



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA A REABILITAÇÃO
DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

DISSERTAÇÃO

SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

MARÇO, 2005

SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA

**MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA A REABILITAÇÃO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em
Engenharia Civil e Ambiental da Universidade
Federal de Campina Grande em cumprimento às
exigências para a obtenção do Grau de Mestre.

ORIENTADORES: Prof. PhD. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan
Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
MARÇO, 2005

SAULO DE TARSO MARQUES BEZERRA

**MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PARA A REABILITAÇÃO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**

Aprovado em 11 de março de 2005.

COMISSÃO EXAMINADORA:

VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN, PhD.
Orientador (UFCG - PB)

HEBER PIMENTEL GOMES, Dr. Ing.
Orientador (UFPB - PB)

MARCO AURÉLIO HOLANDA DE CASTRO, PhD.
Examinador externo (UFC - CE)

JOSÉ GOMES DA SILVA, Dr.
Examinador interno (UFCG - PB)

Campina Grande, 11 de março de 2005.

DEDICO

(in memoriam)

À minha tia, Maria Marques Fabrício,
pelo amor e carinho incondicional à
todos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo amor oferecido em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, pela paciência, dedicação e compreensão em todos os meus momentos.

À Fernanda de M. Dias, pelo apoio incondicional prestado neste período tão importante.

Ao meu orientador, Heber Pimentel Gomes, pelo companheirismo, amizade, ensinamentos, experiência e conselhos para que esta etapa da minha vida fosse conduzida ao final com sucesso.

À minha irmã, Sanmara Marques Bezerra, que sempre torceu por minha felicidade.

Ao meu orientador, Vajapeyam Srirangachar Srinivasan, pela paciência, ensinamentos e por me aceitar cordialmente como seu orientando.

Aos meus familiares, pelo apoio e conselhos nas horas difíceis.

Aos amigos e colegas do mestrado - Andréa Crispim, Aracy Nunes, Aurelúbia Rufino, Gabriela Pedreira, Hugo Alcântara, Martha Viviane, Rosenilton Maracajá - que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta dissertação.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e aos professores da Área de Engenharia de Recursos Hídricos, pela experiência e conhecimentos adquiridos neste período.

Aos amigos que adquiri neste período - Alcides, Arthur, Emanuel, Hudson, Lélis, Romilson - que me acolheram com companheirismo e sem receios.

A todos os funcionários do Laboratório de Hidráulica.

E finalmente, a todos aqueles que me deram força para superar as dificuldades encontradas durante o Mestrado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aplicação do revestimento de argamassa de cimento	7
Figura 2.2 - Degradação do diâmetro interno na tubulação por deposição de cal e variação da rugosidade	9
Figura 2.3 - <i>Polly-pig</i> para tubulações de grande diâmetro	10
Figura 2.4 - Tubulação antes e depois da passagem do <i>polly-pig</i>	11
Figura 2.5 - Esquema do Método <i>Brusting</i>	13
Figura 2.6 - Esquema do processo <i>Relining</i>	14
Figura 2.7 - Perfuratriz direcional	15
Figura 2.8 - Vídeo inspeção em redes de água e esgoto	16
Figura 3.1 - Custos fixos e custos variáveis ao longo do tempo t	27
Figura 3.2 - Custo de investimento e valores presentes dos custos variáveis	27
Figura 3.3 - Esquema das linhas piezométricas para três situações de projeto: antes da reabilitação, solução inicial e solução definitiva	36
Figura 4.1 - Esquema da REDE EXEMPLO 1	41
Figura 4.2 - Vazões nos trechos (simulação hidráulica do EPANET 2)	42
Figura 4.3 - Esquema da REDE EXEMPLO 1 seccionada (ramificada)	44
Figura 4.4 - Resultado final: vazões nos trechos (simulação hidráulica do EPANET 2) ...	56
Figura 4.5 - Características da rede reabilitada (diâmetros e coeficientes de rugosidade)	57
Figura 4.6 - Canal principal do Perímetro Nilo Coelho	58
Figura 4.7 - Esquema do Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho	59
Figura 4.8 - Custos do projeto de reabilitação (investimento e operação) em função da altura manométrica	100

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$C_{energia}$	custo anual do consumo de energia elétrica
C_e	custo total da energia elétrica (custo da demanda mais consumo de energia elétrica)
CE	valor presente do custo energético total
Ce'_t	valor presente do custo energético de um determinado ano t
Ce_t	custo da energia elétrica de um determinado ano t
CHf	carga hidráulica fictícia
CHf_{max}	carga hidráulica fictícia máxima
comp.	comprimento
C_t	cota do terreno
$D_{energia}$	custo anual com demanda de energia elétrica
E	taxa anual de aumento do preço de energia elétrica
Fa	fator de atualização
G	gradiente de câmbio
G^*	gradiente de câmbio ótimo
Ge	gradiente energético
H. W.	Hazen-Williams
Hf	perda de carga unitária do trecho de comprimento L
Hf_i	perda de carga unitária do trecho de diâmetro menor (sub-trecho)
Hf_{ii}	perda de carga unitária do trecho de diâmetro maior (sub-trecho)
I	custo total de investimento
i	taxa anual de juros
ID	identificação
$IGPM$	índice geral de preços de mercado da Fundação Getúlio Vargas
IRT	índice corresponde ao reajuste tarifário que deve ser aplicado anualmente à energia elétrica
L	comprimento total do trecho composto por dois diâmetros distintos
L_i	comprimento do sub-trecho ocupado pelo diâmetro menor
L_{ii}	comprimento do sub-trecho ocupado pelo diâmetro maior

m	metros
n_b	número de horas de bombeamento anual
P	potência requerida do motor elétrico
P_1	custo da reabilitação da tubulação do trecho na situação inicial
P_2	custo da reabilitação da tubulação do trecho após a intervenção
P_m	potência requerida por metro de elevação (potência unitária)
PNC	Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho
P_{req}	pressão requerida
R	custo de reabilitação da rede de distribuição de água (intervenção físicas)
RA	receita anual da concessionária de energia elétrica
T_c	preço da tarifa relativa ao consumo de energia elétrica
T_d	preço da tarifa relativa à demanda de energia elétrica
um	unidade monetária
VPA	parcela composta pela evolução dos custos que independem de decisões das concessionárias, ou seja, custos não-gerenciáveis
VPB	custos que dependem essencialmente da eficácia da gestão empresarial
X	fator de indução à melhoria da eficiência econômica das atividades monopolistas
Z_0	cota piezométrica de alimentação fictícia inicial
ΔH_f	alívio da perda de carga proporcionada por uma determinada intervenção
$\sum H_{f_{mon}}$	somatório das perdas de carga nos trechos a montante de um determinado nó
η	rendimento do conjunto motor-bomba

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Características dos nós da REDE EXEMPLO 1	41
Tabela 4.2 - Características dos trechos da REDE EXEMPLO 1, traçado original	42
Tabela 4.3 - Pressões nos nós da REDE EXEMPLO 1, considerando a cota piezométrica de alimentação de 210 metros (simulação EPANET 2)	43
Tabela 4.4 - Diâmetros disponíveis e custos unitários (unidade monetária por metro) ...	43
Tabela 4.5 - Dados dos trechos da REDE EXEMPLO 1 ramificada	45
Tabela 4.6 - Carga hidráulica fictícia dos nós, em metros, REDE EXEMPLO 1	45
Tabela 4.7 - Resultado da solução inicial do método	46
Tabela 4.8 - Dados referentes à escolha da primeira opção (substituição ou reparo)	47
Tabela 4.9 - Gradientes de câmbio e perdas de carga dos trechos da REDE EXEMPLO 1	48
Tabela 4.10 - Combinações dos trechos “candidatos” a potenciais, para o cálculo dos gradientes de câmbio ótimo	50
Tabela 4.11 - Processo iterativo: 2ª etapa	51
Tabela 4.12 - Gradientes de câmbio ótimo e trechos potenciais do processo iterativo	53
Tabela 4.13 - Comprimentos e perdas de carga nos sub-trechos dos pares de diâmetros dos trechos 2, 4, 6 e 8 da REDE EXEMPLO 1	54
Tabela 4.14 - Resultado final: dados dos trechos da REDE EXEMPLO 1	55
Tabela 4.15 - Resultado final: dados dos nós da REDE EXEMPLO 1 (altura manométrica igual a 49,29 metros)	55
Tabela 4.16 - Decisões de reabilitação do método proposto para a REDE EXEMPLO 1	56
Tabela 4.17 - Dados dos nós da rede de distribuição do Setor 11 do PNC considerando a vazão parcelar de 16,33 L/s (58,8 m ³ /s)	61
Tabela 4.18 - Dados dos trechos da rede de distribuição do Setor 11 do PNC (não reabilitado) considerando a vazão parcelar de 58,8 m ³ /h (16,33 L/s)	62
Tabela 4.19 - Pressões considerando a cota piezométrica de alimentação de 455,2 metros e vazão parcelar de 16,33 L/s do Setor 11 do PNC.	63
Tabela 4.20 - Custos de implantação, por metro linear, das tubulações de PVC	64

Tabela 4.21 - Carga hidráulica fictícia dos nós, em metros, da rede de distribuição de água	65
Tabela 4.22 - Pressões nos nós obtidas na solução inicial do método ($Z_0 = 524,73$ m)	66
Tabela 4.23 - Dados das artérias da rede de distribuição de água do Setor 11 do PNC	68
Tabela 4.24 - Gradientes de câmbio e perdas de carga dos trechos	69
Tabela 4.25 - Processo iterativo (2ª etapa)	74
Tabela 4.26 - Gradientes de câmbio ótimo e trechos potenciais do processo iterativo	95
Tabela 4.27 - Comprimentos e perdas de carga nos sub-trechos dos pares de diâmetros dos trechos 2, 6, 9, 10, 21, 26, 27 e 33 da rede de distribuição do setor 11	96
Tabela 4.28 - Decisões de reabilitação do método proposto para o setor 11 do PNC	97
Tabela 4.29 - Resultado final: dados dos trechos da rede de distribuição do Setor 11	98
Tabela 4.30 - Resultado final: dados dos nós da rede de distribuição do Setor 11 do PNC (altura manométrica = 56,81 metros)	99
Tabela 4.31 - Custos de reabilitação (investimento mais operação) da rede de distribuição em função da altura manométrica para um horizonte de 15 anos	101

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de otimização econômica para a reabilitação de redes de distribuição de água que se encontram com deficiência de vazão e pressão nos pontos de consumo. A metodologia empregada está fundamentada no Método Granados (GRANADOS, 1986) de dimensionamento econômico de redes pressurizadas. Trata-se de um processo iterativo, que seleciona, a cada passo, as possibilidades de modificação das tubulações e/ou da altura manométrica de bombeamento, de forma a minimizar o custo de investimento e energético da reabilitação, proporcionando como resposta, as tubulações a serem modificadas da rede de distribuição, as pressões disponíveis e a altura manométrica ótima de bombeamento, de modo que o custo conjunto, investimento (intervenção física na rede) mais operação (custo atualizado da energia) do sistema de abastecimento, seja o mínimo possível. O método foi aplicado a duas redes de distribuição de água, uma malhada e outra ramificada: uma rede fictícia e o Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho em Juazeiro - BA, respectivamente. O método mostrou-se uma ferramenta capaz de fornecer subsídios para a tomada de decisão, sendo viável a sua implementação em casos reais.

ABSTRACT

This work presents a methodology for economic optimization aimed at the rehabilitation of networks of water distribution, which have flow and pressure deficiency in the consumption nodes. The methodology used is based on the Granados Method (GRANADOS, 1986) of the economic design of pressurized networks. It is an interactive process where by a selection step by step regarding the possibilities of changes of the network pipe and/or the pumping head, so as to optimize the investment and the energy cost of the system rehabilitated. The process, alters the diameters of the pipes of the distribution network, the available pressures and the best pumping head, in such a way that the combined cost, of the investment (physical intervention in the network) and pumping operation (up-to-date energy cost) of the distribution system be minimized. The proposed method has been applied the two networks of water distribution, one thressed and other branched: a fictitious network and Sector 11 of Irrigated the Perimeter Senador Nilo Coelho in Juazeiro - BA, respectively. Also, the proposed model can serve as an effective tool for decision making, being viable your application in real cases.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vi
Lista de Símbolos	vii
Lista de Tabelas	ix
Resumo	xi
Abstract	xii
Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	4
2.1. Introdução	4
2.1.1. Idade das Tubulações das Redes de Distribuição de Água	5
2.2. Técnicas de Reabilitação	6
2.2.1. Opções de Reabilitação	7
2.2.2. Passos para a Execução do Processo de Reabilitação	15
2.3. Modelos Numéricos de Reabilitação de Sistemas de Distribuição de Água	17
2.4. Benefícios proporcionados pela reabilitação	21
Capítulo 3 - Metodologia Empregada	23
3.1. Introdução	23
3.2. Análise Econômica dos Custos de Reabilitação de Sistemas de Distribuição	24
3.2.1. Custos dos Projetos de Reabilitação	24
3.2.2. Análise Econômica do Projeto através do Valor Presente	26
3.2.3. Tarifa da Energia Elétrica no Brasil	30
3.3. Método Granados	32
3.4. Metodologia Empregada	33
3.4.1. Primeira Etapa (Solução Inicial)	34

3.4.2. Segunda Etapa (Processo Iterativo)	35
Capítulo 4 - Aplicação da Metodologia e Análise dos Resultados	40
4.1. REDE EXEMPLO 1	40
4.1.1. Resolução da REDE EXEMPLO 1	43
4.2. REDE EXEMPLO 2	58
4.2.1. O Perímetro Senador Nilo Coelho	58
4.2.2. Diagnóstico Preliminar do Abastecimento do PNC	59
4.2.3. Resolução da REDE EXEMPLO 2	64
Capítulo 5 - Conclusões e Recomendações	101
Referência Bibliográfica	104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A água constitui um bem essencial para o desenvolvimento da humanidade, fato comprovado quando se observa, na História, que as primeiras civilizações surgiram às margens de grandes lagos e rios. Com o passar do tempo, surgiu a necessidade de povoar locais onde não havia água nas imediações para consumo, sendo indispensável transportá-la de mananciais próximos ou mesmos distantes. A necessidade de água para atender às precisões da população e também para irrigação de suas culturas agrícolas fez com que as primeiras obras visando o abastecimento de água fossem construídas. As primeiras obras com sucesso para se controlar o fluxo de água foram feitas na Mesopotâmia e no Egito, onde ruínas de canais de irrigação pré-históricos ainda existem (MAYS, 2000 apud SOBRINHO & MARTINS, 2004).

