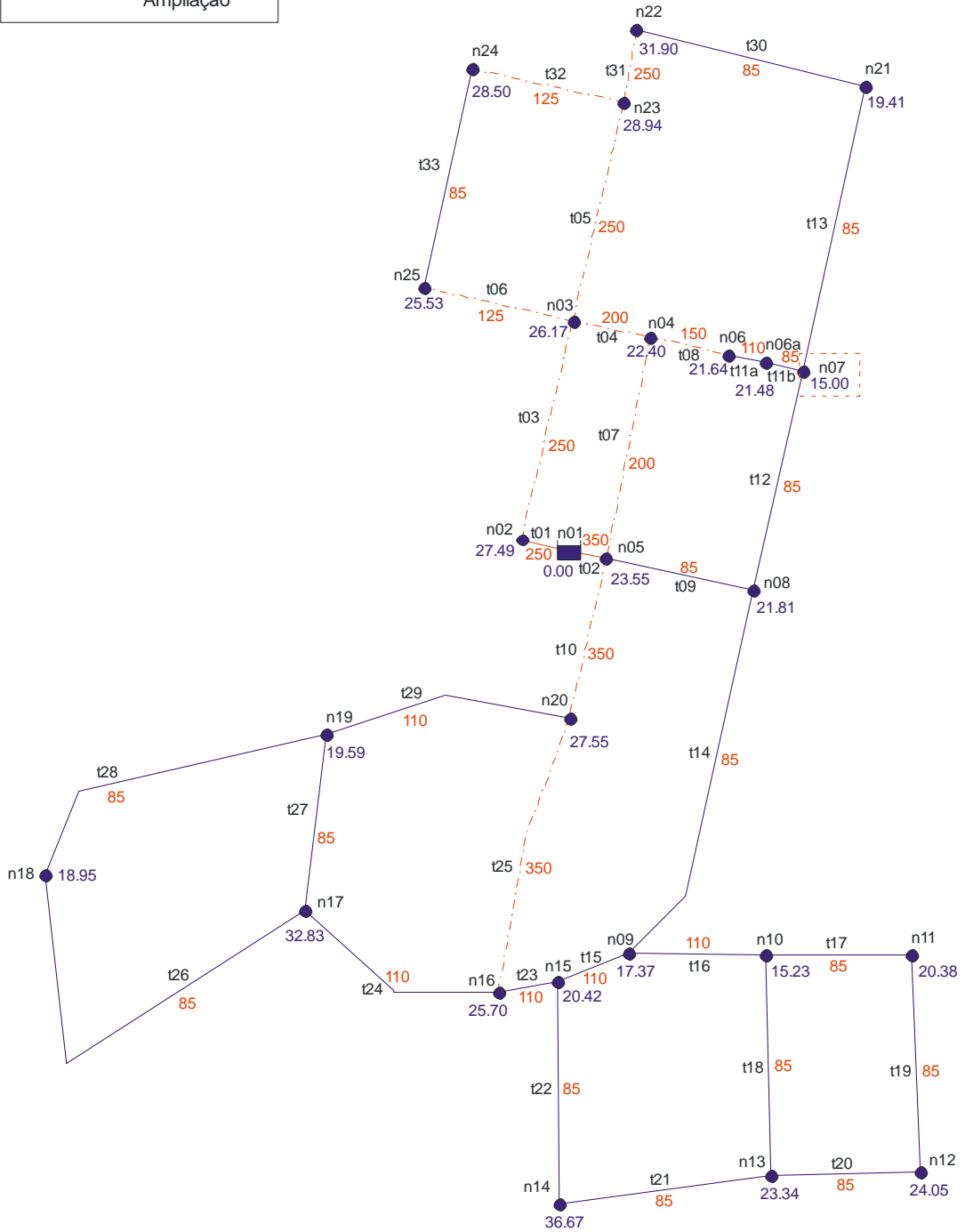


Figura 4.18 – Rede Apucarana dimensionada sem folga de pressão.

Satisfeitas as condições limites para o dimensionamento, faz-se necessário explicar em detalhes como ocorreu a convergência do dimensionamento, bem como a definição do custo final para a rede. Na iteração 6, apresentada na Tabela 4.22, ocorreu a última substituição referente às tubulações, ou seja, no trecho (t11) onde ocorreu o G_p^* , que passou do DN 85 para o DN 110. Com esta substituição, efetivada na iteração 7 (Tabela 4.23), foi atingida a condição de parada, pois a pressão no nó mais desfavorável da rede (n10) superou a pressão mínima estabelecida (15 mca) para os nós da rede em 1,34 mca. No caso da não aceitação da otimização da folga em questão, o custo para a rede seria representado pelo Custo Total Atual totalizado na iteração 7: \$ 918.455,91. Como se optou por aceitar o procedimento de otimização para transformação da folga de pressão em economia, o custo para a rede é representado pelo Custo Total Atual totalizado na iteração 8: \$ 911.019,71 (Tabela 4.24). Portanto, a diminuição no custo em unidades monetárias, após a otimização foi de: \$ 7.436,20 que equivale a uma redução percentual de 0,82%.

Tabela 4.22 – Iteração-6 para o dimensionamento da rede Apucarana.

Iteração: 6 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 888,00 **Nó mais desfavorável:** n07

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t01	250	250	70,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t02	350	350	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t03	250	250	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t04	200	200	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t05	250	250	358,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t06	125	125	246,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t07	200	200	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t08	150	150	125,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t09	85	110	240,00	116,18	27.883,20	191,99	46.077,60	18.194,40	14,39	16,17	1,78	10.231,9199
t10	350	350	263,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t11	85	110	120,00	116,18	13.941,60	191,99	23.039,80	9.097,20	14,39	16,63	4,24	2.144,6556
t12	85	110	364,00	116,18	42.289,52	191,99	69.884,36	27.594,84	14,39	16,40	1,01	27.281,1073
t13	85	110	468,00	116,18	54.372,24	191,99	89.851,32	35.479,08	14,39	13,85	0,54	65.278,8960
t14	85	110	609,00	116,18	69.136,62	191,99	97.722,91	38.687,29	14,39	14,41	0,02	1.900.851,7241
t15	110	140	122,00	191,99	23.422,78	369,30	45.054,60	21.631,82	14,39	14,90	0,51	42.390,9978
t16	110	140	216,00	191,99	41.469,84	369,30	79.769,80	38.299,96	14,39	14,33	0,06	686.361,2903
t17	85	110	233,00	116,18	27.069,94	191,99	44.733,87	17.663,73	14,39	14,38	0,01	1.436.075,6098
t18	85	110	348,00	116,18	40.430,64	191,99	66.812,52	26.381,88	14,39	14,37	0,02	1.113.159,4937
t19	85	110	348,00	116,18	40.430,64	191,99	66.812,52	26.381,88	14,39	14,39	0,00	13.885.200,0000
t20	85	110	235,00	116,18	27.302,30	191,99	45.117,65	17.815,35	14,39	14,39	0,00	9.897.416,6567
t21	85	110	338,00	116,18	39.268,84	191,99	64.892,82	25.623,78	14,39	14,43	0,04	670.779,5812
t22	85	110	351,00	116,18	40.779,18	191,99	67.388,49	26.609,31	14,39	14,51	0,12	222.300,0000
t23	110	140	93,00	191,99	17.855,07	369,30	34.344,90	16.489,83	14,39	15,11	0,72	22.963,1388
t24	110	140	358,00	191,99	68.732,42	369,30	132.209,40	63.476,98	14,39	14,38	0,01	5.246.031,4050
t25	350	350	454,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t26	85	110	752,00	116,18	87.367,36	191,99	144.376,48	57.009,12	14,39	14,39	0,00	81.441.600,0000
t27	85	110	282,00	116,18	32.762,76	191,99	54.141,18	21.378,42	14,39	14,39	0,00	42.756.840,0000
t28	85	110	543,00	116,18	63.085,74	191,99	104.250,57	41.164,83	14,39	14,39	0,00	27.443.220,0000
t29	110	140	402,00	191,99	77.179,98	369,30	148.465,60	71.278,62	14,39	14,41	0,02	4.217.669,8225
t30	85	110	374,00	116,18	43.451,32	191,99	71.804,26	28.352,94	14,39	16,84	2,45	11.586,3430
t31	250	250	116,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t32	125	125	248,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,39	14,39	0,00	0,0000
t33	85	110	354,00	116,18	41.127,72	191,99	67.964,46	26.836,74	14,39	14,39	0,00	8.386.481,2500

Custo Total Atual (\$) 909.358,71

Tabela 4.23 – Iteração-7 para o dimensionamento da rede Apucarana.

Iteração: 7 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca): 888,00** **Nó mais desfavorável: n10**

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t01	250	250	70,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t02	350	350	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t03	250	250	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t04	200	200	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t05	250	250	358,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t06	125	125	246,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t07	200	200	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t08	150	150	125,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t09	85	110	240,00	116,18	27.882,20	191,99	46.077,80	18.194,40	16,34	17,72	1,38	13.184,3478
t10	350	350	263,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t11	110	140	120,00	191,99	23.038,80	369,30	44.316,00	21.277,20	16,34	16,99	0,65	32.754,3103
t12	85	110	364,00	116,18	42.289,52	191,99	69.884,36	27.594,84	16,34	16,26	0,08	333.674,0024
t13	85	110	468,00	116,18	54.372,24	191,99	89.851,32	35.479,08	16,34	16,18	0,16	227.721,9512
t14	85	110	509,00	116,18	59.135,62	191,99	97.722,91	38.587,29	16,34	16,44	0,10	376.829,0039
t15	110	140	122,00	191,99	23.422,78	369,30	45.054,60	21.631,82	16,34	17,37	1,03	20.942,8018
t16	110	140	216,00	191,99	41.469,84	369,30	79.768,80	38.298,96	16,34	18,63	2,30	16.674,9216
t17	85	110	233,00	116,18	27.069,94	191,99	44.733,67	17.663,73	16,34	16,22	0,12	151.620,0000
t18	85	110	348,00	116,18	40.430,64	191,99	66.812,52	26.381,88	16,34	16,11	0,23	115.811,5891
t19	85	110	348,00	116,18	40.430,64	191,99	66.812,52	26.381,88	16,34	16,32	0,02	1.339.181,7259
t20	85	110	235,00	116,18	27.302,30	191,99	45.117,65	17.815,35	16,34	16,35	0,02	1.164.401,9608
t21	85	110	338,00	116,18	39.268,84	191,99	64.892,82	25.623,78	16,34	16,66	0,33	78.480,1838
t22	85	110	351,00	116,18	40.779,18	191,99	67.388,49	26.609,31	16,34	17,40	1,06	24.987,6139
t23	110	140	93,00	191,99	17.855,07	369,30	34.344,90	16.489,83	16,34	18,48	2,14	7.691,1521
t24	110	140	358,00	191,99	68.732,42	369,30	132.208,40	63.478,98	16,34	18,30	0,03	1.866.970,0000
t25	350	350	454,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t26	85	110	752,00	116,18	87.367,36	191,99	144.376,48	57.009,12	16,34	16,33	0,00	25.913.236,3636
t27	85	110	282,00	116,18	32.762,76	191,99	54.141,18	21.378,42	16,34	16,34	0,00	16.444.938,4615
t28	85	110	543,00	116,18	63.085,74	191,99	104.250,57	41.164,83	16,34	16,34	0,00	9.801.150,0000
t29	110	140	402,00	191,99	77.179,98	369,30	148.458,60	71.278,62	16,34	16,38	0,05	1.497.460,0000
t30	85	110	374,00	116,18	43.461,32	191,99	71.804,26	28.352,94	16,34	16,68	0,34	82.483,2790
t31	250	250	116,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t32	125	125	248,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,34	16,34	0,00	0,0000
t33	85	110	354,00	116,18	41.127,72	191,99	67.964,46	26.836,74	16,34	16,34	0,00	53.673.480,0000

Custo Total Atual (\$) 918.455,91

Tabela 4.24 – Iteração-8 para o dimensionamento da rede Apucarana.

Iteração: 8 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca): 888,00** **Nó mais desfavorável: n07**

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t01	250	250	70,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t02	350	350	65,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t03	250	250	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t04	200	200	130,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t05	250	250	358,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t06	125	125	246,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t07	200	200	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t08	150	150	125,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t09	85	85	240,00	116,18	27.882,20	116,18	27.882,20	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t10	350	350	263,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t11a	110	110	21,91	191,99	4.206,50	191,99	4.206,50	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t11b	85	85	98,09	116,18	11.396,10	116,18	11.396,10	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t12	85	85	364,00	116,18	42.289,52	116,18	42.289,52	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t13	85	85	468,00	116,18	54.372,24	116,18	54.372,24	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t14	85	85	509,00	116,18	59.135,62	116,18	59.135,62	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t15	110	110	122,00	191,99	23.422,78	191,99	23.422,78	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t16	110	110	216,00	191,99	41.469,84	191,99	41.469,84	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t17	85	85	233,00	116,18	27.069,94	116,18	27.069,94	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t18	85	85	348,00	116,18	40.430,64	116,18	40.430,64	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t19	85	85	348,00	116,18	40.430,64	116,18	40.430,64	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t20	85	85	235,00	116,18	27.302,30	116,18	27.302,30	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t21	85	85	338,00	116,18	39.268,84	116,18	39.268,84	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t22	85	85	351,00	116,18	40.779,18	116,18	40.779,18	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t23	110	110	93,00	191,99	17.855,07	191,99	17.855,07	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t24	110	110	358,00	191,99	68.732,42	191,99	68.732,42	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t25	350	350	454,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t26	85	85	752,00	116,18	87.367,36	116,18	87.367,36	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t27	85	85	282,00	116,18	32.762,76	116,18	32.762,76	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t28	85	85	543,00	116,18	63.085,74	116,18	63.085,74	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t29	110	110	402,00	191,99	77.179,98	191,99	77.179,98	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t30	85	85	374,00	116,18	43.461,32	116,18	43.461,32	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t31	250	250	116,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t32	125	125	248,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000
t33	85	85	354,00	116,18	41.127,72	116,18	41.127,72	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000

Custo Total Atual (\$) 911.019,71

Os dados referentes aos nós e trechos da rede, após o dimensionamento, relativos à configuração final ocorrida na iteração 8, estão relacionados nas Tabelas 4.25 e 4.26.

Tabela 4.25 - Dados nos nós da rede Apucarana.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo-Base (l/s)	Pressão (mca)	Piezométrica Disponível (mca)
n02	860,00	3,00	27,49	887,49
n03	859,00	8,00	26,17	885,17
n04	862,90	0,00	22,40	885,30
n05	864,10	0,00	23,55	887,65
n06	862,20	0,00	21,64	883,84
n06a	861,85	0,00	21,48	883,33
n07	860,30	15,00	15,00	875,30
n08	856,00	7,00	21,81	877,81
n09	860,50	4,00	17,37	877,87
n10	859,00	5,00	15,23	874,23
n11	852,00	3,00	20,38	872,38
n12	848,00	3,00	24,05	872,05
n13	849,00	6,00	23,34	872,34
n14	838,00	3,00	36,67	874,67
n15	861,00	0,00	20,42	881,42
n16	860,80	6,00	25,70	886,50
n17	848,50	6,00	32,83	881,33
n18	855,80	10,00	18,95	874,75
n19	861,50	8,00	19,59	881,09
n20	859,50	5,00	27,55	887,05
n21	852,00	14,00	19,41	871,41
n22	852,00	0,00	31,90	883,90
n23	855,00	9,00	28,94	883,94
n24	851,00	14,00	28,50	879,50
n25	854,60	11,00	25,53	880,13

Tabela 4.26 - Dados nos nós da rede Apucarana.