Os sistemas de abastecimento de água vêm se tornando, a cada dia, uma das maiores preocupações dos profissionais que atuam nas áreas de Recursos Hídricos e Saneamento, por estarem intimamente ligados com o desenvolvimento sustentável de qualquer sociedade, influenciando diretamente nos aspectos sociais, econômicos, ambientais e políticos.

O sistema de distribuição - formado pela rede de distribuição e o sistema impulsor (estações de bombeamento) - constitui a base do sistema de abastecimento de água, em função dos custos elevados para sua implantação, manutenção e operação. A rede de distribuição é o conjunto de elementos encarregados do transporte da água desde os pontos de produção e/ou armazenamento até os pontos de consumo (residências, comércios, indústrias, hidrantes de irrigação e incêndio, etc). As estações de bombeamento (estações elevatórias) são unidades responsáveis pelo fornecimento de energia de pressão à água, de

maneira que ela possa chegar aos pontos de consumo e/ou unidades seguintes com pressão satisfatória.

O traçado das redes de distribuição divide-se, basicamente, em dois tipos: malhado e ramificado, segundo suas tubulações sejam dispostas em forma de malhas e de ramos, respectivamente. O traçado misto corresponde a uma combinação dos dois tipos, sendo uma parte em forma de malha, e outra do tipo ramificada ou aberta, normalmente posicionada nas periferias ou áreas de expansão de alguns setores do sistema de abastecimento. As redes ramificadas caracterizam-se por apresentarem um único sentido para o escoamento, o que resulta em um custo de implantação inferior a rede malhada de mesmo porte (GOUTER et al., 1986 e GOMES, 2004).

As redes de distribuição, existentes no Brasil e no mundo, possuem idades que variam desde as recém implantadas até sistemas com dezenas de anos, que começam a apresentar, além dos problemas derivados de demandas não previstas, problemas de: deterioração física dos componentes das instalações hidráulicas, incrustações nas tubulações, ineficiência na operação relacionada com vazamentos, rompimentos de tubulações, falta de otimização operacional eletromecânica dos bombeamentos, dentre outros. Estes aspectos refletem na qualidade do abastecimento (vazões e pressões insuficientes nos pontos de consumo, interrupções no fornecimento, qualidade da água, etc) e em aspectos econômicos (custos elevados de energia, reparação e manutenção dos equipamentos, etc). Com o envelhecimento físico ou funcional, as redes de distribuição de água passam a necessitar de reabilitação. A reabilitação é qualquer intervenção no sistema que prolongue sua vida útil, melhorando seu desempenho hidráulico, estrutural e/ou da qualidade da água, propiciando eficiência no controle operacional.

A importância da reabilitação está intimamente ligada à diminuição do custo operacional, aumentando a segurança e a confiabilidade dos serviços prestados. Segundo PEZESHK & HELWEG (1996), a otimização da operação de bombeamento pode gerar economias significativas, as quais, no caso de grandes sistemas, poderão atingir a ordem de centenas de milhares de dólares anualmente. Os altos custos despendidos com a energia elétrica refletem na busca por meios de efficientização do seu uso. BRAILEY & JACOBS (1980) relatam que em torno de 7% da energia elétrica consumida nos Estados Unidos é utilizada pelas empresas de saneamento. TSUTIYA (2001) afirma que os gastos com energia elétrica nas empresas de saneamento básico se constituem em um dos itens mais importantes no orçamento das despesas de exploração, sendo que nos sistemas de

distribuição de água, a energia consumida pelas elevatórias representa cerca de 90% do custo total de energia elétrica consumida pelo sistema. Segundo ALLIANCE (2002), o consumo de energia elétrica na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em pelo menos 25% por meio de ações de efficientização. As companhias de água em todo o mundo têm o potencial para, com um custo efetivo, economizar mais energia do que a utilizada anualmente em toda a Tailândia.

A alternativa ideal para os sistemas que possuem problemas de operação, seria a reabilitação de todos os componentes hidráulicos deteriorados e obsoletos. Entretanto, esta solução é inviável sob o ponto de vista econômico, pois, quase sempre, os recursos financeiros disponíveis são limitados e insuficientes para abranger todo o sistema, o que torna os custos imperativos nas tomadas de decisão.

Devido aos fatores e dificuldades, ora citados, a análise dos sistemas deve almejar uma solução abrangente, que não englobe só as intervenções físicas, mas medidas voltadas para a otimização econômica dos sistemas de distribuição de água. A maioria dos modelos de reabilitação tem a particularidade de utilizar, em suas metodologias, a condição da cota de alimentação fixa, ou seja, não buscam a altura manométrica ideal (ótima) para os sistemas de distribuição. O presente trabalho introduz na análise econômica das redes de distribuição de água os custos demandados com a energia elétrica dos sistemas propulsores (estações elevatórias) como fator determinante na tomada de decisão.

Esta dissertação tem como objetivo a utilização de uma metodologia de reabilitação de sistemas de distribuição de água, levando-se em conta a minimização dos custos de implantação das possíveis intervenções nas tubulações das redes e dos custos da energia necessária para o bombeamento do sistema. A metodologia empregada está baseada no Método Granados (GRANADOS, 1986) de dimensionamento de redes ramificadas pressurizadas.

Este trabalho é constituído de cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta a revisão da literatura com o estado da arte, pertinente aos assuntos em questão. O terceiro capítulo trata da metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho, visando alcançar os objetivos propostos. No capítulo quarto é apresentado a aplicação do método proposto num sistema real e analisado os resultados. O quinto capítulo apresenta as conclusões sobre os estudos desenvolvidos e as sugestões para aplicações e desenvolvimento de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Com o envelhecimento físico ou funcional, associado à falta de planejamento e manutenção, os sistemas de abastecimento de água passam ao estado de ineficiência, não cumprindo a função para o qual foram projetados. Eventualmente, além dos problemas relacionados à deterioração física dos componentes, outra dificuldade enfrentada na operação da rede de distribuição com o seu sistema de impulsão é o aumento não previsto da demanda de água ao longo do tempo. Normalmente este aumento ocorre devido às expansões dos sistemas, ampliações das áreas a serem abastecidas, mudanças no uso do solo, dentre outros. Com o aumento da demanda, os requerimentos de vazões nos trechos se elevam, provocando maiores perdas de carga nas tubulações, resultando na diminuição das pressões disponíveis nas tomadas de água, o que prejudica consideravelmente o fornecimento, principalmente nos pontos localizados nas cotas mais elevadas e/ou nas extremidades das redes de distribuição. Este problema é comum num elevado número de sistemas existentes no Brasil e no mundo.

Em consequência dos fatores, ora citados, alguns sistemas de distribuição passaram a exigir ações que os tornem eficientes novamente, ou seja, medidas de reabilitação. Segundo CHEUNG (2004), a reabilitação dos sistemas de distribuição é uma prática antiga e comum que vem sendo desenvolvida desde a implantação dos primeiros núcleos urbanos servidos de redes de distribuição. Muitas reabilitações foram realizadas na antiguidade, principalmente em civilizações que sofreram conflitos históricos (guerras). No

entanto, a reabilitação só se consolidou como uma técnica científica com o surgimento das tubulações de ferro fundido.

Um fato histórico marcou o início do processo de reabilitação em sistemas de distribuição de água, quando em 1810 todas as tubulações de madeira, na cidade de Thames (Inglaterra), foram substituídas por tubulações de ferro fundido. Outra ocorrência marcante foi a substituição da tubulação principal que compunha o sistema de Braunfels, em 1932, por uma de maior diâmetro, após seus 271 anos de uso (SKEAT, 1961 apud CHEUNG, 2004). Desde então, o processo de reabilitação tem se tornado uma rotina em, praticamente, todas as regiões do mundo, tanto para sistemas urbanos de abastecimento d'água como para as demais redes de distribuição.

2.1.1. Idade das Tubulações das Redes de Distribuição de Água

Assim, como em qualquer equipamento ou obra de engenharia, as tubulações das redes de distribuição de água têm sua vida útil (período de tempo do funcionamento em condições pré-estabelecidas); que variam de dez a cem anos, ou mais, em função de uma série de fatores, entre os quais, merecem destaque:

- concepção e projeto do sistema de distribuição de água;
- material das tubulações;
- qualidade das tubulações e conexões (características dimensionais, matérias primas e processo de produção);
- condições de transporte e armazenamento das tubulações e conexões, antes e durante o assentamento;
- qualidade da execução da obra de assentamento (base de apoio das tubulações, cuidado na execução das juntas, camada envoltória, reaterro e compactação);
- esforços externos atuantes (cargas acidentais e permanentes, por exemplo, o tráfego de veículos);
- características físico-químicas e elétricas do meio que envolve a tubulação;
- qualidade da água (características físico-químicas);
- condições de operação (pressões e transientes); e
- qualidade da manutenção preventiva e corretiva do sistema.

É comprovado, através da observação das redes existentes, que com o decurso do tempo, os sistemas diminuem sua capacidade de transporte e tem sua característica de estanqueidade fragilizada, pela ação de alguns dos fatores acima citados, atuando de forma isolada ou combinada. É evidente que quanto maior a idade das tubulações mais elevado o seu grau de degenerescência e, conseqüentemente, mais problemas surgem.

Face ao elevado custo de substituição das tubulações das redes, foram desenvolvidas tecnologias de recuperação de tubos que proporcionem a reabilitação *in loco*. Para os casos em que a substituição das redes é inevitável, já existem tecnologias de substituição das tubulações por métodos não-destrutivos, ou seja, sem necessidade de abertura de valas contínuas. A decisão pela substituição das redes de uma determinada área, em função da idade das tubulações e do índice de perdas associado, deve ser precedida de uma análise de viabilidade econômica.

2.2. TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO

As técnicas de reabilitação podem ser divididas em dois grandes grupos: técnicas estruturais e técnicas não-estruturais. A opção escolhida vai depender basicamente do grau de deterioração dos componentes do sistema. Na maioria dos casos, é conveniente, a aplicação das duas técnicas simultaneamente. As técnicas não-estruturais são usadas quando o objetivo é melhorar ou recuperar as condições hidráulicas ou sanitárias, reduzir vazamentos e proteger as tubulações contra corrosão (tubulações de ferro fundido e aço). As técnicas estruturais buscam restaurar a integridade do sistema através de intervenções nas instalações hidráulicas.

As soluções e as tecnologias disponíveis para a reabilitação das redes são muito diversificadas e devem ser selecionadas em função dos problemas locais. Pode-se utilizar técnicas destrutivas ou não-destrutivas. O processo destrutivo é caracterizado pela necessidade de abertura de valas e remoção da tubulação existente.

No processo não-destrutivo é necessária apenas a abertura de poços de inspeção, eliminando os transtornos causados pela abertura de valas e reduzindo o tempo de execução do serviço. Esta tem sido prática comum em alguns países, destacando-se a Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha.

2.2.1. Opções de Reabilitação

Aplicação de revestimento de argamassa de cimento

Segundo VENTURINI & BARBOSA (2002), o uso do revestimento com argamassa de cimento em tubulações foi reportado pela primeira vez, pela Academia Francesa de Ciência, em 1836, sendo considerada a técnica mais usada para reabilitação das tubulações. Esta técnica é aplicada nas paredes internas das tubulações de ferro fundido e aço carbono, desde 100 mm até 2000 mm de diâmetro, protegendo-as contra possíveis corrosões. O revestimento aumenta a resistência da tubulação de maneira que a torna capaz de suportar as cargas à qual está sujeita, como por exemplo, cargas estáticas, cargas devido ao tráfego, condições hidráulicas estáticas, condições hidráulicas transitórias e movimentos da terra.

Essa técnica apresenta as vantagens de não ser necessária a abertura de valas e as tubulações antigas são aproveitadas, proporcionando: redução na interrupção do fornecimento de água em relação à substituição das tubulações; minimização dos transtornos a população, por ser um processo mais rápido; diminuição dos vazamentos; garantia da manutenção da potabilidade da água, conseguida pela eliminação da formação de ferrugem nas tubulações; proteção eficaz das paredes do tubo, eliminando a recorrência de corrosão nas tubulações de aço e ferro fundido. A maior desvantagem é a redução do diâmetro útil (interno), porém esta pode ser compensada pela diminuição da *rugosidade interna* da tubulação. O processo é ilustrado pela figura 2.1.

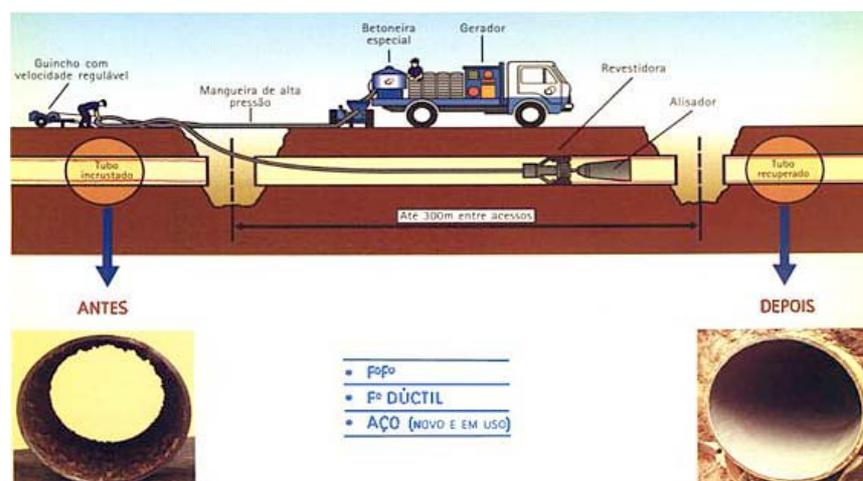


Figura 2.1 - Aplicação do revestimento de argamassa de cimento¹

¹ Fonte: <<http://www.ercon.com.br/recupera.htm>>.

Como foi dito, o revestimento interno de argamassa de cimento além de proporcionar maior confiabilidade, proveniente do reforço das tubulações, melhora o desempenho hidráulico, através da diminuição da rugosidade interna das tubulações. A rugosidade interna das tubulações é um parâmetro que tem efeito acentuado na maioria dos cálculos que envolvem a análise dos projetos de sistemas de distribuição de água, por ser diretamente proporcional às perdas de carga ao longo das tubulações.