Trecho	Comprimento (m)	Vazão (l/s)	DI	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)
t01	70,00	45,8932	250	0,9349	0,51
t02	65,00	94,1068	350	0,9781	0,35
t03	360,00	42,8932	250	0,8738	2,32
t04	130,00	-8,6165	200	0,2743	0,13
t05	368,00	30,5561	250	0,6225	1,23
t06	246,00	12,9535	125	1,0555	5,04
t07	360,00	-24,0477	200	0,7655	2,35
t08	125,00	15,4312	150	0,8732	1,46
t09	240,00	10,6223	85	1,8719	9,84
t10	263,00	59,4369	350	0,6178	0,60
t11a	21,91	15,4312	110	1,6238	0,51
t11b	98,09	15,4312	85	2,7194	8,03
t12	364,00	-4,0592	85	0,7153	2,51
t13	468,00	4,4903	85	0,7913	3,89
t14	509,00	-0,4369	85	0,077	0,06
t15	122,00	-17,3825	110	1,8291	3,55
t16	216,00	12,9456	110	1,3622	3,64
t17	233,00	4,3832	85	0,7724	1,85
t18	348,00	3,5624	85	0,6278	1,89
t19	348,00	1,3832	85	0,2437	0,33
t20	235,00	-1,6168	85	0,2849	0,29
t21	338,00	-4,0544	85	0,7145	2,33
t22	351,00	-7,0544	85	1,2432	6,74
t23	93,00	-24,4369	110	2,5714	5,08
t24	368,00	11,9141	110	1,2537	5,17
t25	454,00	-42,3509	350	0,4402	0,55
t26	752,00	4,6109	85	0,8126	6,57
t27	282,00	1,3032	85	0,2297	0,24
t28	543,00	-5,3891	85	0,9497	6,34
t29	402,00	-12,0859	110	1,2718	5,96
t30	374,00	-9,5097	85	1,6759	12,49
t31	116,00	-9,5097	250	0,1937	0,05
t32	248,00	12,0465	125	0,9816	4,45
t33	354,00	-1,9535	85	0,3443	0,63

A Figura 4.19 apresenta o relatório com o resumo dos principais dados de entrada e de saída do dimensionamento otimizado.

EficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Fixa
Apucarana

Dados de Entrada

Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca) 15,00
 Cota Piezométrica na cabeceira (m) 888,00
 Quantidade de nós da rede (unid) 025
 Quantidade de trechos da rede (unid) 034

Faixa de Pressões na Rede

Mínima (mca) n07 15,00
 Máxima (mca) n14 36,67

Faixa de Velocidades na Rede

Mínima (m/s) t14 0,08
 Máxima (m/s) t11b 2,72

Sobre o Processamento

Data: 02/03/2007
 Número de iterações..... 008
 Tempo das iterações..... 00:01:18
 Tempo div. do trecho..... 00:00:08
 Total..... 00:01:26

Sistema Operacional e Hardware

Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)
 AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+
 Memória RAM: 1024 Mb

Componente	Custo em \$
Tubulações	911.019,71

\$ = Unidades Monetárias

Figura 4.19 – Relatório Resumo para a rede Apucarana.

Comparando os resultados obtidos com a utilização do método de dimensionamento otimizado EficientE, em relação a outros métodos que dimensionaram a mesma rede, conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado satisfatório em termos econômicos superando o menor valor \$ 886.227,46 obtido por Lopes (2002) em apenas 2,8%, além de ter apresentado valores limites para pressão (máx. n14 = 36,67 mca) e velocidades (mín. t14 = 0,08 m/s e máx. t11b = 2,72 m/s). As Tabelas 4.27, 4.28 e 4.29, mostram as comparações dos valores das pressões, diâmetros utilizados nos trechos e valores de custo encontradas por Lopes (2002) e do modelo EficientE proposto, respectivamente.

Faz-se necessário registrar, que o método GLOBAL de Lopes (2002), que obteve o melhor resultado, em termos econômicos, em relação ao método proposto, utilizou o artifício da divisão de trechos oito vezes, enquanto o método EficientE só utilizou este recurso uma única vez, para regulação da pressão mínima no nó mais desfavorável, para que ele atingisse exatamente a pressão mínima estabelecida para a rede.

Tabela 4.27 – Comparativo com outros estudos para a rede Apucarana – pressões.

Nó	Pressão (mca)		Nó	Pressão (mca)	
	GLOBAL	EficientE		GLOBAL	EficientE
n01	00,00	00,00	n14	36,73	36,67
n02	27,49	27,49	n15	20,76	20,42
n03	26,17	26,17	n16	25,78	25,70
n04	22,40	22,40	n17	28,44	32,83
n05	23,55	23,55	n18	15,03	18,95
n06	21,63	21,64	n19	15,96	19,59
n07	15,20	15,00	n20	27,55	27,55
n08	21,90	21,81	n21	19,64	19,41
n09	17,45	17,37	n22	31,90	31,90
n10	15,00	15,23	n23	28,94	28,94
n11	20,22	20,38	n24	28,50	28,50
n12	23,92	24,05	n25	25,53	25,53
n13	23,92	23,34			

Tabela 4.28 – Comparativo com outros estudos para a rede Apucarana – diâmetros.

Trecho	GLOBAL		EficientE		Trecho	GLOBAL		EficientE	
	DN	L(m)	DN	L(m)		DN	L(m)	DN	L(m)
t01	250	70,00	250	70,00	t18	85	348,00	85	348,00
t02	350	65,00	350	65,00	t19	85	348,00	85	348,00
t03	250	360,00	250	360,00	t20	85	235,00	85	235,00
t04	200	130,00	200	130,00	t21	85	338,00	85	338,00
t05	250	358,00	250	358,00	t22	85	351,00	85	351,00
t06	125	246,00	125	246,00	t23	110 140	86,79 6,21	110	93,00
t07	200	360,00	200	360,00	t24	85	358,00	110	358,00
t08	150	125,00	150	125,00	t25	350	454,00	350	454,00
t09	85	240,00	85	240,00	t26	85 11	737,97 14,03	85	752,00
t10	350	263,00	350	263,00	t27	85	282,00	85	282,00
t11	85 110	93,43 26,57	85 110	98,09 21,91	t28	85	543,00	85	543,00
t12	85	364,00	85	364,00	t29	85 110	2,24 399,76	110	402,00
t13	85	468,00	85	468,00	t30	85 110	363,99 10,01	85	374,00
t14	85	509,00	85	509,00	t31	250	116,00	250	116,00
t15	85 110	9,78 206,22	85	122,00	t32	350	248,00	125	248,00
t16	85 110	5,08 116,92	110	216,00	t33	85	354,00	85	354,00
t17	85 110	228,16 4,84	85	233,00					

Tabela 4.29 – Resultados obtidos por outros estudos para rede de Apucarana – custos.

Estudo	Custo \$
Projeto original – SERETE	1.638.336,00
Modelo de Alperovits e Shamir (1977) – Vieira (1980)	1.122.552,00
Modelo Global – Lopes (2002) - unificação pelos maiores diâmetros	1.010.831,55
Enumeração Implícita – Koide (1984)	926.000,00
EficientE	911.019,71
Modelo Global – Lopes (2002) - unificação pelos maiores comprimentos	891.315,93
Modelo Global - Lopes (2002) – otimização global	886.227,46

\$ = Unidades Monetárias

4.2.4 Rede Exemplo 4

O quarto exemplo refere-se à rede da cidade de Paranoá (Figura 4.20), Distrito Federal, projetada pela ETEP Engenharia e construída pela Companhia de Água e Esgotos do Distrito Federal – CAESB. Como no exemplo anterior, trata-se de um projeto de ampliação, em que alguns trechos de uma rede ramificada antiga serão aproveitados. As diferenças estão na ausência de anéis na rede existente e na possibilidade de instalar novos trechos em paralelo a determinados trechos existentes, pelo fato destes possuírem um diâmetro insuficiente para absorverem as novas vazões requeridas para o novo dimensionamento.

Na nova configuração, a rede possui 16 anéis, 54 trechos e 39 nós, sendo que 10 trechos possuem diâmetros conhecidos fixos (Tabela 4.30). Os limites de carga hidráulica mínima e máxima nos nós são 10 e 50 metros, respectivamente, de acordo com as normas brasileiras. A cota piezométrica do reservatório único no nó n19 vale 1.167,45 m.

Como não existem informações sobre custos no projeto original, serão utilizados dados levantados pela CAGEPA referentes ao ano de 1982, apresentados por Formiga (1999) e utilizados no estudo de Lopes (2002). Nos trechos referentes à expansão, os tubos utilizados serão de PVC com coeficiente de rugosidade $Chw = 130$ e nos trechos referentes à rede existente a tubulação também é de PVC, com coeficiente de rugosidade $Chw = 90$, simulando uma maior perda de carga, uma vez que as tubulações são antigas (Tabela 4.31). Os demais dados referentes aos nós e trechos da rede, estão relacionados na Tabela 4.32.

Esta rede difere da rede anterior apresentada (Apucarana), pois apesar de ser também uma ampliação a tubulação aproveitada em determinados trechos não suportaria as novas exigências para absorver as novas vazões impostas pela nova configuração da rede. Portanto, nos trechos denominados “t09”, “t15” e “t24” estes foram lançados em paralelo aos trechos existentes “t09e”, “t15e” e “t24e”.

Outro ponto a destacar refere-se ao tamanho desta rede. Independente do método utilizado, pelo seu porte, considerando o número elevado de trechos o tempo de processamento esperado deverá ser mais demorado, em relação às outras redes anteriormente dimensionadas.

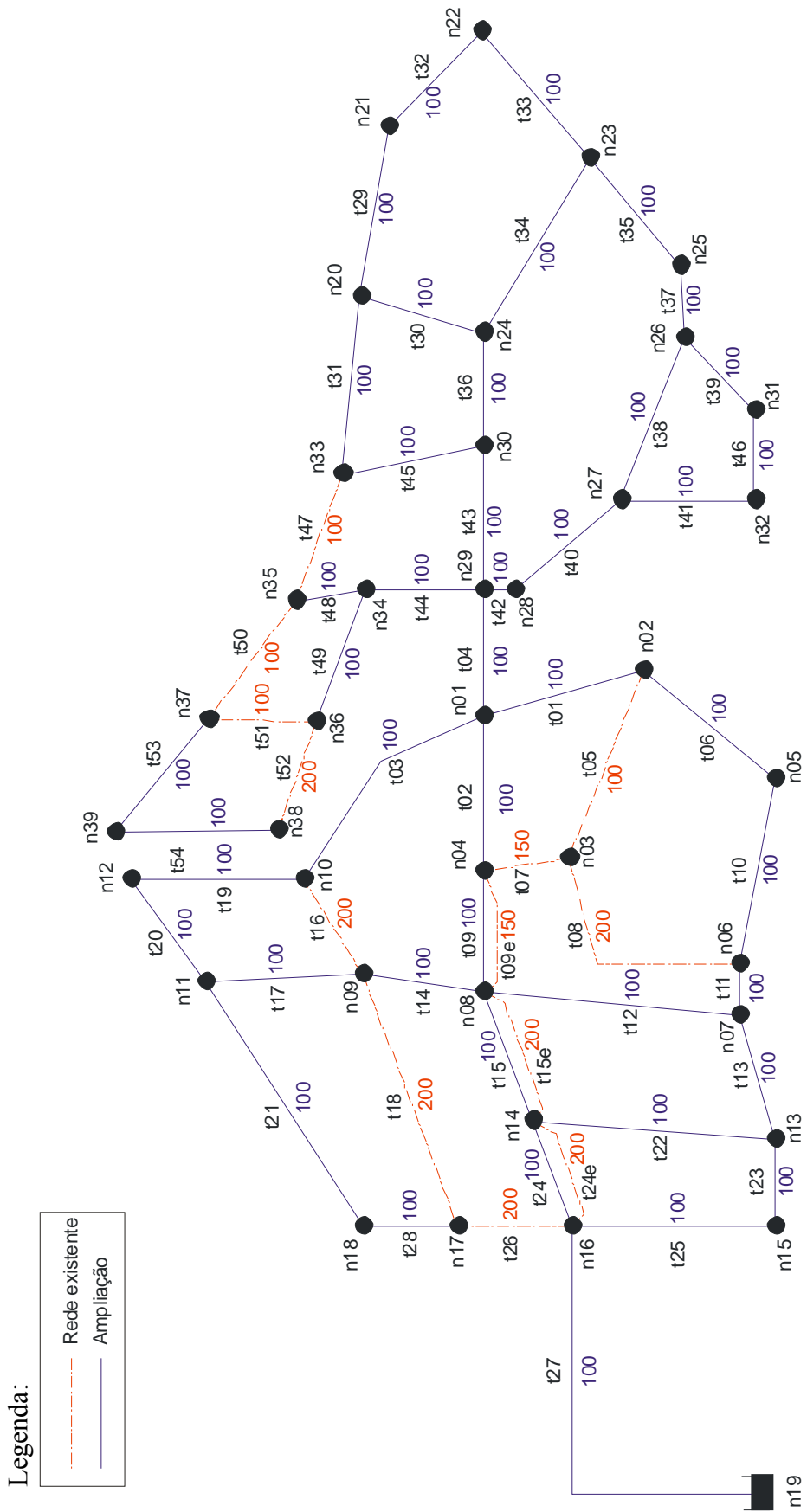


Figura 4.20 – Configuração da rede Paranoá.

Tabela 4.30 – Tubulação existente da rede Paranoá (LOPES, 2002).

Trecho	Rugosidade (Chw)	Tipo	Diâmetro (mm)
t05(02-03)	90	PVC	100
t07(03-04)	90	PVC	150
t08(03-06)	90	PVC	200
t09e(04-08)	90	PVC	150
t15e(08-14)	90	PVC	200
t16(09-10)	90	PVC	200
t18(09-17)	90	PVC	200
t24e(14-16)	90	PVC	200
t26(16-17)	90	PVC	200
t47(33-35)	90	PVC	100
t50(35-37)	90	PVC	100
t51(36-37)	90	PVC	100
t52(36-38)	90	PVC	200

Tabela 4.31 – Custo das tubulações para a rede Paranoá.

Codigo	DN	DI	Rugosidade	Tubo	Custo da Implantação	Limitador
0	100	100	130	PVC	1629	<input type="checkbox"/>
1	150	150	130	PVC	4054	<input type="checkbox"/>
2	200	200	130	PVC	5769	<input type="checkbox"/>
3	250	250	130	PVC	7718	<input type="checkbox"/>
4	300	300	130	PVC	9237	<input type="checkbox"/>
5	400	400	130	PVC	12397	<input type="checkbox"/>
6	500	500	130	PVC	17696	<input checked="" type="checkbox"/>
7	100	100	90	PVC	0	<input type="checkbox"/>
8	150	150	90	PVC	0	<input type="checkbox"/>
9	200	200	90	PVC	0	<input checked="" type="checkbox"/>

Copiar os valores da coluna DN para DI

Fechar

Tabela 4.32 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede Paranoá.

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comprimento(m)
n01	7,27	1.134,37	t01(01-02)	300,00
n02	7,22	1.133,86	t02(01-04)	270,00
n03	7,43	1.140,33	t03(01-10)	550,00
n04	5,13	1.139,28	t04(01-29)	236,00
n05	2,89	1.129,80	t05(02-03)	360,00
n06	3,00	1.138,33	t06(02-05)	300,00
n07	5,03	1.140,86	t07(03-04)	150,00
n08	7,74	1.143,50	t08(03-06)	450,00
n09	8,13	1.138,89	t09/t09e(04-08)	220,00
n10	5,72	1.135,60	t10(05-06)	340,00
n11	4,49	1.131,21	t11(06-07)	90,00
n12	3,27	1.127,88	t12(07-08)	450,00
n13	5,29	1.147,19	t13(07-13)	250,00
n14	8,35	1.148,13	t14(08-09)	220,00
n15	6,47	1.150,40	t15/t15e(08-14)	240,00
n16	7,79	1.150,78	t16(09-10)	200,00
n17	7,38	1.147,27	t17(09-11)	280,00
n18	5,09	1.143,37	t18(09-17)	480,00
n19	-	1.167,45	t19(10-12)	310,00
n20	5,05	1.105,08	t20(11-12)	220,00
n21	6,85	1.098,24	t21(11-18)	520,00
n22	16,71	1.100,87	t22(13-14)	430,00
n23	6,77	1.109,07	t23(13-15)	150,00
n24	6,77	1.112,76	t24/t24e(14-16)	200,00
n25	7,79	1.108,21	t25(15-16)	360,00
n26	5,42	1.117,59	t26(16-17)	200,00
n27	4,60	1.127,09	t27(16-19)	780,00
n28	2,58	1.130,32	t28(17-18)	170,00
n29	3,48	1.128,62	t29(20-21)	300,00
n30	6,51	1.121,73	t30(20-24)	230,00
n31	4,78	1.115,31	t31(20-33)	320,00
n32	5,48	1.125,14	t32(21-22)	240,00
n33	4,35	1.112,61	t33(22-23)	300,00
n34	4,82	1.122,70	t34(23-24)	370,00
n35	3,82	1.118,76	t35(23-25)	250,00
n36	5,55	1.129,96	t36(24-30)	200,00
n37	4,06	1.112,30	t37(25-26)	130,00
n38	0,99	1.134,47	t38(26-27)	310,00
n39	1,41	1.126,00	t39(26-31)	180,00
			t40(27-28)	150,00
			t41(27-32)	240,00
			t42(28-29)	50,00
			t43(29-30)	250,00
			t44(29-34)	210,00
			t45(30-33)	260,00
			t46(31-32)	160,00
			t47(33-35)	240,00
			t48(34-35)	130,00

Continuação...

Trecho	Comprimento(m)
t49(34-36)	260,00
t50(35-37)	260,00
t51(36-37)	190,00
t52(36-38)	200,00
t53(37-39)	260,00
t54(38-39)	290,00

Após todos os procedimentos de configuração da rede, incluindo a utilização inicial da tubulação mínima disponibilizada DN 100, neste caso, nos novos trechos, e da correta escolha da situação de contorno (cota piezométrica de cabeceira fixa), procede-se às configurações conforme apresentado na Figura 4.21. Conforme o exemplo anterior o Exemplo 4 também difere dos dois primeiros exemplos apresentados neste capítulo, em termos de configuração, pois, nesta modelagem os trechos existentes deverão ser configurados como sendo ignorados pelo programa, para que os mesmos não sejam alterados durante o processo iterativo de dimensionamento otimizado.

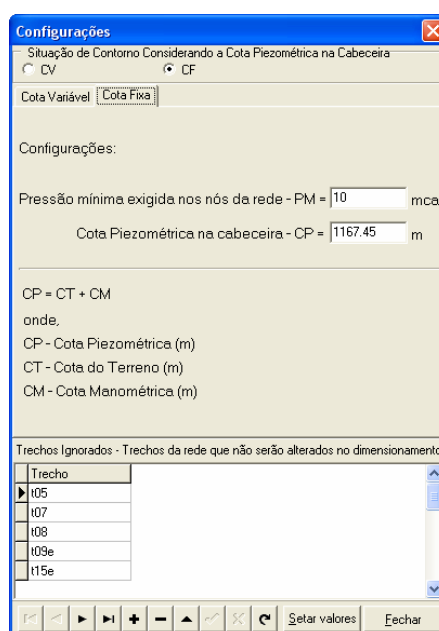


Figura 4.21 – Configurações de contorno da rede Paranoá.

Após a execução do processo de dimensionamento otimizado, houve uma folga de pressão de 0,59 mca no nó mais desfavorável da rede “n15” (Figura 4.22).

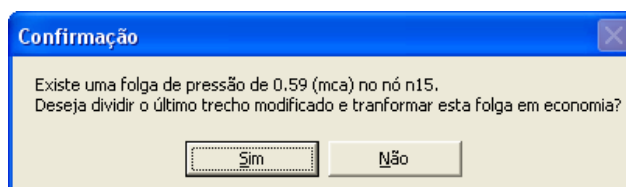


Figura 4.22 – Rede Paranoá, tela de confirmação (folga de pressão).

Como o padrão utilizado neste estudo é obter o menor custo possível, optou-se por transformar esta pressão em economia, dividindo-se o último trecho modificado (t27) na iteração 32 em dois novos sub-trechos (t27a) e (t27b). A Figura 4.23, apresenta as configurações da rede com folga de pressão no nó (n15) e a Figura 4.24, apresenta as configurações da rede sem folga de pressão, ou seja, onde o nó mais desfavorável (n15) atinge exatamente o valor mínimo estabelecido para a rede que foi de 10 mca.

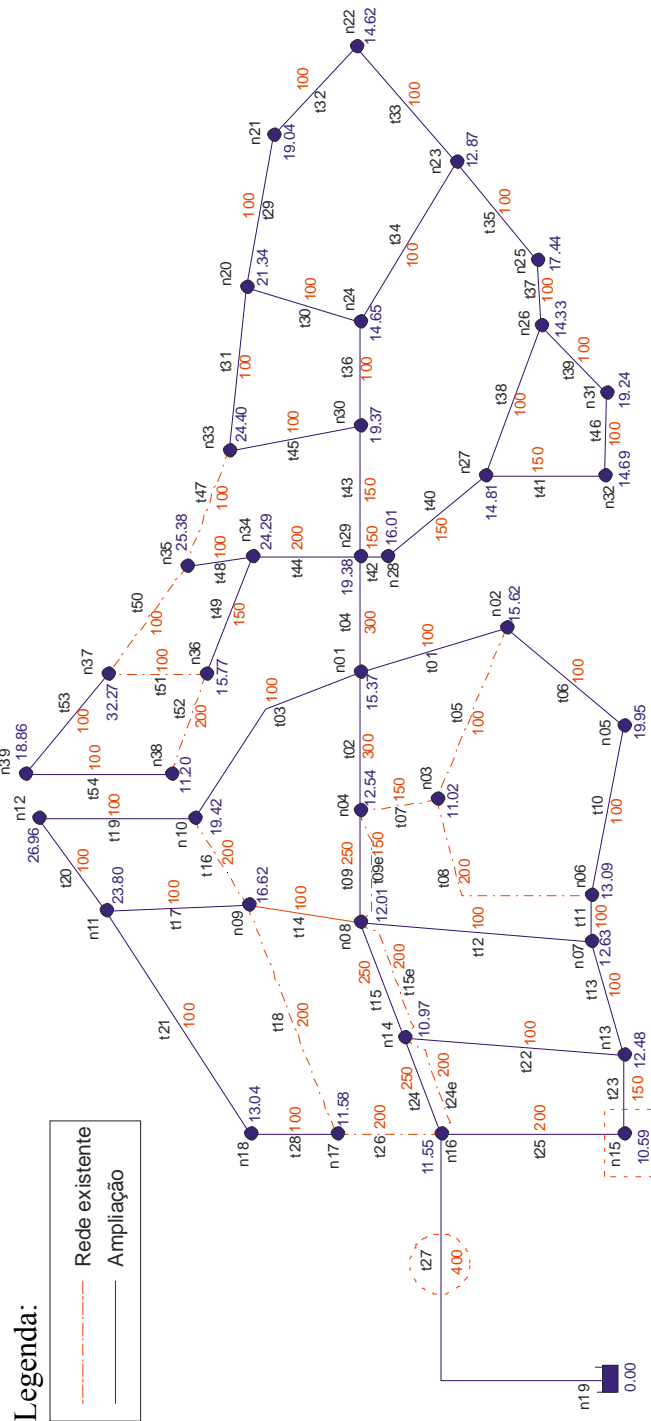


Figura 4.23 – Rede Paranoá dimensionada com folga de pressão.

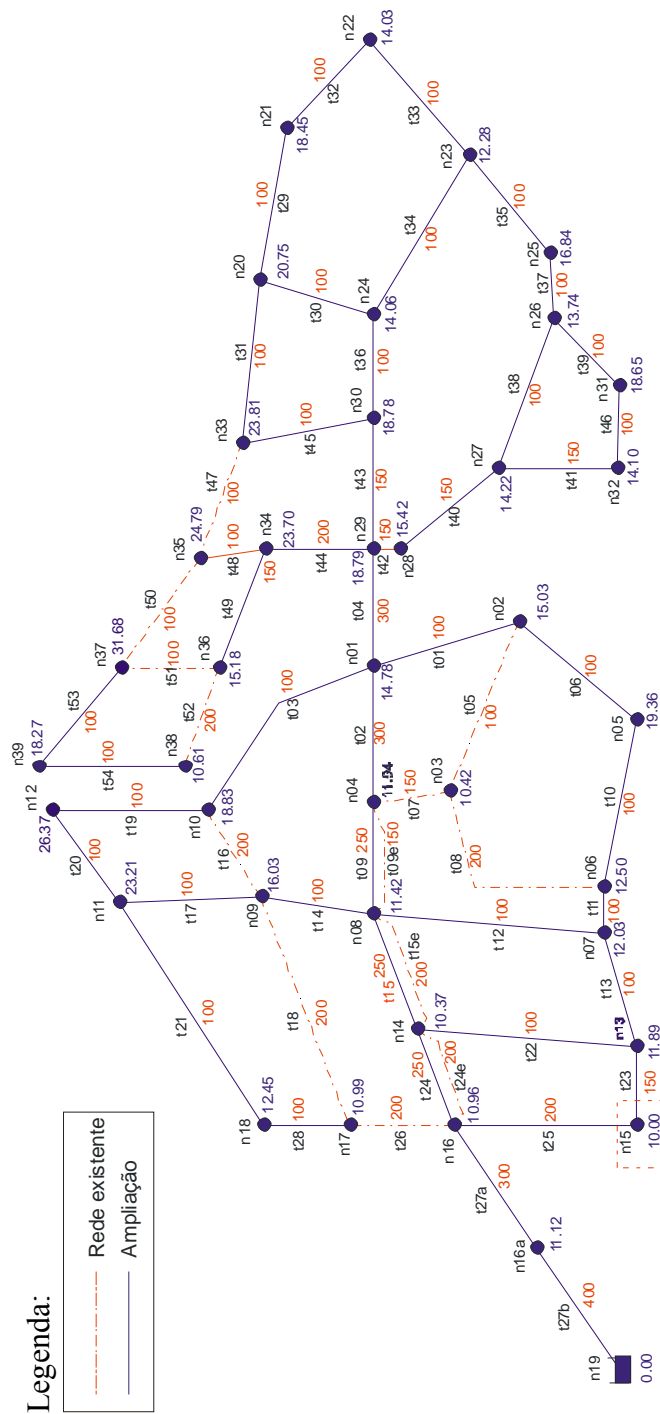


Figura 4.24 – Rede Paranoá dimensionada sem folga de pressão.

Satisfeitas as condições limites para o dimensionamento, faz-se necessário explicar em detalhes como ocorreu a convergência do dimensionamento, bem como a definição do custo final para a rede. Na iteração 32, apresentada na Tabela 4.33, ocorreu a última substituição referente às tubulações, ou seja, no trecho (t27) onde ocorreu o G_p^* , que passou do DN 300 para DN 400. Com esta substituição efetivada na iteração 33 (Tabela 4.34), foi

Tabela 4.35 – Iteração-34 para o dimensionamento da rede Paranoá.

Iteração: 34 Cota Piezométrica na Cabeceira (mca): 1.167,45 Nó mais desfavorável: n15

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t01	100	100	300,00	1.629,00	488.700,00	1.629,00	488.700,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t02	300	300	270,00	9.237,00	2.493.990,00	9.237,00	2.493.990,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t03	100	100	650,00	1.629,00	895.950,00	1.629,00	895.950,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t04	300	300	236,00	9.237,00	2.179.932,00	9.237,00	2.179.932,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t05	100	100	360,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t06	100	100	300,00	1.629,00	488.700,00	1.629,00	488.700,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t07	150	150	150,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t08	200	200	450,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t09	250	250	220,00	7.718,00	1.697.960,00	7.718,00	1.697.960,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t09e	150	150	220,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t10	100	100	340,00	1.629,00	553.860,00	1.629,00	553.860,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t11	100	100	90,00	1.629,00	146.610,00	1.629,00	146.610,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t12	100	100	450,00	1.629,00	733.050,00	1.629,00	733.050,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t13	100	100	250,00	1.629,00	407.250,00	1.629,00	407.250,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t14	100	100	220,00	1.629,00	358.380,00	1.629,00	358.380,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t15	250	250	240,00	7.718,00	1.852.320,00	7.718,00	1.852.320,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t15e	200	200	240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t16	200	200	200,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t17	100	100	280,00	1.629,00	456.120,00	1.629,00	456.120,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t18	200	200	480,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t19	100	100	310,00	1.629,00	504.990,00	1.629,00	504.990,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t20	100	100	220,00	1.629,00	358.380,00	1.629,00	358.380,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t21	100	100	520,00	1.629,00	847.080,00	1.629,00	847.080,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t22	100	100	430,00	1.629,00	700.470,00	1.629,00	700.470,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t23	150	150	150,00	4.054,00	608.100,00	4.054,00	608.100,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t24	250	250	200,00	7.718,00	1.543.600,00	7.718,00	1.543.600,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t24e	200	200	200,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t25	200	200	360,00	5.769,00	2.076.840,00	5.769,00	2.076.840,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t26	200	200	200,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t27a	300	300	29,52	9.237,00	272.676,24	9.237,00	272.676,24	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t27b	400	400	750,48	12.397,00	9.303.700,56	12.397,00	9.303.700,56	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t28	100	100	170,00	1.629,00	276.930,00	1.629,00	276.930,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t29	100	100	300,00	1.629,00	488.700,00	1.629,00	488.700,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t30	100	100	230,00	1.629,00	374.670,00	1.629,00	374.670,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t31	100	100	320,00	1.629,00	521.280,00	1.629,00	521.280,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t32	100	100	240,00	1.629,00	390.960,00	1.629,00	390.960,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t33	100	100	300,00	1.629,00	488.700,00	1.629,00	488.700,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t34	100	100	370,00	1.629,00	602.730,00	1.629,00	602.730,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t35	100	100	250,00	1.629,00	407.250,00	1.629,00	407.250,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t36	100	100	200,00	1.629,00	325.800,00	1.629,00	325.800,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t37	100	100	130,00	1.629,00	211.770,00	1.629,00	211.770,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t38	100	100	310,00	1.629,00	504.990,00	1.629,00	504.990,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t39	100	100	180,00	1.629,00	293.220,00	1.629,00	293.220,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t40	150	150	150,00	4.054,00	608.100,00	4.054,00	608.100,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t41	150	150	240,00	4.054,00	972.960,00	4.054,00	972.960,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t42	150	150	50,00	4.054,00	202.700,00	4.054,00	202.700,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t43	150	150	250,00	4.054,00	1.013.500,00	4.054,00	1.013.500,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t44	200	200	210,00	5.769,00	1.211.490,00	5.769,00	1.211.490,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t46	100	100	260,00	1.629,00	423.540,00	1.629,00	423.540,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t46	100	100	160,00	1.629,00	260.640,00	1.629,00	260.640,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t47	100	100	240,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t48	100	100	130,00	1.629,00	211.770,00	1.629,00	211.770,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t49	150	150	260,00	4.054,00	1.054.040,00	4.054,00	1.054.040,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t50	100	100	260,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t51	100	100	190,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t52	200	200	200,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t53	100	100	260,00	1.629,00	423.540,00	1.629,00	423.540,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000
t54	100	100	290,00	1.629,00	472.410,00	1.629,00	472.410,00	0,00	10,00	10,00	0,00	0,0000

Custo Total Atual (\$) 40.710.348,80

Os dados referentes aos nós e trechos da rede, após o dimensionamento, relativos à configuração final ocorrida na iteração 34, estão relacionados nas Tabelas 4.36 e 4.37.