Aplicação de revestimento de resina epóxi

Essa técnica foi utilizada pela primeira vez no Reino Unido, em 1989. Desde então, cinco tipos de resina de epóxi foram testadas e experimentadas no Reino Unido e quatro delas receberam aprovação norte-americana na utilização em redes de abastecimento. Este processo é uma técnica de revestimento não estrutural, cujo principal objetivo é melhorar as características hidráulicas das redes e ao mesmo tempo prevenir a acumulação de tubérculos nas paredes das tubulações de ferro e aço, portanto, não irá corrigir nenhuma deterioração da tubulação (VENTURINI & BARBOSA, 2002). Entretanto, uma vez aplicado esse revestimento, não haverá contato entre a água potável² e o material da tubulação antiga, reduzindo possível contaminação e futuras deteriorações no interior das tubulações. Os poços de acesso serão escavados em locais estratégicos para coincidir com as válvulas e outros acessórios. Os tipos de materiais das tubulações que podem ser jateados são: ferro fundido, ferro fundido dúctil, cimento amianto e tubulações de aço.

Este procedimento é questionado por alguns técnicos. FERREIRA & QUINTELA (2003) afirmaram que por causa de sérios problemas de corrosão interna, na tentativa de minimizá-los, alguns técnicos procuraram reabilitar seus dutos usando revestimento interno do tipo epóxi; entretanto, ao contrário do anunciado, ao invés de uma solução, inúmeros problemas surgiram, tornando a opção selecionada mais custosa.

Limpeza das tubulações

As redes de distribuição sofrem agressões de componentes derivados da falta de qualidade da água. Segundo LOWENTHAL et al. (1986), as propriedades químicas da água transportada causam impactos no sistema de distribuição, variando de negligenciável

² Segundo a Portaria nº 1.469 da FUNASA (2000), água potável é aquela destinada para o consumo humano cujos parâmetros microbiológicos, físicos, químicos e radioativos atendam ao padrão de potabilidade e que não ofereça riscos à saúde.

a severo. Águas com propriedades químicas apropriadas praticamente não causam danos, por outro lado, as águas com propriedades químicas inadequadas reduzem a expectativa de durabilidade dos sistemas. As agressões mais frequentes nas redes são: redução do diâmetro efetivo das tubulações; deterioração da qualidade física, química e biológica da água distribuída devido à degradação da rede; altos índices de ruptura, impedindo a continuidade no abastecimento e a estanqueidade do sistema; dentre outras.

Basicamente, a falta de qualidade da água no sistema de distribuição provoca quatro impactos, são eles: sedimentação, incrustação, agressão e corrosão. A *sedimentação* é um processo de depósito de sólidos (areia, silte, matérias orgânicos, etc) na tubulação, diminuindo a capacidade de transporte de água.

As *incrustações* são decorrentes da precipitação de minerais de cálcio e ferro nas paredes da tubulação, podendo reduzir bastante a sua capacidade de condução (redução do diâmetro interno), estas ocorrem independentemente do material das tubulações. É determinada por diversos fatores como: alcalinidade, dureza e velocidade da água; e o estado da superfície interna dos tubos. Para se reduzir o surgimento das incrustações, sugere-se um domínio adequado da saturação da água, ou controle através da limpeza das tubulações, ver figura 2.2.



Figura 2.2 - Degradação do diâmetro interno na tubulação por deposição de cal e variação da rugosidade³

A *agressão* ocorre nos tubos de cimento-amianto e concreto, é provocada pela dissolução pela água da matriz de cimento em tubos de cimento-amianto e concreto, causando destruição da integridade do material.

³ Fonte: JIMÉNEZ et al. (2004).

A reação eletroquímica entre a água e as tubulações de metal pode causar o aumento da dissolução do metal e precipitação de cloretos de sódio do metal, criando erosão, formação de nódulos, água vermelha, etc; danificando estruturalmente as tubulações e o transporte hidráulico, este efeito é chamado de *corrosão*.

Limpeza mecânica

A limpeza periódica das tubulações é uma forma eficiente, dentro de suas características, para manter a capacidade de fluxo nos sistemas. Para a limpeza mecânica, são usados um equipamento chamado de “*polly-pig*” e raspadores de arraste hidráulico. Nos tubos de PVC, concreto e fibrocimento os *polly-pig* são dotados com fita de material abrasivo, para não danificar as tubulações. E, no caso de tubos metálicos não revestidos, emprega-se o *polly-pig* com escovas de aço ou raspadores de arraste hidráulico. O *polly-pig* (torpedo de poliuretano) é um instrumento especial usado para desobstrução e limpeza de tubulações, sem a remoção dos tubos ou o uso de substâncias químicas agressivas. O processo de limpeza ocorre pela raspagem do material que está incrustado nas paredes internas do tubo. Os *polly-pigs* são parecidos com uma cápsula, possuem a forma de um cilindro, com uma ponta em perfil parabólico e base côncava.

A figura 2.3 mostra um *polly-pig* de diâmetro robusto. E, a figura 2.4 apresenta um exemplo de aplicação do equipamento disponibilizado no *site* de um fabricante, pode-se observar as modificações na rugosidade da tubulação após a utilização do *polly-pig*.



Figura 2.3 - Polly-pig para tubulações de grande diâmetro⁴

⁴ Fonte: <<http://www.woma.com.br/pig.htm>>.



Figura 2.4 - Tubulação antes e depois da passagem do *polly-pig*⁵

Os *polly-pigs* são inseridos no sistema e direcionados para um caminho pré-determinado, mantendo a direção do fluxo da água. Ele projeta rotações enquanto move-se dentro da tubulação e limpa a superfície, efetuando a remoção e subsequente a descarga de todo o material estranho acumulado, aderido ou depositado. A sua movimentação pode ser acompanhada através de um pequeno rádio transmissor.

As desvantagens desta técnica são: a ineficiência, em alguns casos, nas tubulações de diâmetros pequenos, cruzetas, curvas, reduções, etc; em redes com trechos de comprimentos pequenos, onde a necessidade de várias interrupções para a reinstalação do equipamento, acarreta num processo longo, elevando as interferências na área da região envolvida; segundo TSUTIYA (2004), a limpeza não garante a permanência dos resultados, o processo de incrustação se repetirá a cada limpeza, que deverá ser feita em intervalos menores.

Limpeza química

A limpeza química oferece uma alternativa viável e segura para a reabilitação de determinados sistemas. O tipo e a intensidade dos materiais depositados determinam a quantidade de produtos e o tempo de exposição necessário para a remoção. A limpeza química promove a retirada do material depositado na superfície das tubulações e tem a vantagem de promover a desobstrução de todo circuito envolvido na recirculação da solução de limpeza, tais como, válvulas, cotovelos, cruzetas, etc. O sistema é limpo pela recirculação de produtos químicos. Completa a limpeza, o sistema é neutralizado devolvendo o Ph original do mesmo; em seguida é feita a passivação química com inibidores para prevenir futuras corrosões (tubulações de metal). Outra vantagem é a

⁵ Fonte: <<http://www.woma.com.br/pig.htm>>.

eliminação de biofilmes ou microorganismos que estejam presentes nas tubulações com a qual a solução química tenha estado em contato.

Processo A. S. (limpeza mais aplicação de revestimento interno com resina epóxi)

Este método foi desenvolvido no Japão e constitui uma solução alternativa para a restauração das redes existentes, de forma rápida, com uma tecnologia não-destrutiva. Promove o revestimento das paredes internas com resina de epóxi, prolongando a sobrevida útil. Esse processo difere do revestimento de epóxi no que tange a limpeza das tubulações, ou seja, a recuperação das tubulações é executada através da remoção da rugosidade proveniente da oxidação e das incrustações existentes nas paredes internas através da introdução de abrasivos especificamente dimensionados. O equipamento movimenta-se helicoidalmente provocando a remoção de qualquer tipo de incrustação. Imediatamente após a limpeza da superfície, inicia-se a aplicação da resina por meio pneumático.

A aplicação da resina de epóxi propicia um acabamento liso, com elevada resistência à abrasão e corrosão, além de trazer significativos benefícios, tais como: vedação de eventuais pequenos pontos de vazamento preexistentes; preenchimento de vazios presentes em pontos de fixação de válvulas, conexões, registros, etc; melhoria das condições de pressão de serviço e escoamento, dentre outros.

Substituição das tubulações

A substituição de tubulações consiste em trocar as tubulações existentes por tubulações novas. Esta medida é empregada quando as tubulações apresentam um grande número de rompimentos, nível de deterioração alto ou capacidade de transporte inferior à requerida. As substituições podem ser realizadas de maneira convencional, ou seja, com abertura de vala, que varia com o diâmetro das tubulações, ou tecnologia não-destrutivas, por exemplo, método *Brusting*.

No Brasil, quando as redes começam a apresentar problemas de altos índices de rompimento, altas taxas de incrustações e corrosão, é comum a substituição das tubulações antigas por novas. Esta opção deve ser sempre confrontada com outras alternativas, porque quando aplicada em centros urbanos, tem efeitos negativos diretos na satisfação da população (barulho, poluição visual e obstrução do tráfego próximo ao local). Mas, quando o sistema opera com vazões acima das projetadas originalmente ou o nível de deterioração

é alto, é a medida mais eficaz e deve ser adotada. MICHALIK (1994) apresentou outro fator relevante, comentando que a substituição da rede de distribuição tem prioridade quando o material da tubulação coloca em risco a saúde da população, como o caso da cidade de Dresden, na Alemanha, que fez a substituição das tubulações de chumbo.

Método *Brusting*

A reabilitação por inserção com destruição, chamada de Método *Brusting*, consiste na técnica de arrebentar a tubulação existente pelo uso de uma força radial de dentro da tubulação. Os fragmentos são expulsos para o exterior e uma nova tubulação é puxada atrás da cavidade formada pelo equipamento de fragmentação.

O aparelho com a cabeça de fragmentação hidráulica foi desenvolvido no final dos anos 70, na Inglaterra. Embora fosse originalmente desenvolvido para a indústria de gás natural, o método hidráulico é perfeitamente aplicado na substituição de redes de água e esgoto, ver figura 2.5. O diâmetro da nova tubulação pode ser igual ou superior ao tubulação antiga.

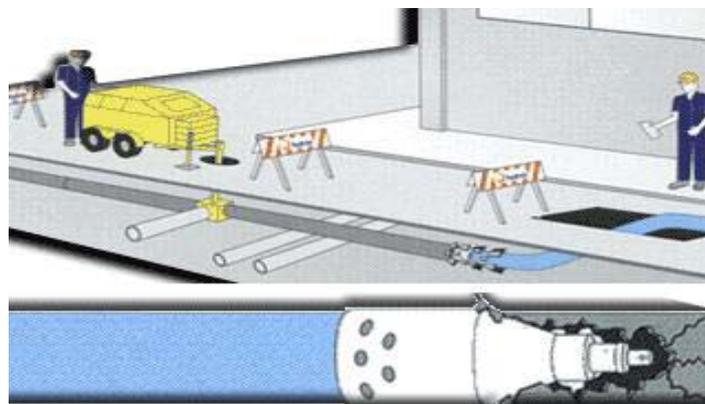


Figura 2.5 - Esquema do Método *Brusting*⁶

Relining

O processo, também chamado de *Sliplining* e *Slip Line*, foi, especificamente, desenvolvido para a renovação de redes de abastecimento no Reino Unido, em 1993. E, mais recentemente, vem sendo usado na Alemanha e Estados Unidos; todavia, esta tecnologia está se difundindo no Brasil e no mundo, ver figura 2.6.

⁶ Fonte: <<http://www.hydrax.com.br/swf/hydrax-substituicao.htm>>.



Figura 2.6 - Esquema do processo *Relining*⁷

A tubulação de polietileno (PE) é a mais adequada para o *relining*, por apresentar propriedades químicas e físicas apropriadas. O tubo vem achatado e enrolado em um grande carretel, então é inserido e puxado para o interior da tubulação e inflado, através de ar ou vapor para formar o revestimento aderente à parede da tubulação, sem a necessidade de recorrer à escavação.

Esta técnica é empregada para redes de esgotos, água potável, gás e condutos subaquáticos. Dependendo do estado e traçado da conduta, podem ser introduzidos ramos de tubo até 600 metros. A instalação pode realizar-se puxando com um cabo de aço, empurrando com um êmbolo ou, com uma combinação de ambos os métodos. Em qualquer dos casos deve-se montar uma cabeça de puxo metálica no início do tubo para evitar a deterioração do tubo e eliminar as asperezas que esta pode encontrar no seu percurso.

As principais vantagens desta técnica de reabilitação são: restauração do fluxo; conservação de fontes de energia; eliminação de corrosão interna e dos tubérculos; proteção contra futuras corrosões; redução de manutenção e tempo de construção reduzido.

Método da perfuratriz direcional (duplicação por método não-destrutivo)

A instalação de tubulações em paralelo é uma opção para aumentar a capacidade hidráulica das redes de distribuição de água urbanas. Segundo WALSKI (1986 apud VENTURINI et al., 2001), quando o crescimento da demanda superou em curto prazo a demanda prevista, a colocação de uma linha paralela à rede existente é uma ótima opção para a reabilitação do sistema. Uma maneira de instalar essas tubulações sem grande incômodo para a população é através da perfuratriz direcional (ver fig.2.7), que é um método não-destrutivo que utiliza um equipamento montado sobre esteira, com o qual

⁷ Fonte: <http://site-81.sols.pt/amb_02_8.htm>.

permite-se posicioná-lo de maneira a permitir a perfuração a partir da superfície. Toda perfuração é monitorada através de rastreadores eletrônicos, onde é possível direcioná-la e desviá-la de obstáculos e interferências existentes, ou ainda, atender às curvas e declividades especificadas em projeto.

Outra vantagem do equipamento, em relação aos demais, é a presença de um martelo percussivo hidráulico que permite a perfuração e realização de desvios de trajetórias em solos com presença de até 30% de rochas. Dependendo das características do equipamento utilizado, o martelo impõe uma força de impacto que varia de 4 a 25,9 toneladas. Este método é indicado para instalação de tubulações de água, gás, telecomunicações, etc; e podem ser inseridas tubulações de polietileno de alta densidade (PEAD) ou aço. No Brasil, apesar da perfuratriz já está sendo fabricada, esta técnica não se difundiu nas empresas de saneamento.