Tabela 4.36 - Dados nos nós da rede Paranoá.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo-Base (l/s)	Pressão (mca)	Piezométrica Disponível (mca)
n01	1.134,37	7,27	14,78	1.149,15
n02	1.133,86	7,22	15,03	1.148,89
n03	1.140,33	7,43	10,42	1.150,75
n04	1.139,28	5,13	11,94	1.151,22
n05	1.129,80	2,89	19,36	1.149,16
n06	1.138,33	3,00	12,50	1.150,83
n07	1.140,86	5,03	12,03	1.152,89
n08	1.143,50	7,74	11,42	1.154,92
n09	1.138,89	8,13	16,03	1.154,92
n10	1.135,60	5,72	18,83	1.154,43
n11	1.131,21	4,49	23,21	1.154,42
n12	1.127,88	3,27	26,37	1.154,25
n13	1.147,19	5,29	11,89	1.159,08
n14	1.148,13	8,35	10,37	1.158,50
n15	1.150,40	6,47	10,00	1.160,40
n16	1.150,78	7,79	10,96	1.161,74
n16a	1.151,41	0,00	11,12	1.162,53
n17	1.147,27	7,38	10,99	1.158,26
n18	1.143,37	5,09	12,45	1.155,82
n20	1.105,08	5,05	20,75	1.125,83
n21	1.098,24	6,85	18,45	1.116,69
n22	1.100,87	16,71	14,03	1.114,90
n23	1.109,07	6,77	12,28	1.121,35
n24	1.112,76	6,77	14,06	1.126,82
n25	1.108,21	7,79	16,84	1.125,05
n26	1.117,59	5,42	13,74	1.131,33
n27	1.127,09	4,60	14,22	1.141,31
n28	1.130,32	2,58	15,42	1.145,74
n29	1.128,62	3,48	18,79	1.147,41
n30	1.121,73	6,51	18,78	1.140,51
n31	1.115,31	4,78	18,65	1.133,96
n32	1.125,14	5,48	14,10	1.139,24
n33	1.112,61	4,35	23,81	1.136,42
n34	1.122,70	4,82	23,70	1.146,40
n35	1.118,76	3,82	24,79	1.143,55
n36	1.129,96	5,55	15,18	1.145,14
n37	1.112,30	4,06	31,68	1.143,98
n38	1.134,47	0,99	10,61	1.145,08
n39	1.126,00	1,41	18,27	1.144,27

Tabela 4.37 - Dados nos trechos da rede Paranoá.

Trecho	Comprimento (m)	Vazão (l/s)	DI	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)
t01	300,00	1,8839	100	0,2399	0,26
t02	270,00	-110,041	300	1,5568	2,07
t03	550,00	-6,9029	100	0,8789	5,28
t04	236,00	107,79	300	1,5249	1,74
t05	360,00	-3,4226	100	0,4358	1,86
t06	300,00	-1,9135	100	0,2436	0,27
t07	150,00	-7,591	150	0,4296	0,47
t08	450,00	-3,2617	200	0,1038	0,07
t09	220,00	-103,9794	250	2,1182	3,69
t09e	220,00	-18,7826	150	1,0629	3,69
t10	340,00	-4,8035	100	0,6116	1,67
t11	90,00	-11,0651	100	1,4088	2,07
t12	450,00	-4,5846	100	0,5837	2,02
t13	250,00	-11,5105	100	1,4656	6,18
t14	220,00	0,1471	100	0,0187	0,00
t15	240,00	-97,6446	250	1,9892	3,59
t15e	240,00	-37,5891	200	1,1965	3,59
t16	200,00	14,128	200	0,4497	0,49
t17	280,00	2,774	100	0,3532	0,50
t18	480,00	-24,8849	200	0,7921	3,34
t19	310,00	1,5052	100	0,1916	0,18
t20	220,00	1,7648	100	0,2247	0,17
t21	520,00	-3,4809	100	0,4432	1,40
t22	430,00	2,376	100	0,3025	0,57
t23	150,00	-19,1765	150	1,0852	1,32
t24	200,00	-101,9581	250	2,0771	3,24
t24e	200,00	-39,2496	200	1,2493	3,24
t25	360,00	-25,6465	200	0,8164	1,34
t26	200,00	40,8358	200	1,2998	3,48
t27a	29,52	-215,48	300	3,0484	0,79
t27b	750,48	-215,48	400	1,7147	4,92
t28	170,00	8,5709	100	1,0913	2,43
t29	300,00	12,8843	100	1,6405	9,14
t30	230,00	-4,4641	100	0,5684	0,98
t31	320,00	-13,4702	100	1,7151	10,59
t32	240,00	6,0343	100	0,7683	1,79
t33	300,00	-10,6757	100	1,3593	6,45
t34	370,00	-8,7164	100	1,1098	5,47
t35	250,00	-8,7294	100	1,1114	3,70
t36	200,00	-19,9504	100	2,5402	13,69
t37	130,00	-16,5194	100	2,1033	6,28
t38	310,00	-13,2716	100	1,6898	9,98
t39	180,00	-8,6678	100	1,1036	2,63
t40	150,00	-36,7994	150	2,0824	4,43
t41	240,00	18,9278	150	1,0711	2,07
t42	50,00	-39,3793	150	2,2284	1,67
t43	250,00	35,4795	150	2,0077	6,90
t44	210,00	29,4512	200	0,9375	1,01
t45	260,00	9,019	100	1,1483	4,09
t46	160,00	-13,4478	100	1,7122	5,28
t47	240,00	-8,8012	100	1,1206	7,13
t48	130,00	10,7799	100	1,3725	2,85
t49	260,00	13,8512	150	0,7838	1,26

A Figura 4.25 apresenta o relatório com o resumo dos principais dados de entrada e de saída do dimensionamento otimizado.

EficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água			
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Fixa			
Paranoá			
Dados de Entrada		Sobre o Processamento	
Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca)	10,00	Data:	05/03/2007
Cota Piezométrica na cabeceira (m)	1.167,45	Número de iterações.....	034
Quantidade de nós da rede (unid)	039	Tempo das iterações.....	00:14:10
Quantidade de trechos da rede (unid)	058	Tempo div. do trecho.....	00:00:13
		Total.....	00:14:23
Faixa de Pressões na Rede		Sistema Operacional e Hardware	
Mínima (mca) n15	10,00	Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)	
Máxima (mca) n37	31,68	AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+	
		Memória RAM: 1024 Mb	
Faixa de Velocidades na Rede			
Mínima (m/s) t14	0,02		
Máxima (m/s) t27a	3,05		
<hr/>			
Componente	Custo em \$		
Tubulações	40.710.348,80		
\$ = Unidades Monetárias			

Figura 4.25 – Relatório Resumo para a rede Paranoá.

Comparando os resultados obtidos com a utilização do método de dimensionamento otimizado EficientE, em relação a outros métodos que dimensionaram a mesma rede, considerando fatores econômicos, conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado satisfatório em termos econômicos superando o menor valor \$ 39.698.272,00 obtido por Lopes (2002) em 2,55%, além de ter apresentado valores limites para pressão (máx. n37 = 31,68 mca) e velocidades (mín. t14 = 0,002 m/s e máx. t27a = 3,05 m/s) compatíveis com as normas vigentes. As Tabelas 4.38, 4.39 e 4.40, mostram as comparações dos valores das pressões, diâmetros utilizados nos trechos e valores de custo encontradas por Lopes (2002) e do modelo EficientE proposto.

Faz-se necessário registrar, que o método GLOBAL de Lopes (2002), que obteve os melhores resultados, em termos econômicos, em relação ao método proposto, utilizou o artifício de divisão de trechos dezenove vezes, enquanto o método EficientE só utilizou este recurso uma única vez, para regulação da pressão mínima no nó mais desfavorável, para que ele atingisse exatamente a pressão mínima estabelecida para a rede.

Tabela 4.38 – Comparativo com outros estudos para a rede Paranoá – pressões.

Nó	Pressão (mca)		Nó	Pressão (mca)	
	GLOBAL	EficientE		GLOBAL	EficientE
n01	17,65	14,78	n21	20,12	18,45
n02	17,65	15,03	n22	15,53	14,03
n03	12,63	10,42	n23	13,46	12,28
n04	15,57	11,94	n24	15,92	14,06
n05	21,89	19,36	n25	17,36	16,84
n06	14,64	12,50	n26	13,62	13,74
n07	13,47	12,03	n27	18,12	14,22
n08	13,45	11,42	n28	19,12	15,42
n09	17,80	16,03	n29	21,66	18,79
n10	20,64	18,83	n30	21,45	18,78
n11	24,96	23,21	n31	16,87	18,65
n12	28,15	26,37	n32	10,00	14,10
n13	10,73	11,89	n33	25,85	23,81
n14	11,73	10,37	n34	26,61	23,70
n15	10,00	10,00	n35	26,02	24,79
n16	11,71	10,96	n36	14,53	15,18
n17	12,17	10,99	n37	31,95	31,68
n18	13,94	12,45	n38	10,00	10,61
n19	00,00	00,00	n39	18,26	18,27
n20	22,57	20,75			

Tabela 4.39 – Comparativo com outros estudos para a rede Paranoá – diâmetros.

Trecho	GLOBAL		EficientE		Trecho	GLOBAL		EficientE	
	DN	L(m)	DN	L(m)		DN	L(m)	DN	L(m)
t01	100	300,00	100	300,00	t27	400 500	745,29 34,71	300 400	29,52 750,48
t02	250 300	62,12 207,88	300	270,00	t28	100 150	160,90 9,10	100	170,00
t03	100	550,00	100	550,00	t29	100 150	292,23 7,77	100	300,00
t04	300	236,00	300	236,00	t30	100	230,00	100	230,00
t05	100	360,00	100	360,00	t31	100	320,00	100	320,00
t06	100	300,00	100	300,00	t32	100	240,00	100	240,00
t07	200	150,00	150	150,00	t33	100	300,00	100	300,00
t08	150	450,00	200	450,00	t34	100	370,00	100	370,00
t09	300 400	212,89 7,11	250	220,00	t35	100	250,00	100	250,00
t9e	200	150,00	150	220,00	t36	100 150	199,07 0,93	100	200,00
t10	100 150	300,10 39,90	100	340,00	t37	100 150	129,24 0,76	100	130,00
t11	100 150	88,19 1,81	100	90,00	t38	100 150	308,26 1,74	100	310,00
t12	100 150	430,98 19,02	100	450,00	t39	100	180,00	100	180,00
t13	100	250,00	100	250,00	t40	150	150,00	150	150,00
t14	100	220,00	100	220,00	t41	100	240,00	150	240,00
t15	300	240,00	250	240,00	t42	150 200	18,44 31,56	150	50,00
t15e	300	240,00	200	240,00	t43	150 200	236,38 13,62	150	250,00
t16	200	200,00	200	200,00	t44	200	210,00	200	210,00
t17	100 150	260,20 19,80	100	280,00	t45	100	260,00	100	260,00
t18	200	480,00	200	480,00	t46	100	160,00	100	160,00
t19	100	310,00	100	310,00	t47	100	240,00	100	240,00
t20	100	220,00	100	220,00	t48	100 150	124,72 5,28	100	130,00
t21	100	520,00	100	520,00	t49	100 150	255,30 4,70	150	260,00
t22	100	430,00	100	430,00	t50	100	260,00	100	260,00
t23	100	150,00	150	150,00	t51	100	190,00	100	190,00
t24	300 400	178,82 21,18	250	200,00	t52	200	200,00	200	200,00
t24e	200	200,00	200	200,00	t53	100	260	100	260,00
t25	150 200	335,23 24,77	200	360,00	t54	100 150	271,36 18,64	100	290,00
t26	200	200,00	200	200,00					

Tabela 4.40 – Resultados obtidos por outros estudos para rede Paranoá – custos.

Estudo	Custo \$
ETEP (custo estimado)	66.004.452,00
Modelo Global* (unificação por maiores diâmetros)	50.831.136,22
EficientE	40.710.348,80
Modelo Global* (trechos duplos ajustados)	39.816.160,25
Modelo Global* (unificação por maiores comprimentos)	39.698.272,00

*Modelo Global (LOPES, 2002).

4.2.5 Rede Exemplo 5

4.2.5.1 Grande Setor – Cota de Alimentação Variável

Exemplo 5.3.1 do livro de Gomes (2004), 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 (Figura 4.26). 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, que impulsionará a água para o reservatório. Portanto, este caso enquadra-se na situação de contorno cota piezométrica de cabeceira variável.

A pressão mínima imposta aos nós do Grande Setor é de 25 mca. As velocidades máximas e mínimas admitidas nos trechos da rede são 3,0m/s e 0,2m/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. A altura manométrica será considerada variável, com o propósito de otimizar, também, a altura do reservatório em relação ao nível do terreno (Tabela 4.41). Os demais dados necessários referentes aos nós e trechos da rede estão apresentados na Tabela 4.42.

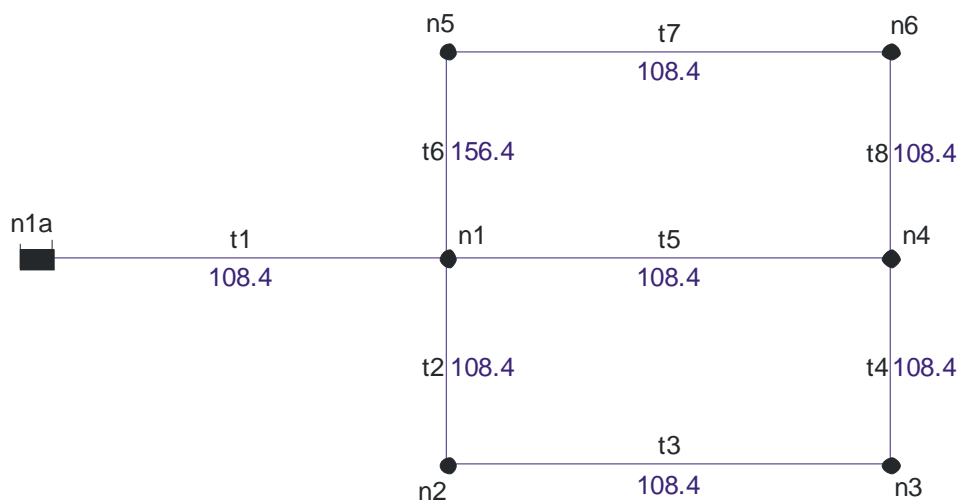


Figura 4.26 – Configuração da rede Grande Setor.

Tabela 4.41 – Custo das tubulações para a rede Grande Setor.

Codigo	DN	DI	Rugosidade	Tubo	Custo da Implantação	Limitador
0	100	108.4	145	PVC	47.09	<input type="checkbox"/>
1	150	156.4	145	PVC	63.8	<input type="checkbox"/>
2	200	204.2	145	PVC	87.62	<input type="checkbox"/>
3	250	252	145	PVC	118.59	<input type="checkbox"/>
4	300	299.8	145	PVC	152.24	<input type="checkbox"/>
5	350	366.2	130	FoFo	317.86	<input type="checkbox"/>
6	400	416.4	130	FoFo	375	<input type="checkbox"/>
7	450	466.6	130	FoFo	436.23	<input type="checkbox"/>
8	500	518	130	FoFo	515.6	<input type="checkbox"/>
9	600	619.6	130	FoFo	640.3	<input checked="" type="checkbox"/>

Copiar os valores da coluna DN para DI

Fechar

Tabela 4.42 - 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.

Com base nestes parâmetros fornecidos, deve-se preencher o formulário de configurações do software EficientE (Figura 4.27), para que seja calculado o Gradiente Energético – Ge. Também deverão ser fornecidas a pressão mínima exigida nos nós da rede e a cota do terreno na cabeceira.

Figura 4.27 – Configurações de contorno da rede Grande Setor.

Ao clicar no botão “Calcular (Ge) com base nos dados fornecidos”, obtém-se o valor do Ge para a rede, obtido pela Equação (3.3). Feito isto, basta clicar no botão “Setar valores” e fechar o formulário.

Após a construção do traçado da rede com todos os seus trechos configurados com o diâmetro mínimo disponibilizado DN 100 e demais dados fornecidos para a realização das configurações necessárias, bem como a configuração da cota piezométrica de cabeceira inicial da rede como sendo zero (critério estabelecido pelo método proposto), executa-se o dimensionamento. Após a execução do processo de dimensionamento otimizado, o método determina a cota piezométrica na cabeceira de modo que a pressão no nó mais desfavorável da rede (n3) atinja o valor exato exigido para a pressão mínima da rede 25 mca (ver Figura 4.28). Esta pressão mínima elevada justifica-se, pois esta rede alimentará um Setor Secundário.

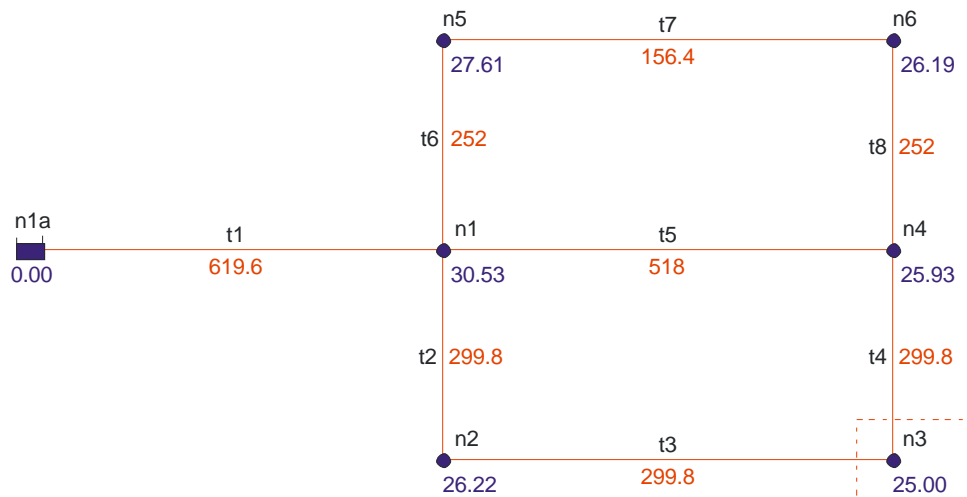


Figura 4.28 – Rede Grande Setor dimensionada.

No processo de dimensionamento otimizado efetuado, a cada iteração verifica-se se a condição de parada foi estabelecida. Esta condição de parada consiste na comparação do Gp^* com o Ge calculado para a rede. Se $Gp^* \geq Ge$, significa que o dimensionamento atingiu o seu custo ótimo. A Tabela 4.43, mostra a iteração 36, onde o Gp^* calculado foi de \$ 64.868,2464, sendo, portanto, inferior ao Ge calculado que foi \$ 89.324,72. Na iteração 37 (Tabela 4.44), mostra que a condição de parada foi finalmente estabelecida: $Gp^* = \$ 108.879,5781 > Ge = \$ 89.324,72$. A Tabela 4.45 mostra a iteração 38, que corresponde à finalização do dimensionamento que deu subsídios para montagem da solução otimizada para a rede.

Estabelecida a condição de parada, o método calcula a cota piezométrica final para a cabeceira, que para a rede foi de 43,35 mca. Essa cota é calculada somando-se a pressão (em módulo) encontrada no nó mais desfavorável da rede ($n3 = -18,35$) - referente à iteração 37, valor da coluna “Pressão Antes” (Tabela 4.44), com a pressão mínima exigida para os nós da rede (25 mca). Com esta cota, a rede é pressurizada de modo a atender à pressão mínima estabelecida em todos os seus nós. Também se faz necessário determinar a cota manométrica na cabeceira, pois ela é um dos parâmetros necessários para se calcular o custo da componente energia. A cota manométrica é determinada, subtraindo-se da cota piezométrica final da cabeceira a cota do terreno. Destarte, a cota manométrica calculada para a rede vale 13,35 m. Multiplicando-se a cota manométrica pelo Ge , determina-se o custo da componente energia para o Grande Setor: \$ 1.192.399,71. O custo da componente tubulações corresponde ao valor da soma da coluna “Preço DN Atual Total”: \$ 3.375.240,40, apresentado nas Tabelas

4.44 e 4.45. Por conseguinte, o valor total para o sistema será: \$ 4.567.639,71. Todos estes parâmetros e valores aqui apresentados e explicados, além de outros dados relevantes sobre a rede, tais como: pressão máxima, velocidades máxima e mínima, sistema operacional e hardware utilizado no processamento, são sinteticamente montados no relatório resumo gerado pelo programa para esta situação de contorno, estão na Figura 4.29.

Tabela 4.43 – Iteração-36 para o dimensionamento do Grande Setor.

Iteração: 36 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 0,00 **Nó mais desfavorável:** n3

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	600	600	2.540,00	640,30	1.626.362,00	640,30	1.626.362,00	0,00	-20,17	-20,17	0,00	0,0000
t2	300	350	1.230,00	152,24	187.255,20	317,86	390.967,80	203.712,60	-20,17	-18,98	1,20	170.143,3225
t3	300	350	1.430,00	152,24	217.703,20	317,86	454.539,80	236.836,60	-20,17	-19,79	0,38	616.922,6361
t4	300	350	1.300,00	152,24	197.912,00	317,86	413.218,00	215.306,00	-20,17	-19,83	0,34	635.308,3505
t5	450	500	1.490,00	436,23	649.982,70	515,60	768.244,00	118.261,30	-20,17	-18,35	1,82	64.868.2464
t6	250	300	1.210,00	118,59	143.493,90	152,24	184.210,40	40.716,50	-20,17	-20,06	0,11	372.861,7216
t7	150	200	1.460,00	63,80	93.148,00	87,62	127.925,20	34.777,20	-20,17	-20,01	0,17	207.377,4597
t8	250	300	1.190,00	118,59	141.122,10	152,24	181.165,60	40.043,50	-20,17	-20,21	0,03	1.188.234,4214
Custo Total Atual (\$)				3.256.979,10								

Tabela 4.44 – Iteração-37 para o dimensionamento do Grande Setor.

Iteração: 37 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 0,00 **Nó mais desfavorável:** n3

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	600	600	2.540,00	640,30	1.626.362,00	640,30	1.626.362,00	0,00	-18,35	-18,35	0,00	0,0000
t2	300	350	1.230,00	152,24	187.255,20	317,86	390.967,80	203.712,60	-18,35	-17,30	1,05	194.159,9314
t3	300	350	1.430,00	152,24	217.703,20	317,86	454.539,80	236.836,60	-18,35	-18,09	0,26	911.611,2394
t4	300	350	1.300,00	152,24	197.912,00	317,86	413.218,00	215.306,00	-18,35	-17,79	0,56	381.883,6467
t5	500	600	1.490,00	515,60	768.244,00	640,30	954.047,00	185.803,00	-18,35	-16,64	1,71	108.879,5781
t6	250	300	1.210,00	118,59	143.493,90	152,24	184.210,40	40.716,50	-18,35	-18,28	0,07	575.091,8079
t7	150	200	1.460,00	63,80	93.148,00	87,62	127.925,20	34.777,20	-18,35	-18,28	0,06	540.018,6335
t8	250	300	1.190,00	118,59	141.122,10	152,24	181.165,60	40.043,50	-18,35	-18,38	0,03	1.263.201,8927
Custo Total Atual (\$)				3.375.240,40								

Tabela 4.45 – Iteração-38 para o dimensionamento do Grande Setor.

Iteração: 38 **Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):** 43,35 **Nó mais desfavorável:** n3

Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t1	600	600	2.540,00	640,30	1.626.362,00	640,30	1.626.362,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t2	300	300	1.230,00	152,24	187.255,20	152,24	187.255,20	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t3	300	300	1.430,00	152,24	217.703,20	152,24	217.703,20	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t4	300	300	1.300,00	152,24	197.912,00	152,24	197.912,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t5	500	500	1.490,00	515,60	768.244,00	515,60	768.244,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t6	250	250	1.210,00	118,59	143.493,90	118,59	143.493,90	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t7	150	150	1.460,00	63,80	93.148,00	63,80	93.148,00	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
t8	250	250	1.190,00	118,59	141.122,10	118,59	141.122,10	0,00	25,00	25,00	0,00	0,0000
Custo Total Atual (\$)				3.375.240,40								

EficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Variável
Grande Setor

Dados de Entrada

Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca) 25,00
 Cota do terreno na cabeceira (m) 30,00
 Quantidade de nós da rede (unid) 006
 Quantidade de trechos da rede (unid) 008
 Gradiente Energético (\$/m) 89.324,72

Sobre o Processamento

Data: 05/03/2007
 Número de iterações..... 038
 Tempo das iterações..... 00:00:48

Cotas Determinadas na Cabeceira

Piezométrica (m) 43,35
 Manométrica (m) 13,35

Faixa de Pressões na Rede

Mínima (mca) n3 25,00
 Máxima (mca) n1 30,53

Faixa de Velocidades na Rede

Mínima (m/s) t7 0,45
 Máxima (m/s) t1 1,39

Sistema Operacional e Hardware

Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)
 AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+
 Memória RAM: 1024 Mb

Componentes	Custo em \$
Tubulações	3.375.240,40
Energia	1.192.399,31
Total	4.567.639,71

\$ = Unidades Monetárias

Figura 4.29 – Relatório Resumo para o Grande Setor.

Os dados referentes aos nós e trechos da rede, após o dimensionamento, relativos à configuração final ocorrida na iteração 38, estão relacionados nas Tabelas 4.46 e 4.47.

Tabela 4.46 - Dados nos nós da rede Grande Setor.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo-Base (l/s)	Pressão (mca)	Piezométrica Disponível (mca)
n1	6,00	0,00	30,53	36,53
n2	5,50	47,78	26,22	31,72
n3	5,50	80,32	25,00	30,50
n4	6,00	208,60	25,93	31,93
n5	4,50	43,44	27,61	32,11
n6	4,00	40,29	26,19	30,19

Tabela 4.47 - Dados nos trechos da rede Grande Setor.

Trecho	Comprimento (m)	Vazão (l/s)	DI	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)
t1	2.540,00	-420,43	619,6	1,3944	6,82
t2	1.230,00	85,1874	299,8	1,2068	4,81
t3	1.430,00	37,4074	299,8	0,5299	1,22
t4	1.300,00	-42,9126	299,8	0,6079	1,43
t5	1.490,00	-283,2517	518	1,3441	4,60
t6	1.210,00	-51,9909	252	1,0424	4,42
t7	1.460,00	8,5509	156,4	0,4451	1,93
t8	1.190,00	-31,7391	252	0,6364	1,74

Comparando os resultados obtidos com a utilização do método de dimensionamento otimizado EficientE, em relação ao método PNL2000 utilizado por Gomes (2004), para o dimensionamento da mesma rede, conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado mais vantajoso em termos econômicos, tanto para componente energia como para a componente tubulações, reduzindo o valor de custo do sistema em 16,54% (ver Tabela 4.50).

Tabela 4.48 – Métodos PNL2000 e EficientE aplicados ao Grande Setor – pressões.

Nó	Pressão (mca)	
	PNL2000	EficientE
n1	34,72	30,53
n2	30,53	26,22
n3	27,46	25,00
n4	25,00	25,93
n5	33,70	27,61
n6	28,45	26,19

Tabela 4.49 – Métodos PNL2000 e EficientE aplicados ao Grande Setor – diâmetros.

Trecho	PNL2000		EficientE	
	DI	L(m)	DI	L (m)
t1	619,60	2.540	619,60	2.540
t2	416,40	1.230	299,80	1.230
t3	416,40	1.430	299,80	1.430
t4	299,80	1.300	299,80	1.300
t5	299,80	1.490	518,00	1.490
t6	416,40	1.210	252,00	1.210
t7	299,80	1.460	156,40	1.460
t8	299,80	1.190	252,00	1.190

Tabela 4.50 – Métodos PNL2000 e EficientE aplicados ao Grande Setor – custos.