Figura 2.7 - Perfuratriz direcional⁸

2.2.2. Passos para a Execução do Processo de Reabilitação

A seguir, são indicados os passos para a execução da reabilitação de sistemas de distribuição de água que fazem parte da maioria dos métodos existentes.

1º passo - por recomendação da American Water Works Association (AWWA), durante a reabilitação de sistema, é importante manter os serviços de abastecimento aos usuários, através de instalação de *bypass* provisórios. Os *bypass* são tubulações que deverão ser instalados, testados contra vazamentos e clorados, podendo ser utilizados durante algumas semanas.

⁸ Fonte: <<http://www.airservice.com.br/Voyager20.htm>>.

2º passo - abertura de acesso à rede, ou seja, construção dos poços de acesso. É importante que sejam escavados em locais onde estão presentes as válvulas, registros ou curvas, pois dependendo do método a ser aplicado, irá facilitar a execução dos serviços.

3º passo - limpeza mecânica de toda a tubulação do trecho.

4º passo - aplicação do revestimento e secagem.

5º passo - aplicação do vedante - depois da aplicação do revestimento apropriado, é indicado a aplicação de um produto vedante para conectar a secção revestida a outros acessórios, com o intuito de eliminar futuros vazamentos nas conexões da rede.

6º passo - desinfecção da tubulação, a rede deve ser clorada para garantir um ambiente seguro para a água potável. O trecho deverá ser lavado e tampado para permitir a ação do cloro durante um determinado período.

7º passo - depois de aprovado o trecho pelos testes de qualidade, finalmente é feita a recolocação da rede em carga (secção reabilitada é reconectada).

Existem diversas tecnologias, no Brasil e no mundo, que auxiliam na tomada de decisão de qual técnica de reabilitação adotar, por exemplo, podemos citar a *vídeo inspeção em redes de água e esgoto* (figura 2.8). O processo consiste na análise da tubulação proporcionada pela obtenção de imagens com a introdução de uma câmera de vídeo específica, dotada de conjunto de iluminação, movimentações angulares, propagação robotizada por arraste mecânico ou manual, e em casos excepcionais, blindagem antiexplosiva. As imagens são gravadas em vídeo de alta definição, onde serão objetos de estudo, nos quais se verificam, deformações, desvios, trincas, rachaduras, juntas, rompimentos, infiltrações, dentre outros.

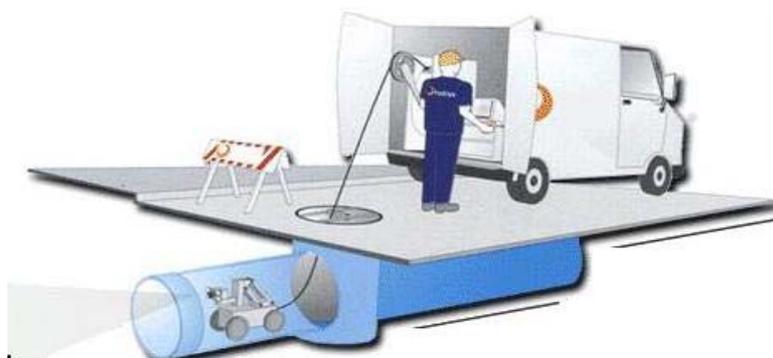


Figura 2.8 - Vídeo inspeção em redes de água e esgoto⁹

⁹ Fonte: <<http://www.hydrax.com.br/swf/hydrax-inspecao.htm>>.

2.3. MODELOS NUMÉRICOS DE REABILITAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

O processo de reabilitação pode ser dividido em duas fases, a do diagnóstico e a de implantação de medidas. O diagnóstico do sistema de distribuição compreende, o conhecimento do problema através da simulação do funcionamento hidráulico do abastecimento, juntamente com a calibração¹⁰ de modelos que possam reproduzir o que efetivamente ocorre na prática. Após a obtenção do diagnóstico do problema, deve-se estabelecer estratégias de reabilitação, levando-se em consideração, principalmente, os aspectos técnicos e econômicos (minimização de custos).

As técnicas usadas para a tomada de decisão de reabilitação da maioria das redes hidráulicas implantadas no mundo se baseia no método de tentativa e erro. Este tipo de metodologia faz o balanceamento hidráulico do sistema, desconsiderando a busca de uma solução que minimize os custos de intervenções nas instalações hidráulicas e operação das estações elevatórias. Na prática, nota-se que é comum a utilização de modelos de simulação (EPANET, SARA, WATERCAD, dentre outros).

Relativamente, poucos modelos foram propostos para quantificar a melhor estratégia da reabilitação, comprometendo-se em manter o desempenho hidráulico do sistema, em conformidade com os níveis de serviços adequados. Recentemente, vêm surgindo diversos modelos específicos para análise da reabilitação das redes existentes, alguns baseados em métodos desenvolvidos para o dimensionamento ótimo das redes de distribuição.

Os modelos de reabilitação podem ser classificados em dois grupos, o primeiro visa reabilitar os componentes de forma individualizada, sem se preocupar com a análise hidráulica e são fundamentados em técnicas estatísticas. O segundo grupo identifica os elementos a serem reabilitados através da análise hidráulica dos sistemas. A seguir, apresentar-se-á uma breve revisão literária relativa aos dois grupos, ora mencionados.

¹⁰ Segundo HARRIS (1984), a calibração é uma técnica de estimação dos parâmetros dos modelos hidráulicos, tais como, rugosidades, demandas, diâmetros, pressões, etc.

Modelos estatísticos

Os modelos estatísticos ou modelos de falhas identificam, isoladamente, os elementos dos sistemas de distribuição que devem ser reabilitados, desconsiderando os efeitos globais causados na rede decorrentes dessas alterações.

As falhas podem ser hidráulicas ou mecânicas. As falhas hidráulicas são decorrentes de diversos fatores, dentre os quais, pode-se citar: aumento de demandas, alterações físicas na rede hidráulica, vazamentos, falta de energia elétrica. As falhas mecânicas são decorrentes da quebra dos componentes hidráulicos, como, bombas, válvulas e tubulações.

Os modelos de falhas podem ser classificados em três grupos: físicos, descritivos e de previsão. Os modelos físicos estudam os fenômenos físicos que provocam falhas nas tubulações tais como: corrosão interna e externa, tensões de tráfego, tipo de solo, qualidade de água, etc. RAJANI & KLEINER (2001) apresentam uma revisão completa desses modelos.

Os modelos descritivos objetivam quantificar os parâmetros estatísticos que servem como indicador de padrões e tendências de quebras. Estes modelos necessitam de um banco de dados rico em detalhes.

Os modelos de previsão pesquisam o comportamento das quebras existentes e sua projeção para o futuro. Os principais tipos de modelos de previsão são: determinísticos e probabilísticos. CHEUNG (2004) apresenta uma revisão ampla desses modelos, pode-se destacar: SHAMIR & HOWARD (1979); WALSKI & PELLICCIA (1982); LE GAT & EINSENBEIS (2000), dentre outros.

Em geral, os modelos de falhas descritos na literatura, são de caráter científico inquestionável, entretanto necessitam de uma quantidade de dados enorme e confiável, o que na maioria das vezes não é possível, além de exigirem um grau elevado de experiência do analista para a aplicação dos modelos.

Modelos fundamentados na análise de sistemas de distribuição

Ao contrário do item anterior, os modelos fundamentados na análise de sistemas, avaliam as alternativas de reabilitação através do desempenho hidráulico global. Inúmeras aplicações dos métodos clássicos de otimização vêm sendo aplicadas na reabilitação dos sistemas.

KIM & MAYS (1990) apresentaram um método aplicando programação inteira com a programação não-linear com restrições probabilísticas para elevar a capacidade de bombeamento, de maneira que as demandas e pressões mínimas dos pontos de consumo fossem atendidas, com a função objetivo baseada na minimização dos custos de investimento. As opções consideradas foram a substituição e reparo das tubulações, energia e aumento da capacidade de bombeamento. O algoritmo de solução utilizou a técnica de enumeração implícita acoplada ao algoritmo de gradiente generalizado reduzido, para resolver o subproblema não linear. Estes pesquisadores não garantiram o ótimo global, mas admitiram a eficiência técnica. As vantagens do modelo sugerido foram a inclusão de incertezas, através da simulação de inúmeros cenários, além de incorporar na função objetivo, custos provenientes dos sistemas propulsores.

SWAMEE & SHARMA (1990) apresentaram um processo chamado “reorganização de um sistema de distribuição de água” onde foi abordado a necessidade de reestruturar os sistemas em função do aumento da demanda. Se o aumento da demanda for pequeno, então a melhoria do bombeamento é geralmente suficiente. Entretanto, se o aumento é significativo, deverão ser introduzidas tubulações em paralelo, substituir tubulações, aumentar a capacidade de bombeamento e/ou instalar novas estações de recalque.

A grande dimensão e o alto grau de não linearidade das equações envolvidas na análise dos sistemas ineficientes fazem da reabilitação um problema de difícil resolução. LI & HAIMES (1992) propuseram um modelo que maximiza a disponibilidade do sistema considerando restrições de custos. As variáveis de decisão foram os diâmetros das tubulações. Eles combateram o alto grau de não linearidade decompondo em uma série de equações lineares simples e de fácil sistematização.

KLEINER et al. (1998) analisaram os sistemas, considerando dois aspectos - estado físico das tubulações e critérios econômicos. Os critérios econômicos englobaram os custos de operação e manutenção, perdas por vazamento, redução na qualidade de serviço. Além de implementar uma análise que proporcione como resposta ações de reabilitação por um determinado período de tempo.

MARILES et al. (2004) propuseram um modelo fundamentado num processo iterativo, onde a tomada de decisão de cada iteração é baseada nos valores dos números de Reynolds das tubulações existentes, estabelecendo uma ordem de prioridade, onde as tubulações com maiores números de Reynolds serão as primeiras a serem consideradas.

Este modelo se baseou no fato do número de Reynolds estar relacionado com a velocidade e o diâmetro da tubulação; com este critério, propõe-se então mudar o diâmetro primeiramente daquelas tubulações que conduzam mais água. Sobre os resultados das simulações hidráulicas, através de uma análise custo/benefício, determinam-se finalmente quais são as opções mais convenientes. Para as análises hidráulicas, necessárias entre as diversas iterações, foi adaptado e utilizado o método desenvolvido por SÁNCHEZ & FUENTES (1991), que inicialmente foi desenvolvido para o cálculo de redes de distribuição de água.

O algoritmo genético (AG) é uma técnica “evolucionista” que vem sendo empregada em uma série de aplicações em Recursos Hídricos, que vão desde a otimização de parâmetros em modelos hidrológicos até a alocação de válvulas em redes de distribuição malhadas. Os métodos de análise de sistemas de distribuição baseados em AG são aplicados tanto para o projeto ótimo, quanto para a reabilitação das redes de distribuição. Os resultados obtidos pelos diversos pesquisadores mostraram que os AG são adequados e não requerem hipóteses simplificadoras em sua formulação (SANTOS, 2002). E com o advento do desenvolvimento computacional e dos AG, a desvantagem em relação ao tempo de máquina consumido está cada vez menor. Pode-se citar os trabalhos de MURPHY & SIMPSON (1992); SIMPSON et al. (1994); SAVIC & WALTER (1997); WALTER et al. (1999); DANDY & ENGELHARDT (2001); ALENCAR NETO (2003).

MURPHY & SIMPSON (1992 apud CHEUNG, 2004) aplicaram AG considerando como variáveis de decisão a substituição das tubulações por outras de maiores diâmetros, limpeza e instalação de tubulações paralelas. Em meados da década passada, os pesquisados desenvolveram modelos que integravam AG a simuladores de sistemas hidráulicos. SAVIC & WALTERS (1997) integraram AG a primeira versão do EPANET (ROSSMAN, 1994) e aplicaram análises econômicas a diversas redes da literatura.

DANDY & ENGELHARDT (2001) desenvolveram um modelo de decisão para fornecer planos de substituição de tubulações para um período de planejamento a longo prazo. Este trabalho proporcionou várias contribuições, destacando a incorporação de modelo de falhas.

CHEUNG (2004), propôs um modelo multiobjetivo, via algoritmo genético, à análise de reabilitação de redes. Dessa maneira, foram considerados: custo, benefício,

vazamentos e confiabilidade. Propiciou um aprimoramento do algoritmo *Multiobjective Genetic Algorithm* (MOGA), realizando uma investigação dos operadores (recombinação e mutação) e dos métodos *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA), *Strength Pareto Evolutionary Algorithm* (SPEA) e *Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA II). Sob o aspecto hidráulico, introduziu tanto perdas por vazamentos como demanda variável com a pressão, o que aproximou o modelo de uma análise mais realística do problema. O simulador hidráulico modificado proposto representa uma intervenção direta sobre o método de TODINI & PILATI (1988), implementado no EPANET 2 (ROSSMAN, 2000). Os estudos foram aplicados para redes hipotéticas (GESSLER, 1985 e TUCCIARELLI et al., 1999) e para o sistema de abastecimento de água de Campo Grande - MS (SANDIM et al., 2002); as soluções obtidas mostraram-se satisfatórias.

A revisão bibliográfica acusou que o estado da arte continua progredindo e que diversos modelos computacionais são desenvolvidos e aperfeiçoados para a análise dos problemas de reabilitação de sistemas de distribuição de água. É certo que estes estudos não são conhecidos em sua totalidade e que várias são as incertezas presentes (demandas, características físicas de operação, dados de entrada imprecisos, dentre outras), tornando o processo de decisão complexo. No entanto, os modelos de otimização são ferramentas poderosas e eficientes, porque conseguem englobar diversos fatores e apresentar respostas de maneira confiável e satisfatória.

2.4. BENEFÍCIOS PROPORCIONADOS PELA REABILITAÇÃO

Benefício hidráulico operacional

O benefício hidráulico operacional é o ganho de desempenho obtido decorrente de qualquer ação de melhoria implementada no sistema, por exemplo: a distribuição mais equilibrada das pressões nos diversos pontos de consumo da rede, eficientização dos equipamentos mecânicos, etc.

Benefício físico

O benefício físico é proporcionado pela melhoria nas condições estruturais das tubulações e equipamentos existentes, por exemplo, os elementos ficam menos suscetíveis a rompimentos e vazamentos.

Benefício econômico

A melhoria do nível de serviço resultará na diminuição nas despesas das companhias de saneamento provenientes do decréscimo dos custos associados à manutenção e operação.

Benefício ambiental

Os processos de reabilitação dos sistemas de abastecimento são, no contexto de preservação dos recursos hídricos, de importância fundamental. E o uso de técnicas de reabilitação além de influenciarem no rendimento hidráulico e na satisfação dos usuários, vai de encontro à necessidade mundial de evitar o desperdício da água, proveniente de vazamentos, perdas físicas, desperdícios operacionais, dentre outros.

SAMUEL et al. (2001), verificaram o impacto da substituição de tubulações das redes de abastecimento sobre as perdas de água no Distrito Pitométrico de Ipanema, na cidade de Porto Alegre-RS, no período de 1993 a 1998. Os dados referentes às perdas de água antes da substituição da rede foram coletados em trabalhos elaborados pelo DMAE, em 1997, enquanto que os dados após a substituição foram levantados *in loco*, em 1998. Este levantamento consistiu de coleta e análise de dados sobre os sistemas referentes às economias, volumes de água produzidos (macromedição), volumes micromedidos e índices de micromedição. Sob o ponto de vista econômico, os resultados mostraram que houve redução de perdas de água e que o capital investido deverá ser amortizado em 17 anos e 8 meses.

Benefício social

No caso do abastecimento urbano, proporciona uma melhoria do nível de serviço prestado aos consumidores, o que aumenta a satisfação dos usuários que serão diretamente afetados pelos benefícios. Por exemplo, adoção de uma tarifa aos consumidores considerada mais justa. Nos sistemas de irrigação, os benefícios sociais estão relacionados diretamente com os benefícios econômicos adquiridos, sugerindo um desenvolvimento sustentável na região afetada.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EMPREGADA

3.1. INTRODUÇÃO

Geralmente, a técnica usada na reabilitação da maioria das redes hidráulicas implantadas no mundo, se fundamenta no método de tentativa e erro. Esse tipo de metodologia faz, tão somente, o balanceamento hidráulico do sistema, desconsiderando a busca de uma solução que minimize os custos de implantação e operação da rede.

O processo de reabilitação de sistemas de abastecimento de água pode ser dividido em duas fases: diagnóstico e implantação de medidas corretivas. A elaboração prévia de um diagnóstico é imprescindível em qualquer metodologia empregada na análise de redes hidráulicas, devendo esta apresentar todas as características físicas e hidráulicas do sistema, indicando assim, os dados que irão alimentar o modelo. Tais dados podem ser divididos em dados cadastrais e dados experimentais. Os dados cadastrais envolvem os estudos referentes à simplificação do sistema: consumos demandados nos nós; características topográficas da rede; inclusão de componentes da rede (válvulas, acessórios, hidrantes, elementos de medição, elementos de controle, etc); dentre outros. Os dados experimentais são aqueles coletados *in loco* e são obtidos através de instrumentação (por exemplo, através de medidores de vazão e pressão). Estes dados podem ser analisados desde de estudos simplistas até modelos complexos de calibração. Vários modelos de calibração estão disponíveis na literatura (WALSKI, 1983; BHAVE, 1988; VÍTOVSKÝ & SIMPSON, 2000; SILVA et al., 2002; RIGHETTO, 2001; SILVA, 2003a; SOARES, 2003; BARROSO & GASTALDINI, 2004; GÓMEZ et al., 2004; JIMÉNEZ et al., 2004); dentre outros.

Após a obtenção do diagnóstico deve-se estabelecer estratégias de reabilitação do sistema, levando-se em conta os aspectos técnicos e econômicos (minimização de custos), sempre observando as questões sociais e ambientais que serão afetadas com as possíveis medidas de reabilitação a serem adotadas.

3.2. ANÁLISE ECONÔMICA DOS CUSTOS DE REABILITAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Os projetos de reabilitação dos sistemas de distribuição de água (rede de distribuição e estação de bombeamento), em sua maioria, financiados por órgãos públicos, necessitam de análises que busquem a efficientização econômica dos recursos financeiros. No mundo, os pesquisadores vêm se detendo, predominantemente, na análise da reabilitação dos sistemas de abastecimento de água, considerando inúmeros fatores técnicos (confiabilidade, perdas, vazamentos, rompimentos, qualidade da água, etc), porém não são muitos os trabalhos que visam a otimização do custo do conjunto - rede de distribuição de água mais energia elétrica consumida pelas estações de bombeamento.

3.2.1. Custos dos Projetos de Reabilitação

Neste trabalho, a análise econômica envolverá os *custos fixos* (investimentos) e os *custos variáveis* (operação e manutenção do sistema). Os custos de investimentos são aqueles realizados na fase de implantação da reabilitação, com a aquisição e instalação de novos equipamentos para as instalações hidráulicas (tubulações, bombas, válvulas, etc), enquanto os custos variáveis são os que incidem após o processo de reabilitação, ou seja, no decorrer do alcance do projeto ou da vida útil dos equipamentos (energia, reparação nas tubulações e nas peças de controle, reposição de equipamentos, dentre outras).

Para a obtenção do custo mínimo de reabilitação do sistema, 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, pode-se comparar as várias alternativas de reabilitação e escolher aquela que apresenta o menor custo total (investimento mais operação). Existem três formas clássicas de se analisar o custo total de um projeto (considerando-se os custos fixos e variáveis):

- valor presente do projeto;
- valor futuro (montante) do projeto ao término do alcance; e
- anuidades.

Neste trabalho, será empregada a análise econômica através do valor presente, onde as despesas anuais de exploração serão convertidas em valores fixos atualizados.

Custos de investimento

Os custos de investimento para a retomada do funcionamento em condições satisfatórias são determinados em função da ou das opções a serem implantadas: aplicação de revestimento interno e externo das tubulações, limpeza das tubulações, substituição das tubulações, duplicação dos trechos, instalação de booster, etc.

Custos de operação da estação de bombeamento

Segundo TSUTIYA (2004), as despesas com operação nos projetos abastecidos com sistemas de bombeamento são, de maneira predominante, relativas aos gastos de energia das estações elevatórias.

Neste trabalho, não serão considerados os demais custos, por não apresentarem relevância no custo total, ou seja, não influenciam significativamente nos resultados.

As concessionárias de energia elétrica cobram dois tipos de tarifas: uma correspondente a 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 anual do consumo de energia elétrica da estação de bombeamento dos sistemas de distribuição de água é estimado pela equação 3.1.

$$C_{energia} = P \times Tc \times n_b \quad (3.1)$$

em que:

$C_{energia}$ - custo anual com consumo de 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; e
 n_b - número de horas de bombeamento anual, em horas/ano.

$$P = 9,81 \frac{Q \times H}{\eta} \quad (3.2)$$

em que:

Q - vazão, em m³/s;

H - altura manométrica, em m; e

η - rendimento esperado do conjunto motor-bomba, valor decimal.

O custo da demanda de energia elétrica dos motores é estimado por:

$$D_{energia} = P \times Td \times 12 \quad (3.3)$$

em que:

$D_{energia}$ - custo anual com demanda de energia elétrica, em R\$/ano;

Td - preço da tarifa relativa à demanda de energia elétrica, em R\$/kWh.mês; e

12 - número de meses do ano.

O custo total (C_e) da energia elétrica da estação de bombeamento é:

$$\begin{aligned} C_e &= C_{energia} + D_{energia} \\ C_e &= P \times (T_c \times n_b + Td \times 12) \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.2.2. Análise Econômica dos Custos do Projeto através do Valor Presente

Na análise econômica através do valor presente ou atual, considera-se que as despesas com investimento são fixas e atuais, e a partir de então, as despesas variáveis com a operação da estação de bombeamento (custos anuais) são convertidas para *valores presentes*, através das equações aritméticas-financeiras que levam em conta a taxa de juros, o aumento da energia e da duração da vida útil esperada. A figura 3.1 mostra o diagrama

do fluxo de caixa dos custos anuais ao longo da vida útil do projeto, considerando que as despesas com operação ocorrerão após a realização das despesas com investimento.

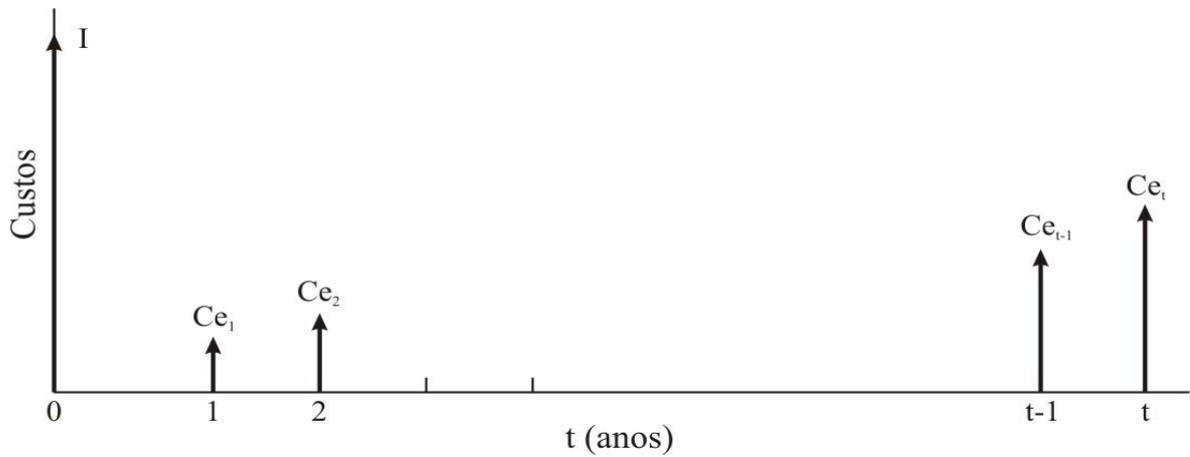


Figura 3.1 - Custos fixos e custos variáveis ao longo do tempo t
 Fonte: Adaptada de SILVA (2003b)

Considera-se que as despesas fixas com investimento (I) são realizadas na data $t = 0$, e a partir daí, começam a ser realizadas as despesas anuais com a energia do bombeamento, que incidem no final do ano correspondente. Os valores dos custos energéticos devem ser convertidos a *valores presentes* relativos à data $t = 0$. Tem-se assim o seguinte diagrama de fluxo (figura 3.2):

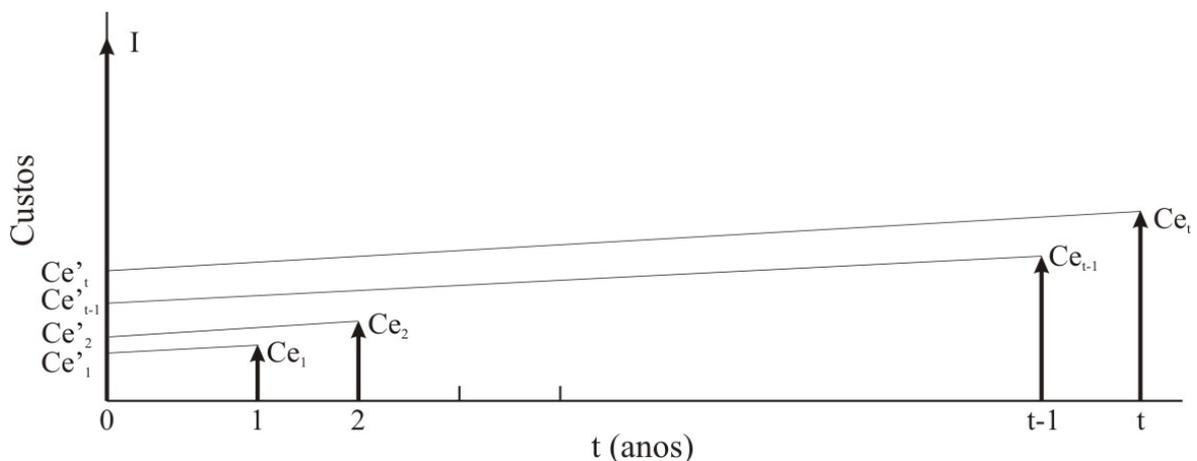


Figura 3.2 - Custo de investimento e valores presentes dos custos variáveis
 Fonte: Adaptada de SILVA (2003b)

Os custos anuais de operação da estação de bombeamento (Ce_t) para o tempo variando de 1 a t , considerando o aumento da tarifa de energia elétrica segundo uma taxa “ e ” são:

$$\begin{aligned}
 Ce_1 &= Ce \\
 Ce_2 &= Ce (1 + e) \\
 Ce_3 &= Ce (1 + e)(1 + e) \\
 &\vdots \\
 Ce_{(t-1)} &= Ce (1 + e)^{(t-1-1)} \\
 Ce_t &= Ce (1 + e)^{(t-1)}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Os valores presentes (Ce'_t), $t = 0$, para cada ano, considerando uma taxa de juros anual “ i ” são:

$$\begin{aligned}
 Ce'_1 &= \frac{Ce_1}{(1+i)} = \frac{Ce}{(1+i)} \\
 Ce'_2 &= \frac{Ce_2}{(1+i)(1+i)} = \frac{Ce(1+e)}{(1+i)(1+i)} = Ce \frac{(1+e)}{(1+i)^2} \\
 Ce'_3 &= \frac{Ce_3}{(1+i)(1+i)(1+i)} = \frac{Ce(1+e)(1+e)}{(1+i)(1+i)(1+i)} = Ce \frac{(1+e)^2}{(1+i)^3} \\
 &\vdots \\
 Ce'_{t-1} &= \frac{Ce_{(t-1)}}{(1+i)^{(t-1)}} = Ce \frac{(1+e)^{(t-2)}}{(1+i)^{(t-1)}} \\
 Ce'_t &= \frac{Ce_t}{(1+i)^t} = Ce \frac{(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

O valor presente do custo energético total de operação da estação de bombeamento (CE) do projeto será:

$$CE = \sum_{t=1}^n Ce'_t = Ce'_1 + Ce'_2 + Ce'_3 + \dots + Ce'_{t-1} + Ce'_t \tag{3.7}$$

Substituindo-se os valores de Ce'_t , tem-se:

$$CE = \frac{Ce}{(1+i)} + Ce \frac{(1+e)}{(1+i)^2} + Ce \frac{(1+e)^2}{(1+i)^3} + \dots + Ce \frac{(1+e)^{(t-2)}}{(1+i)^{(t-1)}} + Ce \frac{(1+e)^{(t-1)}}{(1+i)^t} \quad (3.8)$$

Para o alcance do projeto ($t = n$), tem-se:

$$CE = \frac{Ce}{(1+i)} + Ce \frac{(1+e)}{(1+i)^2} + Ce \frac{(1+e)^2}{(1+i)^3} + \dots + Ce \frac{(1+e)^{(n-1)}}{(1+i)^n}$$

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

$$CE = Ce \times \left[\frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (3.9)$$

Na fórmula 3.9 a expressão em colchetes será 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 energia “ e ”, para “ i ” diferente de “ e ”.

$$Fa = \frac{(1+i)^n - (1+e)^n}{(1+i) - (1+e)} \times \frac{1}{(1+i)^n} \quad (3.10)$$

Portanto, o custo energético atualizado será:

$$CE = Ce \times Fa \quad (3.11)$$

“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” (GOMES, 2004, p.63).