Componente	PNL2000	EficientE
Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40
Energia	1.566.782,30	1.192.399,31
Total \$	5.472.579,90	4.567.639,71

\$ = Unidades Monetárias

Esta é a primeira parte do cálculo do sistema, correspondente ao Grande Setor. No tópico seguinte, será calculado o dimensionamento para o Setor Secundário.

4.2.5.2 Setor Secundário – Cota de Alimentação Fixa

Exemplo 5.3.2 do livro de Gomes (2004), que trata do dimensionamento de um sistema de abastecimento de água, composto por quatro anéis, alimentados pelo nó n4 do Grande Setor (aqui nomeado de Rn4). O problema resume-se em dimensionar com o menor custo possível, a rede apresentada na Figura 4.30. A pressão mínima requerida para os nós é de 15 mca. Os dados sobre os tubos são os mesmos utilizados para o Grande Setor, item 4.2.5.1, Tabela 4.39. A cota piezométrica de alimentação do setor secundário coincide com a cota piezométrica do nó n4 do Grande Setor, obtida no dimensionamento efetuado, cujo valor encontrado foi de 25,93 mca (ver Figura 4.28). Os dados necessários referentes aos nós e trechos da rede para o dimensionamento, encontram-se na Tabela 4.51.

Neste caso a rede se enquadra na situação de contorno cota piezométrica de cabeceira fixa. Como no Setor Secundário a água já é pressurizada, não haverá a necessidade de bombeamento, portanto, o custo do sistema será função apenas dos diâmetros e das vazões nos trechos da rede. Face ao exposto, não haverá a componente energia.

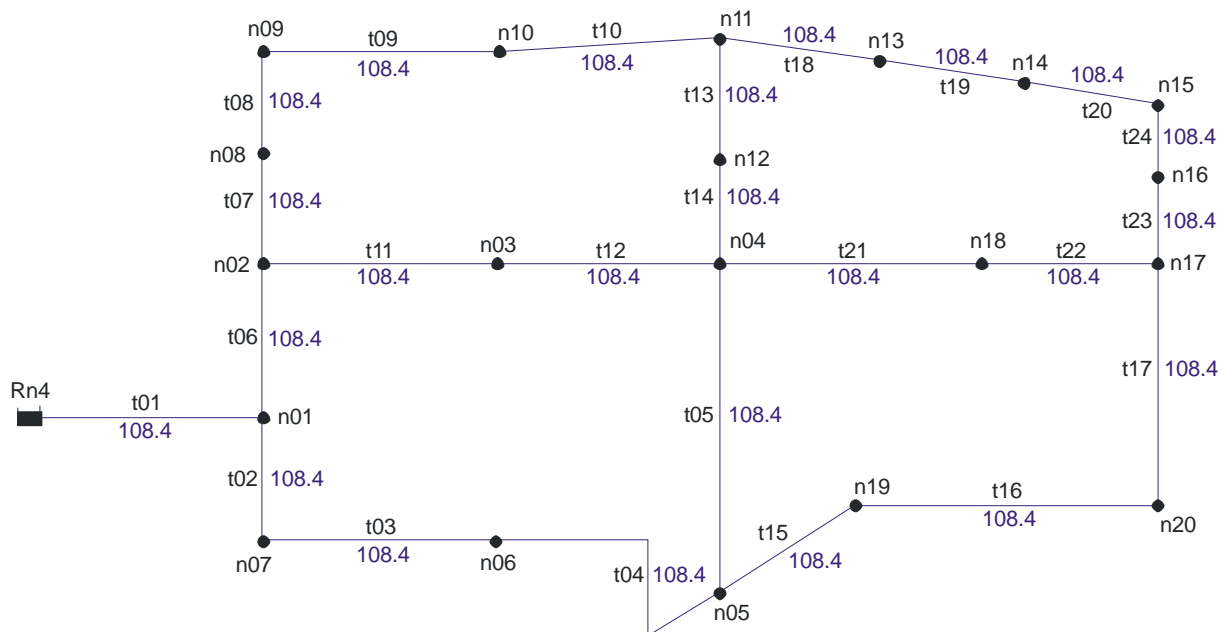


Figura 4.30 – Configuração da rede Setor Secundário.

Tabela 4.51 – Dados referentes aos nós e trechos para a rede Setor Secundário.

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

Após o cadastramento da rede, utilizando em todos os seus trechos a tubulação de menor diâmetro disponibilizado, no caso DN 100 e efetuadas todas as configurações dos nós, inicia-se o processo de importação/abertura da rede, bem como as suas configurações específicas que o programa requer. Em seguida, escolhe-se a situação de contorno adequada à rede, no caso pela cota piezométrica de cabeceira fixa, conforme Figura 4.31. Finalmente, executa-se o processo de dimensionamento iterativo de otimização para a rede.

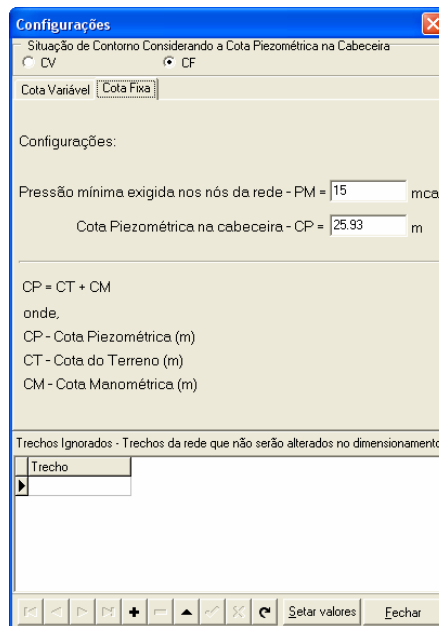


Figura 4.31 – Configurações de contorno da rede Setor Secundário.

Após o dimensionamento atingir a condição de parada na iteração 65, houve uma folga de pressão de 0,01 mca no nó mais desfavorável da rede (n18), conforme apresentado na Figura 4.32.

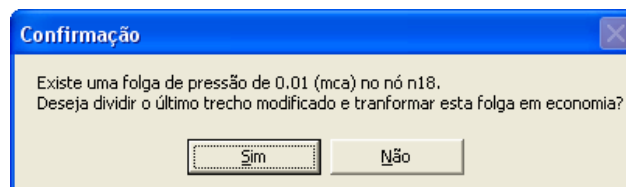


Figura 4.32 – Rede Setor Secundário, tela de confirmação (folga de pressão).

Como o objetivo é conseguir o máximo de economia, após a confirmação e execução do procedimento de cálculo de otimização, para esta etapa, a rede sofreu uma reconfiguração, onde o último trecho modificado (t04) que ocorreu na iteração 64 foi dividido em dois trechos (t04a) e (t04b), através da criação do nó intermediário (n06a). As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam a situação da rede antes e depois da reconfiguração, respectivamente.

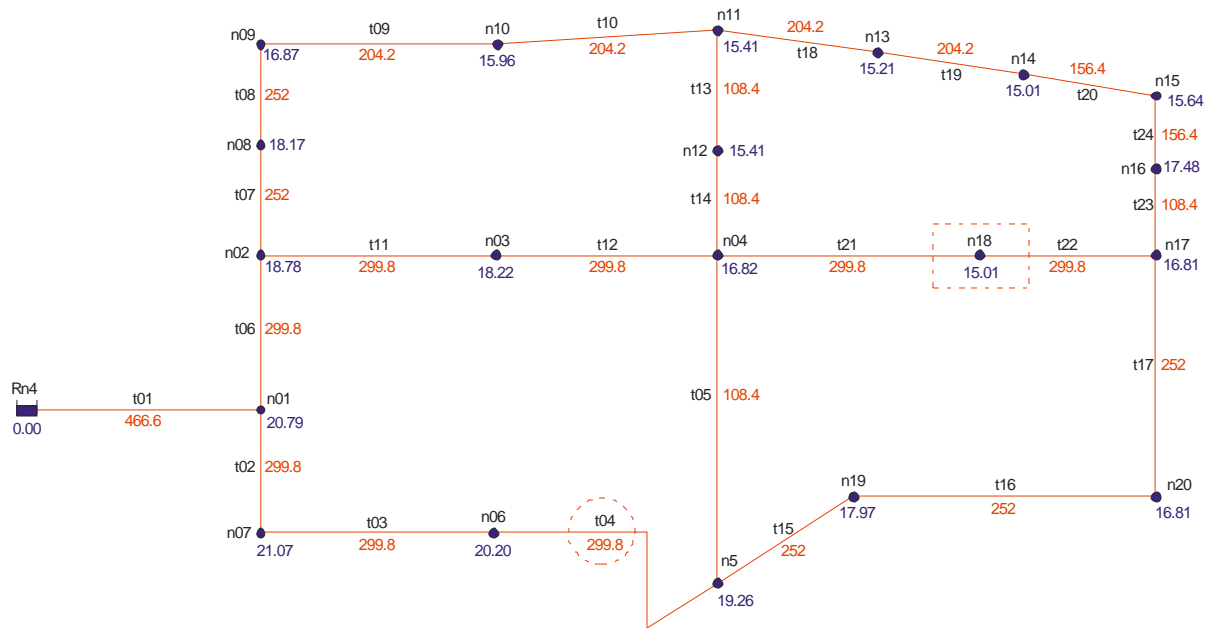


Figura 4.33 – Rede Setor Secundário dimensionada com folga de pressão.

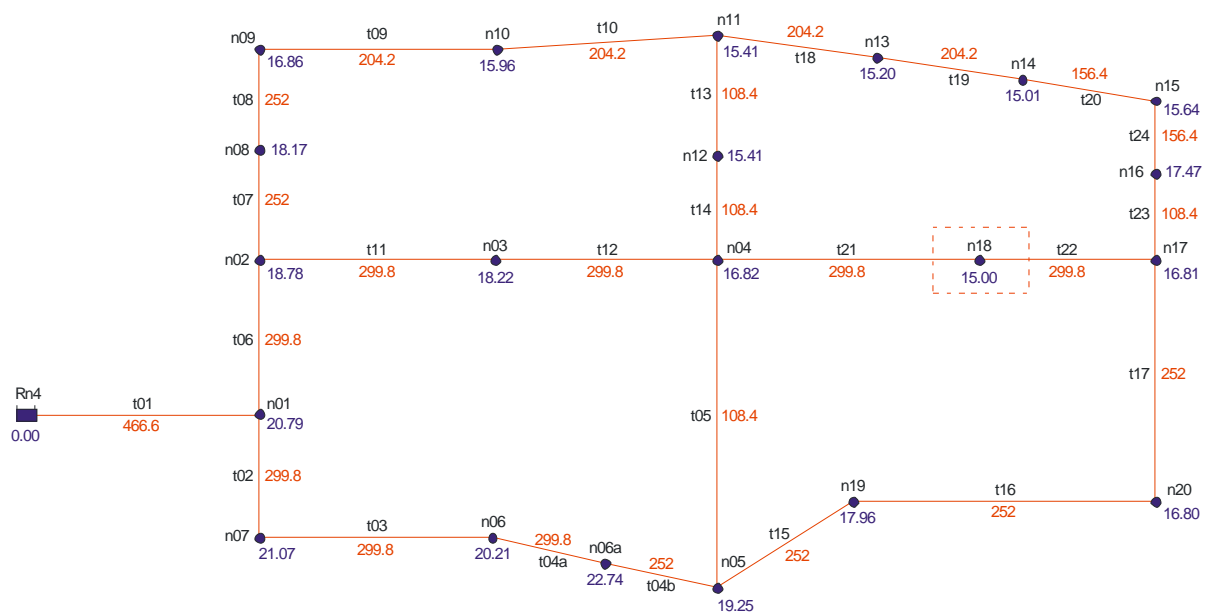


Figura 4.34 – Rede Setor Secundário dimensionada sem folga de pressão.

Satisfeitas as condições limites para o dimensionamento, faz-se necessário explicar em detalhes como ocorreu a convergência do dimensionamento, bem como a definição do custo final para a rede. Na iteração 64, apresentada na Tabela 4.52, ocorreu a última substituição referente às tubulações, ou seja, no trecho (t04) onde ocorreu o Gp*, que passou do DN 250 para DN 300. Com esta substituição efetivada na iteração 65 (ver Tabela 4.53), foi atingida a condição de parada, pois a pressão no nó mais desfavorável da rede (n18) superou a pressão mínima estabelecida (25 mca) para os nós da rede em 0,01 mca. No caso da não aceitação da otimização da folga em questão, o custo para a rede seria representado pelo Custo Total Atual totalizado na iteração 65: \$ 758.683,35. Como se optou por aceitar o procedimento de otimização para transformação da folga de pressão em economia, o custo para rede é representado pelo Custo Total Atual totalizado na iteração 66: \$ 758.529,57 (Tabela 4.54). Portanto, a diminuição no custo em unidades monetárias foi de: \$ 153,78 que equivale a uma redução percentual de 0,02%.

Tabela 4.52 – Iteração-64 para o dimensionamento da rede Setor Secundário.

Iteração: 64		Cota Piezométrica na Cabeceira (mca): 25,93				Nó mais desfavorável: n18						
Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)
				Unitário	Total	Unitário	Total					
t01	450	500	220,00	436,23	95.970,60	515,60	113.432,00	17.461,40	14,62	14,88	0,26	68.261,9234
t02	300	350	190,00	152,24	28.925,60	317,86	60.393,40	31.467,80	14,62	14,73	0,11	283.238,5239
t03	300	350	295,00	152,24	44.910,80	317,86	93.768,70	48.857,90	14,62	14,76	0,13	362.716,4068
t04	250	300	390,00	118,59	46.250,10	152,24	59.373,60	13.123,50	14,62	15,01	0,38	34.140,2185
t05	100	150	370,00	47,09	17.423,30	63,80	23.606,00	6.182,70	14,62	14,87	0,05	116.435,0282
t06	300	350	190,00	152,24	28.925,60	317,86	60.393,40	31.467,80	14,62	15,24	0,62	50.697,2773
t07	250	300	310,00	118,59	36.762,90	152,24	47.194,40	10.431,50	14,62	14,86	0,04	270.246,1140
t08	250	300	205,00	118,59	24.310,95	152,24	31.209,20	6.898,25	14,62	14,84	0,02	361.164,9215
t09	200	250	305,00	87,62	26.724,10	118,59	36.169,95	9.445,85	14,62	14,89	0,07	134.364,8649
t10	200	250	295,00	87,62	25.847,90	118,59	34.984,05	9.136,15	14,62	14,86	0,04	215.984,6336
t11	300	350	300,00	152,24	45.672,00	317,86	95.358,00	49.686,00	14,62	15,01	0,39	128.255,0336
t12	300	350	290,00	152,24	44.149,60	317,86	92.179,40	48.029,80	14,62	14,95	0,33	145.017,5121
t13	100	150	180,00	47,09	8.476,20	63,80	11.484,00	3.007,80	14,62	14,62	0,00	30.078.000,0000
t14	100	150	315,00	47,09	14.833,35	63,80	20.097,00	5.263,65	14,62	14,59	0,03	203.229,7297
t15	250	300	300,00	118,59	35.577,00	152,24	45.672,00	10.095,00	14,62	14,81	0,19	53.469,2797
t16	250	300	295,00	118,59	34.984,05	152,24	44.910,80	9.926,75	14,62	14,79	0,17	58.877,5208
t17	250	300	215,00	118,59	25.496,85	152,24	32.731,60	7.234,75	14,62	14,62	0,00	1.955.337,8378
t18	200	250	140,00	87,62	12.266,80	118,59	16.602,60	4.335,80	14,62	14,63	0,01	578.106,6667
t19	200	250	220,00	87,62	19.276,40	118,59	26.089,80	6.813,40	14,62	14,63	0,01	920.729,7297
t20	150	200	220,00	63,80	14.036,00	87,62	19.276,40	5.240,40	14,62	14,64	0,02	302.913,2948
t21	300	350	285,00	152,24	43.388,40	317,86	90.590,10	47.201,70	14,62	14,96	0,34	138.787,7095
t22	300	350	300,00	152,24	45.672,00	317,86	95.358,00	49.686,00	14,62	14,48	0,14	348.673,6842
t23	100	150	315,00	47,09	14.833,35	63,80	20.097,00	5.263,65	14,62	14,64	0,02	307.815,7895
t24	150	200	170,00	63,80	10.846,00	87,62	14.895,40	4.049,40	14,62	14,63	0,01	525.896,1039
				Custo Total Atual (\$)		745.559,85						

Tabela 4.53 – Iteração-65 para o dimensionamento da rede Setor Secundário.