Na análise econômica de projetos de saneamento, alguns órgãos financiadores desconhecem, de forma proposital, a taxa do aumento da energia “*e*”, como uma forma de induzir uma estabilidade financeira na gestão dos projetos. Neste caso, o fator de atualização do custo energético será dado pela equação 3.12:

$$Fa = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (3.12)$$

3.2.3. Tarifa da Energia Elétrica no Brasil

A tarifa de energia elétrica aplicada aos consumidores finais regulados representa a síntese de todos os custos incorridos ao longo da cadeia produtiva da indústria de energia elétrica: geração, transmissão, distribuição e comercialização. O seu valor deve ser suficiente para preservar o princípio da modicidade tarifária e assegurar a saúde econômica e financeira das concessionárias, para que possam obter recursos suficientes para cobrir seus custos de operação e manutenção, bem como remunerar de forma justa o capital prudentemente investido com vista a manter a continuidade do serviço prestado com qualidade desejada (ANEEL, 2004).

Os reajustes anuais da energia elétrica são calculados com base na seguinte fórmula paramétrica (eq. 3.13), conhecida como Índice de Reajuste Tarifário - IRT (MAIA, 1999).

$$IRT = \frac{VPA_t + VPB_0 \cdot (IGPM - X)}{RA_0} \quad (3.13)$$

em que:

IRT - índice corresponde ao reajuste tarifário que deve ser aplicado anualmente;

VPA₁ - parcela composta pela evolução dos custos que independem de decisões das concessionárias, ou seja, custos não-gerenciáveis¹¹;

VPB₀ - custos que dependem essencialmente da eficácia da gestão empresarial, ou seja, custos gerenciáveis¹²;

IGPM - índice geral de preços de mercado da Fundação Getúlio Vargas;

X - fator de indução à melhoria da eficiência econômica das atividades monopolistas; e

RA₀ - receita anual da concessionária.

Tanto nas parcelas de custos quanto na parcela de receita da fórmula acima, não devem ser contabilizados os valores relativos à aquisição e à comercialização de energia para os consumidores livres, contudo, deve ser contabilizada na parcela de custos não controláveis a compra de energia para os consumidores regulados. Tampouco devem ser contabilizados os custos relativos às atividades não vinculadas à prestação de serviços elétricos (ANEEL, 2004).

Historicamente, o processo de definição das tarifas públicas no Brasil sofreu influência de objetivos da política macroeconômica: redução do *déficit* público ou combate direto à inflação. Com frequência, demandas setoriais desconsideravam a evolução dos custos específicos que pudessem fundamentar os reajustes, e a ocorrência de aumentos de produtividade. Essas características levaram ao acúmulo de distorções nos preços relativos e, em alguns casos, deram lugar ao aparecimento de subsídios cruzados entre serviços, classes de usuários e regiões (BRASIL, 1998). Com o Plano Real, houve uma mudança qualitativa em relação a esse processo. Questões relativas ao *déficit* público e inflação passaram a ser tratadas no âmbito das políticas cambial, monetária e fiscal. A partir de 1997, a política de preços públicos passou a ser a transferência para os consumidores dos custos dos serviços prestados, com a pretensão de eliminar distorções entre os custos e as receitas.

¹¹ Conta Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC); Quota da Reserva Global de Reversão (RGR); Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE); Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos (CFURH), etc.

¹² Pessoal, materiais, serviços de terceiros, remuneração, etc.

3.3. MÉTODO GRANADOS

O Método Granados (GRANADOS, 1986) é um algoritmo iterativo de otimização, desenvolvido para proporcionar o custo mínimo de uma rede de distribuição ramificada pressurizada, em função de sua cota piezométrica de alimentação. Esse método considera em seu processo de otimização, a variação do preço das tubulações em função de seus tipos, diâmetros e classes.

O processo de otimização do método consta de duas etapas. A primeira consiste na determinação de uma solução prévia (solução de contorno), e que fornece o custo do dimensionamento da rede de distribuição para a cota piezométrica de alimentação estritamente necessária para o abastecimento, composta pelas tubulações de menores diâmetros admissíveis. A segunda etapa compreende uma seqüência de iterações, na qual diminui-se paulatinamente (a partir da solução prévia) a cota piezométrica de alimentação e obtém-se, para cada decréscimo desta cota, um novo custo do dimensionamento da rede de distribuição.

Para a obtenção da solução prévia, determinam-se, inicialmente, os diâmetros mínimos admissíveis das tubulações. Estes são estabelecidos em função das velocidades máximas admissíveis e das vazões de projeto a serem transportadas pelos trechos da rede. Após a determinação dos diâmetros mínimos das tubulações dos trechos, calculam-se as perdas de carga dos trechos e a cota piezométrica de alimentação.

O algoritmo utilizado pelo Método Granados para a determinação da solução prévia, pode ser sintetizado nas seguintes etapas:

a) Admite-se a cota zero como sendo a *cota piezométrica de alimentação fictícia*, e se subtraem, seguindo a direção e sentido do fluxo de água da rede, os valores das perdas de carga dos trechos calculadas para as tubulações com os diâmetros mínimos. Os valores obtidos (negativos) são as cotas piezométricas fictícias dos pontos finais de cada trecho da rede.

b) Aos valores das cotas piezométricas fictícias calculadas, subtraem-se as cotas piezométricas mínimas de projeto, e obtém-se os excessos de pressão fictícios, também negativos.

c) Invertendo-se o sinal do mínimo valor dos excessos de pressão fictícios calculados, obtém-se a cota piezométrica de alimentação da solução prévia.

d) Em cada nó da rede, a diferença entre a cota piezométrica e a piezométrica mínima de projeto proporciona o excesso de pressão.

e) Para cada trecho da rede de distribuição, atribui-se uma classe (pressão nominal) à tubulação, em função do diâmetro calculado, do material adotado e da pressão de trabalho. Esta pressão corresponde à máxima pressão hidráulica (estática, dinâmica ou sobrepressão decorrente de golpe de aríete) que atua na tubulação.

f) O custo da rede de distribuição, relativo à solução prévia, é definido diretamente a partir dos comprimentos das tubulações dos trechos, dos diâmetros mínimos calculados e das classes adotadas.

Após o estabelecimento da solução prévia (cota piezométrica de alimentação, diâmetros, classes das tubulações e custo da rede correspondente), inicia-se a segunda etapa do método. Esta compreende uma seqüência de iterações, na qual se diminui gradualmente (a partir da solução prévia) a cota piezométrica de alimentação e se obtém, para cada decréscimo desta cota, um novo custo ótimo da rede de distribuição. O procedimento utilizado para se reduzir gradualmente a cota piezométrica de cabeceira consiste em diminuir - em cada iteração - a perda de carga na artéria crítica ou mais forçada da rede. Essa diminuição é feita com o aumento do diâmetro da tubulação no trecho de menor *gradiente de câmbio*. O gradiente de câmbio, correspondente a um determinado trecho da rede, representa o acréscimo de custo por diminuição de perda de carga, produzido pela mudança de seu diâmetro pelo diâmetro nominal consecutivo superior.

3.4. METODOLOGIA EMPREGADA

A metodologia empregada neste trabalho é fundamentada no algoritmo de otimização de Granados, e se divide em duas etapas. A primeira consiste na determinação da solução inicial, no qual a rede será composta pelos diâmetros das tubulações existentes, submetidos às vazões do projeto de reabilitação.

Na maioria dos sistemas ineficientes, ocorrem perdas de carga superiores às adotadas no projeto original, seja pelo aumento das demandas não previsto, seja por problemas de deterioração física dos componentes das instalações hidráulicas: incrustação nas tubulações, ineficiência na operação relacionada com vazamentos, rompimentos de

tubulações, falta de otimização operacional eletromecânica dos bombeamentos, etc. Estes refletem diretamente no desempenho, na qualidade do abastecimento - vazões e pressões insuficientes nos pontos de consumo, interrupções no fornecimento, qualidade da água, etc; como também, em aspectos econômicos - custos elevados de energia, reparação e manutenção dos equipamentos.

Devido aos fatores, ora mencionados, o sistema requer uma maior pressão de distribuição. Essa pressão, necessária para alimentar a rede com as novas condições de projeto, será representada por uma cota piezométrica de alimentação fictícia, que será a condição de contorno do método.

A segunda etapa da metodologia compreende uma seqüência de iterações, na qual, diminui-se paulatinamente (a partir da solução inicial) a cota piezométrica de alimentação e, obtém-se, para cada decréscimo desta cota, um novo custo de reabilitação da 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 iterativo termina quando o custo de intervenção numa determinada iteração superar o custo energético. Esta iteração 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.

3.4.1. Primeira Etapa (Solução Inicial)

O algoritmo utilizado para a determinação da solução inicial, pode ser dividido em dois passos:

1º passo - cálculo da carga hidráulica fictícia (CHf) de cada nó, que é igual a cota do terreno, mais as perdas de carga nos trechos a montante do nó, mais a pressão requerida neste nó (eq. 3.14). Na prática, representa o valor da cota piezométrica de alimentação necessária para que neste nó a pressão requerida seja igual à pressão disponível.

$$CHf = Ct + \sum Hf_{mon} + Preq \quad (3.14)$$

em que:

CHf - carga hidráulica fictícia, em m;

Ct - cota do terreno, em m;

$\sum Hf_{mon}$ - somatório das perdas de carga nos trechos a montante do nó, em m;

P_{req} - pressão requerida, em m.

2º passo - determinação da cota piezométrica de alimentação inicial (Z_0), que corresponderá ao valor da carga hidráulica fictícia máxima (CHf_{max}), e é expresso por:

$$Z_0 = CHf_{max} \quad (3.15)$$

em que:

Z_0 - cota piezométrica de alimentação fictícia inicial, em m;

CHf_{max} - carga hidráulica fictícia máxima, em m.

3.4.2. Segunda Etapa (Processo Iterativo)

De posse da solução inicial, inicia-se a segunda etapa do método. Esta consiste na execução de um processo iterativo de operações que reduz gradualmente a cota piezométrica de alimentação com o mínimo acréscimo de custo da rede.

Para definir a intervenção ou modificação em uma determinada tubulação da rede, que provoque o menor aumento de custo, utilizar-se-á o conceito de *Gradiente de Câmbio* (GRANADOS, 1986). Originalmente, o gradiente de câmbio de um determinado trecho foi definido como o acréscimo de custo gerado pela substituição de uma tubulação específica por outra de maior diâmetro, relacionado com a diminuição da perda de carga correspondente. Nesta pesquisa, este conceito foi ampliado, passando a sua definição a ser o custo marginal da diminuição da perda de carga, alcançado em um certo trecho, mediante a aplicação de uma opção de reabilitação (substituição das tubulações antigas por novas de maiores diâmetros, limpeza e reparo das tubulações antigas, etc), e é expresso por:

$$G = \frac{P_2 - P_1}{\Delta Hf} \quad (3.16)$$

em que:

G - gradiente de câmbio, em R\$/m;

P_1 - custo da reabilitação da tubulação do trecho na situação inicial, em R\$;

P_2 - custo da reabilitação da tubulação do trecho após a intervenção, em R\$;
 ΔH_f - alívio da perda de carga proporcionada pela intervenção, em m.

A figura 3.3 mostra o esquema das linhas piezométricas de uma rede fictícia de distribuição de água, com insuficiência de pressão nos pontos de consumo, em três situações distintas: antes da proposta de reabilitação do sistema, solução inicial do método (rede com a cota de cabeceira fictícia inicial) e solução definitiva (rede com a configuração ao final da avaliação). Na situação do projeto original (linha piezométrica azul) nota-se que apenas no nó 8 a pressão disponível é superior à requerida, enquanto nos demais trechos da rede a pressão é inferior a necessária. Na solução inicial do método, há um acréscimo de carga em toda a linha piezométrica da rede (linha piezométrica vermelha), de maneira que no nó ou nós mais desfavoráveis da rede a pressão disponível seja igual à requerida. A solução definitiva (linha piezométrica verde), a cota piezométrica de alimentação proporciona o custo mínimo do conjunto, resultando numa combinação ótima das intervenções físicas e a altura manométrica mais adequada (ótima).

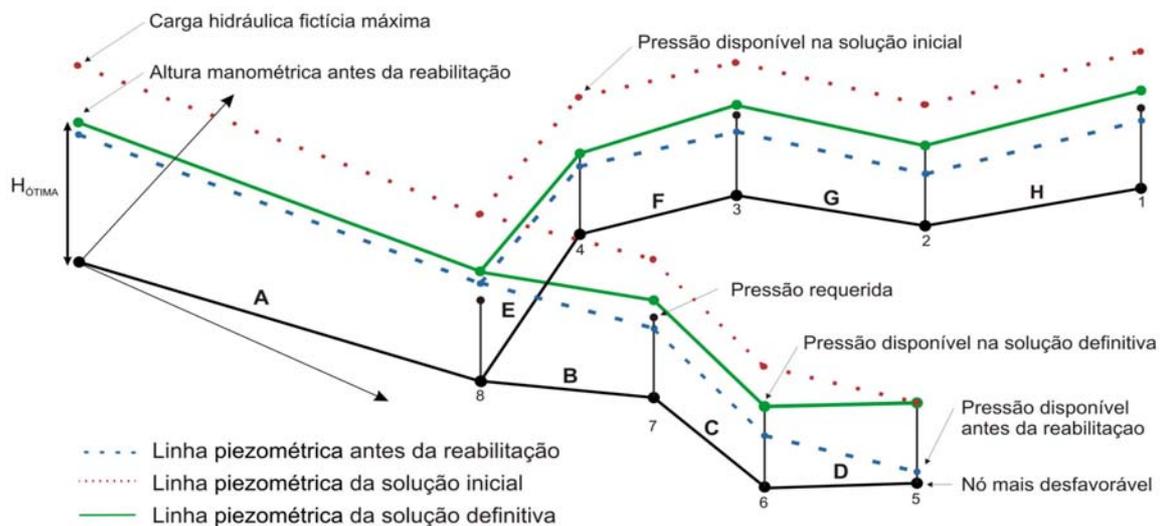


Figura 3.3 - Esquema das linhas piezométricas para três situações de projeto: antes da reabilitação, solução inicial e solução definitiva

Gradiente energético do sistema de distribuição de água

O custo atualizado da energia de bombeamento, por metro de elevação, será chamado de *Gradiente Energético* (Ge), que corresponde ao barateamento alcançado em

consumo de energia, para um metro na redução da cota piezométrica de alimentação. Assim sendo, 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 (eq. 3.17) é igualado ou superado pelo valor do gradiente de câmbio ótimo (G^*) no processo iterativo.

$$Ge = Pm \times (Tc \times n_b + Td \times 12) \times Fa \quad (3.17)$$

em que:

Ge - gradiente energético, em R\$/m;

Pm - potência requerida por metro de elevação (potência unitária), em kW/m;

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

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

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

Fa - fator de atualização (eq. 3.10).

Processo iterativo

Esta etapa compreende uma seqüência de iterações, na qual diminui-se, paulatinamente, a cota piezométrica de alimentação e obtém-se, para cada decréscimo desta cota, um novo custo de reabilitação da rede de distribuição, proveniente das intervenções nos trechos da rede. As opções de reabilitação, consideradas neste trabalho, são a substituição das tubulações antigas por novas de maiores diâmetros.

Para reduzir a cota piezométrica de alimentação da rede é necessário diminuir as perdas de carga que ocorrem nas artérias mais desfavoráveis do sistema de distribuição. Em termos de diminuição da perda de carga, com o objetivo de baixar a cota de alimentação, é indiferente que essa diminuição se produza em qualquer trecho das artérias mais desfavorável. Como se pretende baixar a cota de cabeceira, com o menor acréscimo de custo, a diminuição da perda de carga deve ocorrer no trecho, cuja alteração proporciona o menor impacto nos custos de reabilitação da rede, por unidade de altura de carga. Portanto, deve-se intervir no trecho de menor gradiente de câmbio, pertencente à artéria mais desfavorável (excesso de pressão nulo). No caso de haver mais de uma artéria desfavoráveis, os trechos potenciais serão aqueles cuja soma dos gradientes de câmbio das

combinações dos diversos trechos em paralelo das artérias mais desfavoráveis for o menor. Estes trechos são denominados de *trechos potenciais* (T^*).

Para cada iteração a opção de intervir ou não na rede de distribuição dependerá do valor do gradiente de câmbio ótimo e do gradiente energético. O gradiente energético será o determinante na escolha da opção de custo mínimo, quando o seu valor for superado ou igualado pelo gradiente de câmbio ótimo ($C_e \leq G^*$) da iteração, o processo iterativo estará terminado e a cota piezométrica será a ótima.

Em cada iteração da segunda etapa do método, o decréscimo de pressão na cabeceira da rede (ΔZ) será o menor valor entre o alívio da perda de carga (ΔH_f) nos trechos potenciais, e o mínimo excesso de pressão nos nós situados a montante dos trechos potenciais. Caso o valor de ΔH_f disponível do trecho potencial seja menor do que o excesso de pressão mínima na rede (EP_{min}), o decréscimo de pressão na cabeceira será igual ao valor ΔH_f , e a intervenção ocorrerá em todo o comprimento dos trechos potenciais. A linha piezométrica da rede resultante ficará rebaixada em ΔZ (excetuando o trecho potencial e aqueles situados a jusante do mesmo). Os excessos de pressão de toda a rede serão iguais aos anteriores, menos ΔZ ou ΔH_f , excetuando os excessos correspondentes aos trechos potenciais e os situados à jusante do mesmo, que permanecem invariáveis. Quando ΔH_f disponível do trecho potencial é maior que EP_{min} , o decréscimo de pressão na cabeceira será igual a EP_{min} , e o trecho potencial torna-se composto por dois sub-trechos, o primeiro permanecendo inalterado. Em tal caso, e para esse trecho, o novo valor de $\Delta H_{f_{disp}}$ será igual ao $\Delta H_{f_{disp}}$ anterior menos EP_{min} . A nova cota piezométrica de cabeceira, e os novos excessos de pressão dos nós da rede ficarão rebaixadas em EP_{min} , com exceção do trecho potencial e dos situados à jusante do mesmo.

Definida a cota de alimentação da rede, faz-se o reajuste, quando necessário, dos gradientes de câmbio dos trechos ótimos. O atual custo de reabilitação passará a ser igual ao custo anterior de reabilitação mais a diferença do custo proporcionado pelo aumento de diâmetro dos trechos potenciais, ou seja, o custo anterior mais o produto de ΔZ por G^* .

O processo iterativo segue a metodologia, baixando a cota piezométrica de cabeceira, até alcançar a cota piezométrica de cabeceira ótima.

A segunda etapa do método proposto pode ser sintetizada em dois passos:

- Computação do gradiente energético da rede de distribuição
- Processo iterativo
 - a) cálculo dos gradientes de câmbio (G) dos trechos;
 - b) determinação do gradiente de câmbio ótimo;
 - c) comparação do gradiente de câmbio ótimo com o gradiente energético;
 - d) determinação dos trechos potenciais;
 - e) cálculo do decréscimo da cota piezométrica de cabeceira;
 - f) obtenção da nova cota piezométrica de cabeceira;
 - g) modificação dos trechos potenciais (T^*);
 - h) reajuste dos gradientes de câmbio nos trechos que sofreram intervenções;
 - i) cálculo do novo custo de reabilitação.

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da aplicação da metodologia a duas redes exemplo encontradas na literatura, uma considerada de pequeno porte, hipotética (ALPEROVITZ & SHAMIR, 1977), e outra de médio porte, real (rede de distribuição do Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho em Petrolina).

4.1. REDE EXEMPLO 1

Inicialmente, optou-se pela adoção de uma rede de pequeno porte, onde ajustes e adaptações serão feitos para a aplicação da metodologia exposta, considerando duas opções de reabilitação: substituição das tubulações antigas por novas; e limpeza e reforço das tubulações. A REDE EXEMPLO 1 foi proposta originalmente por ALPEROVITZ & SHAMIR (1977) e tem sido empregada desde então como rede teste para verificar a adequação e aplicabilidade de diferentes modelos matemáticos. Esta rede é composta por seis nós consumidores, conectados entre si por oito trechos que formam dois anéis. A Figura 4.1 mostra o esquema da rede.

As demandas nos nós foram majoradas em 30% em relação aos valores adotados inicialmente por ALPEROVITZ & SHAMIR (1977), para assim, simularmos um aumento da demanda não previsto no projeto original. Os dados das demandas, cotas, pressões requeridas nos nós, são mostrados na tabela 4.1. Os diâmetros adotados foram retirados do dimensionamento econômico ótimo obtido dos trabalhos de SAVIC & WALTERS (1997); CUNHA & SOUSA (1999); IGLESIAS et al. (2004), estes valores estão descritos na tabela 4.2.

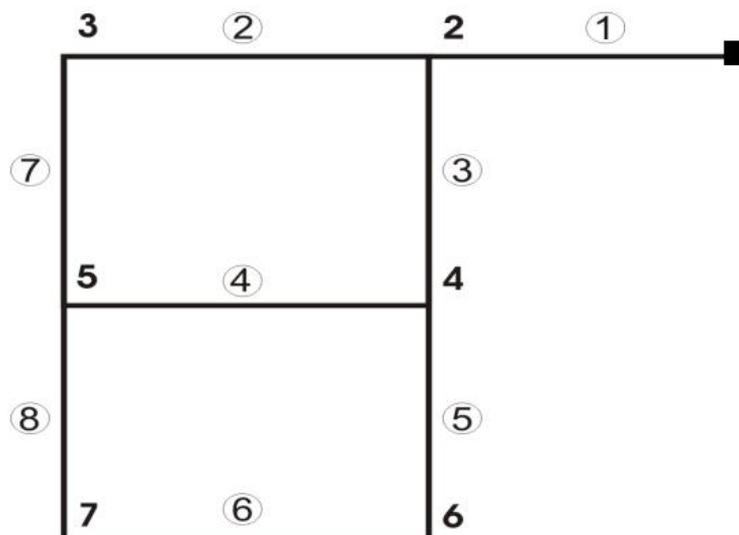


Figura 4.1 - Esquema da REDE EXEMPLO 1

Tabela 4.1 - Características dos nós da REDE EXEMPLO 1

Nó	Cota (m)	Demanda original (l/s)	Demanda adotada (l/s)	Pressão mínima (m)
1	170*	-	-	-
2	150	27,78	36,11	30
3	160	27,78	36,11	30
4	155	33,33	43,33	30
5	150	75,00	97,50	30
6	165	91,67	119,17	30
7	160	55,56	72,22	30

* valor adotado arbitrariamente.

A tabela 4.3 apresenta as pressões disponíveis para uma cota piezométrica de cabeceira igual a 210 metros (adotada inicialmente por ALPEROVITZ & SHAMIR, 1977), onde se pode observar que dos seis nós consumidores, apenas em dois a pressão disponível é maior do que a pressão requerida. As perdas de carga por atrito nos trechos da rede coletiva serão calculadas através da fórmula de Hazen-Williams. Neste estudo efetuaram-se modificações nos valores dos coeficientes de perda de carga de Hazen-Williams, para assim, podermos simular problemas de incrustações nas tubulações (coeficientes variando entre 110 e 130), estes valores estão descritos na tabela 4.2. A figura 4.2 fornece as vazões dos trechos e as pressões nos nós.

Tabela 4.2 - Características dos trechos da REDE EXEMPLO 1, traçado original

Trecho	Diâmetro	Nó montante	Nó jusante	Coefficiente de H. W.*	Comprimento (m)
1	457,2	7	1	110	1000
2	254,0	1	2	110	1000
3	406,4	1	3	115	1000
4	101,6	2	4	125	1000
5	406,4	3	4	130	1000
6	254,0	3	5	125	1000
7	254,0	4	6	120	1000
8	25,4	5	6	110	1000

* valores adotados arbitrariamente para simularmos os problemas de incrustações nas tubulações.

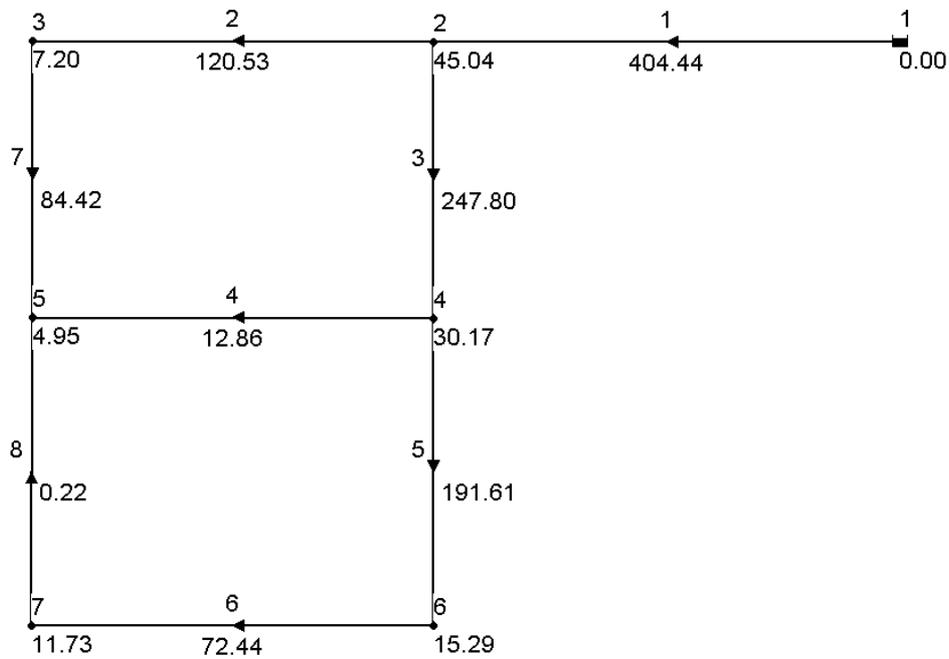


Figura 4.2 - Vazões nos trechos (simulação hidráulica do EPANET 2)

Tabela 4.3 - Pressões nos nós da REDE EXEMPLO 1, considerando a cota piezométrica de alimentação de 210 metros (simulação EPANET 2)

Nó	Altura piezométrica (m)	Cota do terreno (m)	Pressão disponível (m)	Pressão requerida (m)	Déficit de pressão (m)
2	195,04	150	45,04	30	-
3	167,20	160	7,20	30	22,80
4	185,17	155	30,17	30	-
5	154,95	150	4,95	30	25,05
6	180,29	165	15,29	30	14,71
7	171,73	160	11,73	30	18,27

4.1.1. Resolução da REDE EXEMPLO 1

Os custos associados às intervenções físicas são descritos na tabela 4.4. Após a adoção da limpeza e reforço como opção, consideraremos que o coeficiente de perda de carga das tubulações revitalizadas passará a ser 140 ($C = 140$).

Tabela 4.4 - Diâmetros disponíveis e custos unitários (unidade monetária por metro)

Diâmetro		Custo unitário (um/m)		
(in)	(mm)	Novas ¹³	Substituição*	Limpeza e reparo**
1	25,4	2	2,30	1,38
2	50,8	5	5,75	3,46
3	76,2	8	9,20	5,53
4	101,6	11	12,65	7,60
6	152,4	16	18,40	11,05
8	203,2	23	26,45	15,86
10	254,0	32	36,80	22,03
12	304,8	50	57,50	34,30
14	355,6	60	69,00	41,08
16	406,4	90	103,50	61,26
18	457,2	130	149,50	87,79

* Os custos de substituição de tubulações instaladas são maiores que os custos de implantação de novas, pois na substituição estão envolvidos outros fatores (por exemplo, a remoção do solo e das tubulações antigas). Como estes custos adicionais são comuns a qualquer trecho sujeito as substituições, adotamos um fator multiplicativo de 1,15.