Iteração:		65		Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):				25,93				Nó mais desfavorável: n18			
Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)			
				Unitário	Total	Unitário	Total								
t01	450	500	220,00	436,23	95.970,60	515,60	113.432,00	17.461,40	15,01	15,26	0,26	68.261,9234			
t02	300	350	190,00	152,24	28.925,60	317,86	60.393,40	31.467,80	15,01	15,14	0,14	230.196,0497			
t03	300	350	295,00	152,24	44.910,80	317,86	93.768,70	48.857,90	15,01	15,17	0,17	291.167,4613			
t04	300	350	390,00	152,24	59.373,60	317,86	123.965,40	64.591,80	15,01	15,19	0,18	352.767,8864			
t05	100	150	370,00	47,09	17.423,30	63,80	23.806,00	6.182,70	15,01	15,11	0,11	57.836,2956			
t06	300	350	190,00	152,24	28.925,60	317,86	60.393,40	31.467,80	15,01	15,56	0,56	56.414,1269			
t07	250	300	310,00	118,59	36.762,90	152,24	47.194,40	10.431,50	15,01	15,04	0,04	296.349,4318			
t08	250	300	205,00	118,59	24.310,95	152,24	31.209,20	6.898,25	15,01	15,02	0,02	396.461,1494			
t09	200	250	305,00	87,62	26.724,10	118,59	36.189,95	9.446,85	15,01	15,07	0,06	150.411,6242			
t10	200	250	295,00	87,62	25.847,90	118,59	34.984,05	9.136,15	15,01	15,04	0,04	244.936,9973			
t11	300	350	300,00	152,24	45.672,00	317,86	95.358,00	49.686,00	15,01	15,36	0,34	146.749,4867			
t12	300	350	290,00	152,24	44.149,60	317,86	92.179,40	48.029,80	15,01	15,29	0,29	165.906,0449			
t13	100	150	180,00	47,09	8.476,20	63,80	11.484,00	3.007,80	15,01	15,01	0,00	30.078.000,0000			
t14	100	150	315,00	47,09	14.833,35	63,80	20.097,00	5.263,65	15,01	14,98	0,03	202.448,0769			
t15	250	300	300,00	118,59	35.577,00	152,24	45.672,00	10.095,00	15,01	15,24	0,24	42.097,5813			
t16	250	300	295,00	118,59	34.984,05	152,24	44.910,80	9.926,75	15,01	15,22	0,22	46.149,4654			
t17	250	300	215,00	118,59	25.496,85	152,24	32.731,60	7.234,75	15,01	15,00	0,00	6.028.958,3333			
t18	200	250	140,00	87,62	12.266,80	118,59	16.602,60	4.335,80	15,01	15,01	0,01	610.676,0563			
t19	200	250	220,00	87,62	19.276,40	118,59	26.089,80	6.813,40	15,01	15,01	0,01	1.116.950,8197			
t20	150	200	220,00	63,80	14.036,00	87,62	19.276,40	5.240,40	15,01	15,02	0,02	331.670,8861			
t21	300	350	285,00	152,24	43.388,40	317,86	90.590,10	47.201,70	15,01	15,31	0,30	155.987,1117			
t22	300	350	300,00	152,24	45.672,00	317,86	95.358,00	49.686,00	15,01	14,86	0,14	352.382,9787			
t23	100	150	315,00	47,09	14.833,35	63,80	20.097,00	5.263,65	15,01	15,02	0,01	511.033,9806			
t24	150	200	170,00	63,80	10.846,00	87,62	14.895,40	4.049,40	15,01	15,01	0,01	604.388,0597			
Custo Total Atual (\$)				758.683,35											

Tabela 4.54 – Iteração-66 para o dimensionamento da rede Setor Secundário.

Iteração:		66		Cota Piezométrica na Cabeceira (mca):				25,93				Nó mais desfavorável: n18			
Trecho	DN Atual	DN Superior	Comprimento (m)	Preço DN Atual (\$)		Preço DN Superior (\$)		Variação de Preço (\$)	Pressão Antes (mca)	Pressão Depois (mca)	Variação de Pressão (mca)	Gp (\$/m)			
				Unitário	Total	Unitário	Total								
t01	450	450	220,00	436,23	95.970,60	436,23	95.970,60	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t02	300	300	190,00	152,24	28.925,60	152,24	28.925,60	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t03	300	300	295,00	152,24	44.910,80	152,24	44.910,80	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t04a	300	300	385,43	152,24	58.677,86	152,24	58.677,86	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t04b	250	250	4,67	118,59	541,96	118,59	541,96	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t05	100	100	370,00	47,09	17.423,30	47,09	17.423,30	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t06	300	300	190,00	152,24	28.925,60	152,24	28.925,60	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t07	250	250	310,00	118,59	36.762,90	118,59	36.762,90	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t08	250	250	205,00	118,59	24.310,95	118,59	24.310,95	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t09	200	200	305,00	87,62	26.724,10	87,62	26.724,10	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t10	200	200	295,00	87,62	25.847,90	87,62	25.847,90	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t11	300	300	300,00	152,24	45.672,00	152,24	45.672,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t12	300	300	290,00	152,24	44.149,60	152,24	44.149,60	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t13	100	100	180,00	47,09	8.476,20	47,09	8.476,20	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t14	100	100	315,00	47,09	14.833,35	47,09	14.833,35	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t15	250	250	300,00	118,59	35.577,00	118,59	35.577,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t16	250	250	295,00	118,59	34.984,05	118,59	34.984,05	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t17	250	250	215,00	118,59	25.496,85	118,59	25.496,85	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t18	200	200	140,00	87,62	12.266,80	87,62	12.266,80	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t19	200	200	220,00	87,62	19.276,40	87,62	19.276,40	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t20	150	150	220,00	63,80	14.036,00	63,80	14.036,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t21	300	300	285,00	152,24	43.388,40	152,24	43.388,40	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t22	300	300	300,00	152,24	45.672,00	152,24	45.672,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t23	100	100	315,00	47,09	14.833,35	47,09	14.833,35	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
t24	150	150	170,00	63,80	10.846,00	63,80	10.846,00	0,00	15,00	15,00	0,00	0,0000			
Custo Total Atual (\$)				758.529,57											

A Figura 4.35 apresenta o relatório com o resumo dos principais dados de entrada e de saída do dimensionamento otimizado.

EfficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Fixa
Setor Secundario

Dados de Entrada

Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca) 15,00
 Cota Piezométrica na cabeceira (m) 25,93
 Quantidade de nós da rede (unid) 021
 Quantidade de trechos da rede (unid) 025

Faixa de Pressões na Rede

Mínima (mca) n18 15,00
 Máxima (mca) n06a 22,74

Faixa de Velocidades na Rede

Mínima (m/s) t13 0,00
 Máxima (m/s) t06 1,77

Sobre o Processamento

Data: 08/03/2007
 Número de iterações..... 066
 Tempo das iterações..... 00:06:19
 Tempo div. do trecho..... 00:00:06
 Total..... 00:06:25

Sistema Operacional e Hardware

Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)
 AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+
 Memória RAM: 1024 Mb

Componente **Custo em \$**
 Tubulações **758.529,57**

\$ = Unidades Monetárias

Figura 4.35 – Relatório Resumo para a rede Setor Secundário.

Os dados referentes aos nós e trechos da rede, após o dimensionamento, relativos à configuração final ocorrida na iteração 66, estão relacionados nas Tabelas 4.55 e 4.56.

Tabela 4.55 – Dados dos nós da rede Setor Secundário.

Nó	Cota do Terreno (m)	Consumo-Base (l/s)	Pressão (mca)	Piezométrica Disponível (mca)
n01	4,50	0,00	20,79	25,29
n02	5,00	7,40	18,78	23,78
n03	4,50	5,20	18,22	22,72
n04	5,00	4,70	16,82	21,82
n05	3,50	4,20	19,25	22,75
n06	3,50	7,40	20,21	23,71
n06a	0,04	0,00	22,74	22,78
n07	3,50	10,50	21,07	24,57
n08	5,00	5,20	18,17	23,17
n09	6,00	5,20	16,86	22,86
n10	6,00	6,00	15,96	21,96
n11	6,00	2,60	15,41	21,41
n12	6,00	3,20	15,41	21,41
n13	6,00	4,20	15,20	21,20
n14	6,00	4,20	15,01	21,01
n15	5,00	2,60	15,64	20,64
n16	3,00	5,20	17,47	20,47
n17	3,50	61,90	16,81	20,31
n18	6,00	7,90	15,00	21,00
n19	3,50	2,60	17,96	21,46
n20	3,50	58,30	16,80	20,30

Tabela 4.56 – Dados dos trechos da rede Setor Secundário.

Trecho	Comprimento (m)	Vazão (l/s)	DI	Velocidade (m/s)	Perda de Carga (mca)
t01	220,00	208,5	466,6	1,2193	0,64
t02	190,00	83,4731	299,8	1,1825	0,72
t03	295,00	72,9731	299,8	1,0337	0,87
t04a	385,43	65,5731	299,8	0,9289	0,93
t04b	4,57	65,5731	252	1,3147	0,03
t05	370,00	4,6319	108,4	0,5019	0,93
t06	190,00	125,0269	299,8	1,7711	1,51
t07	310,00	37,1533	252	0,7449	0,61
t08	205,00	31,9533	252	0,6407	0,30
t09	305,00	26,7533	204,2	0,8169	0,91
t10	295,00	20,7533	204,2	0,6337	0,55
t11	300,00	80,4736	299,8	1,14	1,06
t12	290,00	75,2736	299,8	1,0663	0,90
t13	180,00	-0,0308	108,4	0,0033	0,00
t14	315,00	-3,2308	108,4	0,3501	0,41
t15	300,00	56,7412	252	1,1376	1,29
t16	295,00	54,1412	252	1,0855	1,16
t17	215,00	-4,1588	252	0,0834	0,01
t18	140,00	18,1841	204,2	0,5552	0,20
t19	220,00	13,9841	204,2	0,427	0,20
t20	220,00	9,7841	156,4	0,5093	0,37
t21	285,00	71,9747	299,8	1,0196	0,82
t22	300,00	64,0747	299,8	0,9077	0,69
t23	315,00	-1,9841	108,4	0,215	0,17
t24	170,00	-7,1841	156,4	0,3739	0,16

Comparando os resultados obtidos com a utilização do método de dimensionamento otimizado EficientE, em relação ao método PNL2000 utilizado por Gomes (2004), para o dimensionamento da mesma rede, conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado menos vantajoso em termos econômicos para a componente tubulações, aumentando o custo da rede em 20,48%. No entanto, este aparente aumento de custos ocorreu porque o nó (Rn4) que alimenta a rede, oriundo do Grande Setor, pressurizou a rede com uma pressão de 25,93 mca, enquanto no método PNL200, esta pressurização foi de 31 mca.

Para efeito comparativo, também foi realizado o dimensionamento utilizando a metodologia proposta, para a mesma rede, considerando a cota piezométrica de alimentação de 31 mca. Nesta situação de contorno idêntica à utilizada no cálculo pelo método PNL2000, o custo encontrado para as tubulações foi de \$ 618.904,85, sendo 1,73% inferior ao custo encontrado pelo método PNL2000, que foi de: \$ 629.613,05 (ver Figura 4.36).

EficientE - Método de Dimensionamento Econômico para Redes de Distribuição de Água		
Relatório Resumo para a Rede - Situação de Contorno com a Cota Piezométrica na Cabeceira Fixa		
Setor Secundario2		
Dados de Entrada		Sobre o Processamento
Pressão mínima exigida nos nós da rede (mca)	15,00	Data: 08/03/2007
Cota Piezométrica na cabeceira (m)	31,00	Número de iterações..... 051
Quantidade de nós da rede (unid)	021	Tempo das iterações..... 00:04:36
Quantidade de trechos da rede (unid)	025	Tempo div. do trecho..... 00:00:07
		Total..... 00:04:43
Faixa de Pressões na Rede		Sistema Operacional e Hardware
Mínima (mca) n14	15,00	Windows XP Service Pack 2 (5.1.2600)
Máxima (mca) n07a	27,32	AMD Athlon(tm) 64 Processor 3000+
		Memória RAM: 1024 Mb
Faixa de Velocidades na Rede		
Mínima (m/s) t05	0,07	
Máxima (m/s) t06	2,33	
<hr/>		
Componente	Custo em \$	
Tubulações	618.904,85	
\$ = Unidades Monetárias		

Figura 4.36 – Relatório Resumo para a rede Setor Secundário (cota piezométrica 31 mca).

Considerando o sistema como um todo, ou seja, Grande Setor e o Setor Secundário, o método EficientE, obteve uma economia de custo em relação ao método PNL2000 de 12,72% (ver Tabela 4.57).

Conclui-se que, embora o custo obtido pelo dimensionamento utilizando o método EficientE para o Setor Secundário tenha sido superior, em relação ao PNL2000, devido à redução da cota piezométrica na alimentação da rede, a economia proporcionada no dimensionamento do Grande Setor, foi suficientemente maior para absorver este acréscimo e ainda produziu uma boa folga.

Tabela 4.57 – Resultados obtidos para a rede Exemplo 5.

Rede	Método PNL2000	Método EficientE
Grande Setor Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40
Grande Setor Energia	1.566.782,30	1.192.399,31
Setor Secundário Tubulações	629.613,05	758.529,57
Custo em \$	6.102.192,95	5.326.169,28

\$ = Unidades Monetárias

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho foi apresentado um novo método para o dimensionamento econômico de redes de abastecimento de água, incorporado a um software denominado de EficientE, sendo este método aplicado e validado em redes exemplos oriundas de outras publicações e estudos.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, pois além da convergência dos resultados econômicos voltados para um custo mínimo de dimensionamento, concomitantemente, também foram obedecidas as normas pertinentes à matéria e às leis que regem a hidráulica.

O destaque deste estudo está na sua aplicabilidade prática, proporcionada pela incorporação da nova metodologia de dimensionamento otimizado, num software de interface gráfica e amigável, e uma vez que este será disponibilizado gratuitamente, configurará uma significativa contribuição à sociedade, pois possibilitará o dimensionamento de redes de abastecimento de água, sob a égide da economia. Hoje em dia, a racionalização dos recursos naturais e econômicos empregados em qualquer obra, sobretudo nas de alcance social, é imperiosa, onde os investimentos públicos são, mormente, insuficientes.

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos comprovam que o novo método proposto, poderá ser utilizado de uma forma ampla para o dimensionamento de redes de abastecimento de água, pois apresenta várias opções para balizar os cálculos e as suas várias configurações que proporcionam modelagens diversas, o torna um método bastante prático e flexível.

O Exemplo 5, mostrado no capítulo anterior, que apresenta a configuração de contorno pela cota piezométrica de cabeceira variável, demonstrou ser uma configuração poderosa, para determinação da alternativa de custo mínimo, pelo fato de dimensionar utilizando também a componente de custo da energia. Entretanto, ainda faltam mais publicações na literatura disponível, capazes de modelar o problema utilizando estas mesmas variáveis de contorno para um maior estudo comparativo.

Nos demais exemplos enquadrados na configuração de contorno pela cota piezométrica de cabeceira fixa, o método também produziu resultados satisfatórios, quando comparados com os custos obtidos por outros métodos de dimensionamento para as mesmas redes. Uma das funcionalidades implementadas a destacar, desenvolvidas para esta situação de contorno, refere-se a um ajuste final implementado pelo método, quando a condição de parada das iterações é estabelecida, que trata da diluição da folga de pressão, caso ela exista, a critério do projetista, transformando-a em redução de custo.

Existem centenas de métodos e variantes destes, e a cada dia surgem mais e mais alternativas de dimensionamento econômico, mas inexistem ainda, um método que tenha despertado o devido interesse de ser implementado, na prática e disponibilizado para a comunidade de forma gratuita, acompanhando a tendência mundial do *software* livre. Tem-se de considerar, que o berço do desenvolvimento destas técnicas reside justamente nas instituições governamentais, sobretudo nas universidades, que deveriam apresentar um retorno a sociedade, afinal essas instituições são custeadas pelo contribuinte. Redes dimensionadas com maior economia refletiriam diretamente nos investimentos públicos nessas obras de alcance social.

Não se quer aqui tolher a iniciativa privada, do seu papel comercial. O que se almeja com este texto é chamar a atenção para o problema e tomar a iniciativa, lançando no mercado

uma ferramenta de cálculo gratuita com técnicas de otimização de custos, que seja acessível a toda comunidade técnica e científica, destinada ao cálculo de redes de distribuição de água.

Finalmente, o presente trabalho desenvolveu uma nova metodologia de cálculo que propiciou o desenvolvimento de uma poderosa ferramenta qualitativa (*software*), que estará disponível, em breve, para utilização prática no dia a dia por profissionais da área e por toda comunidade acadêmica para seus estudos a um custo zero. Espera-se que esses novos recursos, sejam amplamente divulgados, explorados e utilizados em larga escala e até mesmo aperfeiçoados oportunamente, com as contribuições que poderão advir da própria comunidade.

Relação dos principais pontos positivos obtidos com o estudo:

- Interface amigável;
- Alto poder de convergência;
- Obtenção do custo mínimo;
- Permite calcular redes novas e ampliações;
- Não foram detectadas condições restritivas;
- Aplicabilidade prática;
- Ferramenta de apoio à decisão;
- Permite a racionalização dos recursos;
- Contribuição à sociedade.

5.2 Recomendações

A partir dos resultados obtidos, permitem-se fazer algumas recomendações para o desenvolvimento de outras metodologias futuras de cálculo, baseadas sob a égide do dimensionamento aliado à minimização dos custos.

Na opinião do autor, as publicações deveriam contemplar, sempre que possível, preferencialmente, aquelas que se utilizam de recursos dinâmicos iterativos, que além do desenvolvimento do processo, o mesmo fosse implementado num software com ambiente gráfico e amigável. Isto facilitaria, sobremaneira, a calibração do modelo e os testes necessários para sua validação, bem como a sua correta adequação para situações práticas do dia a dia e não apenas aplicadas a casos meramente teóricos, ou ainda aqueles que carecem da utilização de softwares e ferramentas computacionais onerosas (*softwares*), restringindo o seu acesso e uso.

Estudos futuros podem implementar algumas variantes ao método, visando outras alternativas de cálculo, a exemplo do estudo quando numa dada iteração existem nós na rede com valores muito próximos ao valor obtido no nó mais desfavorável. Poderia ser criado um critério que se a diferença fosse inferior a um valor arbitrado, o método conduziria às iterações por todos estes novos caminhos de possibilidades, e ao final, elegeria qual foi o caminho que proporcionou o menor custo.

Por outro lado, também podem ser realizados estudos no sentido de incorporar ao método uma metodologia de análise de confiabilidade, visto que esse parâmetro é uma limitação à redução dos custos do sistema. Define-se confiabilidade, como sendo a probabilidade de um sistema apresentar performance adequada à sua função pretendida, quando operado sob determinadas condições ambientais num dado intervalo de tempo definido. A falha ocorre quando o sistema não é capaz de exercer as funções de projeto. Esta implementação poderia ser incorporada ao método, por exemplo, para garantir a redundância de determinados trechos da rede, quando houvesse a ruptura de um trecho qualquer de tubulação, possibilitando operações de manobra.

REFERÊNCIAS

ABADIE, J. and CARPENTIER, J. *Generalization of the wolf reduced gradient method to case of non linear constraints, in: OPTIMIZATION*. Ed. R. Fletcher, Chap. 4, p. 37-47, Academic Press, London, UK, 1969.

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.

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

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.

BEZERRA, S. T. M.; GOMES, H. P.; SANTOS, D. S.; SILVA, J. S. O. P. e MONTENEGRO, L. L. B. Otimização econômica para reabilitação de rede de distribuição, considerando a instalação de boosters. VI SEREA, João Pessoa, Brasil, Junho, 2006.

BEZERRA, S. T. M.; GOMES, H. P.; SILVA, J. S. O. P.; SANTOS, D. S. e MONTENEGRO, L. L. B. **Otimização econômica para a reabilitação de redes de distribuição, considerando a instalação de boosters**. Anais do VI Serea. ABRH. João Pessoa, PB, 2006.

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.

BROOK, A.; KENDRICK, D. and MEEARUS, A. *GAMS a user's guide*. The Scientific Press. Redwood City, CA, USA, 1988.

CAGEPA. Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba. **Projeto da rede distribuidora do bairro do Bessa**. João Pessoa, PB, 1982.

- CIRILO, J. A. **Programação não linear aplicada a recursos hídricos**. In: PORTO, R. L. L. et al., Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. ABRH, ed. 1, p. 305-356, Editora da Universidade, UFRGS, 1997.
- COSTA, A. L. H.; MEDEIROS, J. L. and PESSOA, F. L. P. *Optimization of water distribution networks through a reduced space Branch-And-Bound search*. Water Resources Research, v. 37, n. 4, p. 1083-1090, 2001.
- CUNHA M. C. and SOUZA, J. *Water distribution network design optimization: simulated annealing approach*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 125, n. 4, p. 215-221, 1999.
- DUAN, N.; MAYS, L. W. and LANSEY, K. E. *Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 116, n. 2, p. 249-267, New York, NY, USA, 1990.
- EIGER, G.; SHAMIR, U. and BEM-TAL, A. *Optimal design of water distribution system*. Water Resources Research. AGO. v. 30, n. 9, p.2937-2946. New York, NY, USA, 1994.
- EL-BAHARAWY, A. and SMITH, A. A. *A methodology for optimal design of pipe distribution networks*. Canadian Joint of Civil Engineering, v. 14, p. 207-215, Canada, 1987.
- EL-BAHARAWY, A. and SMITH, A. A. *Application of MINOS to water collection and distribution networks*. Civil Engineering Systems, v. 2, p. 38-49, 1985.
- EUSUFF, M. M. and LANSEY, K. E. *Water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm*. Proceeding of Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges, ASCE, 2001.
- FIRMINO, M. B. M.; CURI, W. F.; CURI, R. C. e LINS, G. M. L. **Otimização econômica de redes malhadas destinadas a sistemas pressurizados de irrigação**. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2004, São Luís, Maranhão. Anais. CD-ROM.
- FORMIGA, K. T. M. **Metodologia de otimização de redes malhadas através da programação não linear**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia – Campus II, Campina Grande, PB, 1999, 158p.

FUJIWARA, O.; JENCHAIMAHOKOON, B. e EDIRISINGHE, N. C. P. *A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks*. Water Resources Research, v. 23, n. 6, p. 977-982, 1987.

GESSLER, J. and WALSKI, T. M. *Technical report EL-85-11: water distribution system optimization*. U.S. Army Corps Engineers, Washington, DC, USA, 1985.

GESSLER, J. *Pipe network optimization by enumeration*. Proceedings of Computer Applications for Water Resources, ASCE, New York, p. 572-581, 1985.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Addison-Wesley Publishing Co. Reading Massachusetts, USA, 1989.

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

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.

GOUTER, I. C. and COALS, A. C. *Quantitative approaches of reliability assessment in pipe networks*. Journal of Transportation Engineering, v. 112, n. 3, p. 287-301, 1986

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.

HOLLAND, J. H. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts, USA, 1975.

- HUDSON, W. D. *Studies of distribution system capacity in seven cities*. J. American Water Works Association, p. 157-164, USA, 1966.
- JACOBY, S. L. S. *Design of Optimal Hydraulic Networks*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, v. 94, n. 3, p. 641-666, 1968.
- KARMELI, D., GADISH, Y. and MEYERS, S. *Design of optimal water distribution networks*. Journal of Pipeline Division, ASCE, v. 94, n. 10, 9. 1-10. New York, NY, USA, 1968.
- KESSLER, A. and SHAMIR, U. *Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks*. Water Resources Research, v. 25, n. 7, p. 1469-1480, New York, NY, USA, 1989.
- KOIDE, S. **Otimização de redes de distribuição de água – estudo de dois modelos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 1984, 92p.
- LANCEY, K. E. and MAYS, L. W. *Optimization model for water distribution system design*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, v. 115, n. 10, p. 1401-1419, 1989.
- LANCEY, K. E., DUAN, N., MAYS, L. W. and TUNG, Y. *Water distribution system under uncertainties*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 115, n. 5, p. 630-644, New York, NY, USA, 1989.
- LASDON, L. S.; WARREN, A. D. and RATNER, M. S. **GRG2 User's guide**. University of Texas at Austin, Austin Tex, USA, 1984.
- LEAL, A. F. e GOMES, H. P. **Utilização da metodologia granados para a otimização de redes hidráulicas malhadas**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 1, p. 13-16, Campina Grande, PB, 1997.
- LEAL, A. F. **Estudo comparativo de métodos de otimização de redes malhadas pressurizadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, PB, 1995.

- LIEBMAN, J. S., LASDON, L., SCHRAGE, L. and WAREN, A. *Modeling and optimization with GINO*. The Scientific Press. Palo Alto, CA, USA, 1986.
- LIONG, S. Y. and ATIQUZZAMAN, M. *Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution*. Journal of The Institution of Engineers, Singapore, v. 44, n. 1, p.93-107, 2004.
- LOGANATHAN, G. V.; GREENE, J. J. and AHN, T. J. *Design heuristic for globally minimum cost water – distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 121, n. 2, p. 182-192. New York, NY, USA, 1995.
- LOPES, A. V. **Otimização do dimensionamento e análise de confiabilidade de redes de distribuição de água**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2002, 148p.
- LOUBSER, B. F. and GESSLER, J. *Computer aided optimization of water distribution networks*. The Civil Engineering in South Africa, p. 413-422, Johannesburg, South Africa, 1990.
- MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R.; ZECCHIN, A. C.; FOONG, W. A. et al. *Ant colony optimization for design of water distribution systems*. Proceedings of Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges, ASCE, 2001.
- MAIER, H. R.; SIMPSON, A. R.; ZECCHIN, A. C.; FOONG, W. A. et al. *Ant colony optimization for design of water distribution systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 129, n. 3, p. 200-209, 2003.
- MATEUS, G. R. e LUNA, H. P. L. **Programação não linear**. V Escola de Computação. Belo Horizonte, MG, 1986.
- MONBALIU, J.; JO, J. H.; FRAISSE, C. W. and VADAS, R. G. *Computer aided design pipe network, in: water resource systems applications*. Friesen Printers, Winnipeg, Canada, 1990.

- MURTAGH, B. A. and SAUNDERS, M. A. *Systems optimization laboratory*. Department of Operations and Research, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1987.
- NASH, S. G. and SOFER, A. *Linear and nonlinear programming*. Ed. McGraw-Hill, 692 p., 1996.
- NBR12218. **Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1994.
- NEUMAIER A. **Constraint global optimization. In COCONUT**. Algorithms for Solving Nonlinear Constrained and Optimization Problems. The State of the Art, p. 55-113, 2001.
- QUINDRY, G. E.; BRILL, E. D.; LIEBMAN, J. C. and ROBINSON, A. R. *Comment on design of optimal water distribution systems*. Water Resources Research, v. 15, n. 6, p. 1651-1654. New York, NY, 1979.
- ROSSMAN, L. A. EPANET: *User's guide*. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, 1993.
- ROSSMAN, L. A. EPANET2: *User's manual*. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, 2000.
- SANTANA, G. C. e SOARES, S. **Otimização da operação de sistemas de abastecimento de água**. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Vitória, ES, 1977.
- 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.
- SAVIC, D. A. and WALTERS, G. A. *Genetic algorithms for least-cost of water distribution networks*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
- SHERALI, H. D. and SMITH, E. P. *A global optimization approach to a water distribution network design problem*. Journal of Global Optimization, v. 11, p. 107-132, 1997.

SHERALI, H. D., TOTLANI, R. and LOGANATHAN, G. V. *Enhanced lower bounds for the global optimization of water distribution networks*. Water Resources Research, v. 34, n. 7, 1998.

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.

SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C. and MURPHY, L. J. *Genetic algorithms compares to other techniques for pipe optimization*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 120, n. 4, p.423-443, 1994.

SU, Y., MAYES, L. W.; DUAN, N. and LANSEY, K. E. *Reliability-based optimization model for water distribution systems*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 114, n.12, p. 1539-1555, New York, NY, USA, 1987.

TODINI, E. and PILATI, S. *A gradient method for the analysis of pipe networks*. Procedure of the International Conference on Computers Applications for Water Supply and Distribution. Leicester Polytechnic, Leicester, UK, n. 9, p. 8-10, 1987.

VIEIRA, A. M. **Métodos iterativos de análise hidráulica e dimensionamento ótimo por programação linear de redes de distribuição de água**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 1980, 226p.

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.

WALSKI, T. M.; GESSLE, J. and SJOSTROM, J. W. *Water distribution systems; simulation and sizing*. Lewis Publishers, Michigan, USA, 1990.

WOOD, D. J. *User's manual computer analysis of flow in pipe networks including extended period simulations*. University of Kentucky, Lexington, KY, USA, 1980.