** Valores fictícios baseados na linha de tendência dos valores adotados (substituição versus limpeza e reforço) por HALHAL et al. (1997).

¹³ Fonte: ALPEROVITZ & SHAMIR (1977).

É sabido que as redes malhadas dimensionadas por métodos de otimização (critérios econômicos) tentem a se comportar como redes ramificadas, fazendo com que o fluxo da água siga sempre dos trechos com maiores diâmetros para os com menores diâmetros, havendo uma convergência em um ou uns determinados nós. Portanto, podemos seccionar a rede, tornando-a uma rede ramificada, sem grande influência nos resultados. Ao término da análise, de posse dos resultados, verificamos a distribuição das vazões nos trechos e as pressões nos nós. As análises (simulações) hidráulicas serão feitas com o auxílio do programa EPANET 2 (ROSSMAN, 2000).

Simulando a REDE EXEMPLO 1 no EPANET 2 encontram-se as vazões e o direcionamento do fluxo da água ao longo da rede de distribuição, com isto, temos um embasamento hidráulico para seccionarmos a rede de maneira apropriada; passando esta a assumir o traçado indicado na figura 4.3. Os dados dos trechos da nova rede (ramificada) estão descritos nas tabelas 4.5.

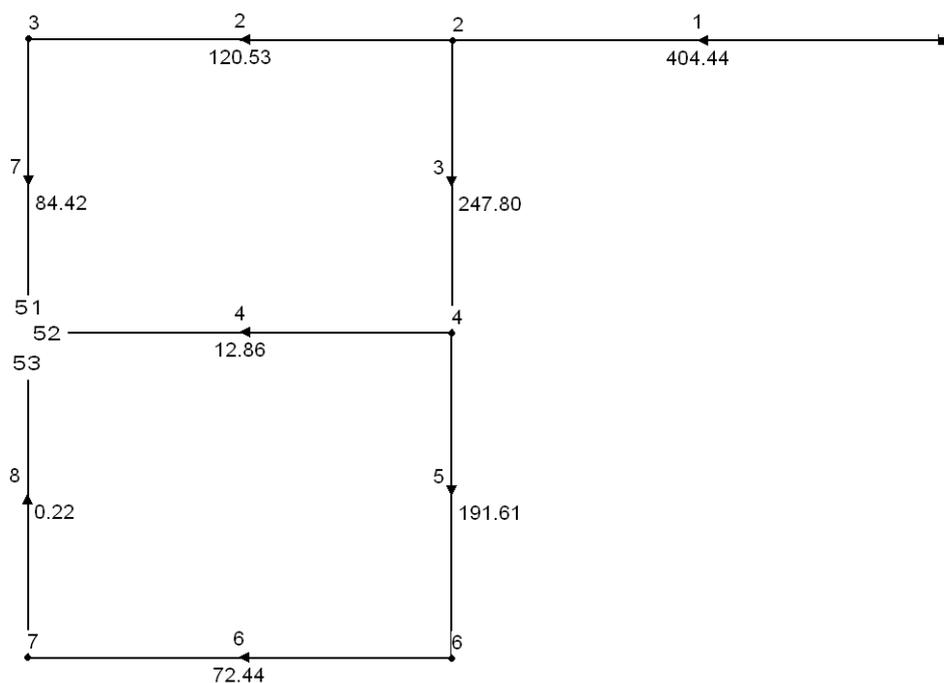


Figura 4.3 - Esquema da REDE EXEMPLO 1 seccionada (ramificada)

Tabela 4.5 - Dados dos trechos da REDE EXEMPLO 1 ramificada

Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Coefficiente H. W.	Comprimento (m)	Perdas (m)
1	404,44	457,2	110	1000	14,937
2	120,53	254,0	105	1000	27,781
3	247,8	406,4	110	1000	9,854
4	12,86	101,6	125	1000	30,132
5	191,61	406,4	130	1000	4,877
6	72,44	254,0	125	1000	8,539
7	84,42	254,0	120	1000	12,228
8	0,22	25,4	110	1000	17,447

Primeira Etapa - Solução Inicial

O primeiro passo da metodologia consiste na determinação das cargas hidráulicas fictícias (CHf) dos nós, cujos valores estão descritos na tabela 4.6. A cota piezométrica de alimentação inicial será o maior valor entre as cargas hidráulicas fictícias (CHf_{max}); neste caso: 235,66 m (Z_0).

Tabela 4.6 - Carga hidráulica fictícia dos nós, em metros, REDE EXEMPLO 1

Nó	CHf	Nó	CHf	Nó	CHf
2	194,94	4	209,79	6	224,67
3	232,72	7	228,21		
51*	234,95	52*	234,92	53*	235,66

* Nós fictícios.

A tabela 4.7 apresenta os primeiros resultados do método (solução inicial), fornecendo as pressões nos nós da rede de distribuição para uma cota de alimentação de 235,66 metros e os trechos sem alterações.

Tabela 4.7 - Resultado da solução inicial do método

Nó	Altura piezométrica (m)	Cota do terreno (m)	Pressão disponível (m)	Pressão requerida (m)	Excesso de pressão (m)
2	220,72	150	70,72	30	40,72
3	192,94	160	32,94	30	2,94
4	210,86	155	55,86	30	25,86
51	180,71	150	30,71	30	0,71
52	180,73	150	30,73	30	0,73
53	180,00	150	30,00	30	0,00
6	205,99	165	40,99	30	10,99
7	197,45	160	37,45	30	7,45

Segunda Etapa

Adotaremos um valor de 20.000,00 um/m, para o custo unitário da energia capitalizada por metro de elevação (gradiente energético) da estação de bombeamento¹⁴.

$$Ge = 20.000,00 \text{ um/m}$$

Processo Iterativo

A seguir, executa-se o processo iterativo de cálculo, no qual se baixa, passo a passo, a cota piezométrica de cabeceira até alcançar a ótima, que corresponde àquela onde o custo total do projeto (intervenções físicas mais custo de operação) for mínimo.

Para o cálculo dos gradientes de câmbio, deve-se, primeiramente, fazer uma comparação entre os valores dos gradientes proporcionados pela limpeza e os da substituição do trecho com o diâmetro interno existente pelo comercial interno imediatamente superior, para assim, determinar-se qual a primeira opção a ser adotada para cada trecho, isso dependerá essencialmente do alívio da perda de carga proporcionado pela intervenção. Por exemplo, podemos citar o caso do trecho 5, como o coeficiente da perda de carga passará de 130 para 140 (uma diferença pequena), temos que o gradiente de

¹⁴ É importante salientar que a resolução da REDE EXEMPLO 2 apresentará cálculos referentes aos custos energéticos; estes cálculos foram desprezados neste exemplo, pelo fato de se tratar de um caso fictício.

câmbio será 97.941,16 um/m, um valor bastante elevado quando comparado com a substituição direta: 52.390,22 um/m. Os dados da comparação estão descritos na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dados referentes à escolha da primeira opção (substituição ou reparo)

Trecho	Limpeza e reparo	Substituição	Trecho	Limpeza e reparo	Substituição
1	16.315,55	18.445,25	5	97.941,16	52.390,22
2	2.201,40	2.442,99	6	13.626,77	8.786,58
3	20.361,15	21.678,41	7	7.254,32	5.920,25
4	1.937,04	598,34	8	219,58	292,99

A tabela 4.9 indica os valores dos gradientes de câmbio e das perdas de carga, das diversas possibilidades para os trechos da rede. A tabela 4.10 apresenta um resumo dos cálculos dos gradientes “candidatos” a ótimo para cada iteração.

Tabela 4.9 - Gradientes de câmbio e perdas de carga dos trechos da REDE EXEMPLO 1

Trecho	Opção de reabilitação	Diâmetro	Coefficiente H. W.	H_f (m)	ΔH_f (m)	Preço (um)	Custo (um)	G (um/m)
1	-	457,2	110	14,937	-	0	0,00	-
	limp. e reparo	457,2	140	9,557	5,38	87,79	87.790,00	16.315,55
	substituição	508	140	5,721	3,84	170	170.000,00	21.432,80
2	-	254,0	110	27,781	-	0	0,00	-
	limp. e reparo	254,0	140	17,774	10,01	22,03	22.030,00	2.201,40
	substituição	304,8	140	7,314	10,46	50	50.000,00	2.674,13
	substituição	355,6	140	3,452	3,86	60	60.000,00	2.589,57
	substituição	406,4	140	1,802	1,65	90	90.000,00	18.174,44
	substituição	457,2	140	1,015	0,79	130	130.000,00	50.857,53
3	-	406,4	115	9,854	-	0	0,00	-
	limp. e reparo	406,4	140	6,845	3,01	61,26	61.260,00	20.361,15
	substituição	457,2	140	3,857	2,99	130	130.000,00	23.004,75
4	-	101,6	125	30,132	-	0	0,00	-
	substituição	152,4	140	3,391	26,74	16	16.000,00	598,34
	substituição	203,2	140	0,835	2,56	23	23.000,00	2.739,19
	substituição	254,0	140	0,282	0,55	32	32.000,00	16.258,78
	substituição	304,8	140	0,116	0,17	50	50.000,00	108.551,57
5	-	406,4	130	4,877	-	0	0,00	-
	substituição	457,2	140	2,396	2,48	130	130.000,00	52.390,22
6	-	254,0	125	8,539	-	0	0,00	-
	substituição	304,8	140	2,849	5,69	50	50.000,00	8.786,58
	substituição	355,6	140	1,345	1,50	60	60.000,00	6.648,67
	substituição	406,4	140	0,702	0,64	90	90.000,00	46.662,64
7	-	254,0	120	12,228	-	0	0,00	-
	substituição	304,8	140	3,782	8,45	50	50.000,00	5.920,25
	substituição	355,6	140	1,785	2,00	60	60.000,00	5.007,70
	substituição	406,4	140	0,932	0,85	90	90.000,00	35.145,73
8	-	25,4	110	17,447	-	0	0,00	-
	limp. e reparo	25,4	140	11,162	6,28	1,38	1.380,00	219,58
	substituição	50,8	140	0,382	10,78	5	5.000,00	335,79
	substituição	76,2	140	0,053	0,33	8	8.000,00	9.126,12
	substituição	101,6	140	0,013	0,04	11	11.000,00	75.123,53

Os trechos com gradiente de câmbio acima de 20.000,00 um/m automaticamente foram descartados. Na solução inicial, o excesso de pressão nulo ocorre no nó 8, pertencente à artéria formada pelos trechos 1 ($G_1 = 16.315,55$ um/m), 3 ($G_3 = 8.786,58$ um/m), 5 ($G_5 = 52.390,22$ um/m), 6 ($G_6 = 8.786,58$ um/m) e 8 ($G_8 = 219,58$ um/m). Portanto, o trecho potencial será o 8 (oito), que é igual a 219,58 um/m (G_{0-1}^*). O decréscimo da cota de cabeceira (ΔZ_{0-1}) será de 0,714 metros (EP_7), referente ao menor valor entre a perda de carga disponível no trecho potencial (ΔHf_8) e os excessos de pressão nos demais trechos da rede ($EP_1, EP_2, EP_3, EP_4, EP_5, EP_6, EP_7$). O custo de reabilitação da rede será igual a 156,78 um; que é o resultado do produto de EP_7 por G_{0-1}^* . Com isto, parte do trecho será limpo e reparado e os novos excessos de pressão passam a ser iguais aos anteriores menos 0,714 metros. Os valores das pressões disponíveis nos nós serão iguais, em todas as iterações, aos valores de EP mais a pressão requerida.

O processo iterativo de cálculo segue, conforme a tabela 4.11, baixando passo a passo a cota piezométrica de alimentação, até alcançar a cota de alimentação que proporciona o custo mínimo do sistema (intervenções físicas e energia elétrica).

O processo iterativo termina na 6ª iteração, quando o valor de G^* passa de 16.315,55 um/m para 21.432,80 um/m, que é maior que Ge (20.000,00 um/m). Os valores das variáveis da última iteração (6ª), tabela 4.11, sintetizam os resultados da reabilitação da rede de distribuição, cujo custo de reabilitação (substituição de tubulações) é 155.331,60 um. Os diâmetros definitivos dos trechos e as pressões disponíveis resultantes se encontram nas colunas 2 e 6, respectivamente. A cota piezométrica ótima de alimentação é de 219,29 metros, correspondente a uma altura manométrica de bombeamento de 49,29 metros, já que a cota do nível de água da sucção adotada é de 170 metros.

A tabela 4.11 fornece em cada iteração, para o(s) diâmetro(s) de cada trecho, os gradientes de câmbio (coluna 3), os excessos de pressão (coluna 4), a diferença das perdas de carga (coluna 5) e as pressões disponíveis no nó de jusante de cada trecho (coluna 6). Os trechos (ID) em negrito indicam os trechos potenciais; os valores em negrito dos EP e ΔHf são os “candidatos” a serem o decréscimo de pressão na cabeceira da rede, dentre estes, o valor tachado (riscado) corresponde ao decréscimo adotado (menor valor entre os “candidatos”); e os valores em itálico são aqueles que sofreram alterações em relação à iteração anterior.

As combinações da soma dos gradientes de câmbio dos trechos, para a determinação do ou dos trechos potenciais e do gradiente de câmbio ótimo estão descritas resumidamente na tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Combinações dos trechos “candidatos” a potenciais, para o cálculo dos gradientes de câmbio ótimo

Iteração	Trechos “candidatos”	Gradiente de câmbio	Iteração	Trechos “candidatos”	Gradiente de câmbio
sol. inicial - 1 ^a	G ₁	16.315,55	3 ^a - 4 ^a	G ₁	16.315,55
	G ₆	8.786,58		G ₂ +G ₄ +G ₆	11.586,33
	G ₈	219,58		G ₂ +G ₄ +G ₈	3.135,53
1 ^a - 2 ^a	G ₁	16.315,55	G ₇ +G ₄ +G ₆	15.305,17	
	G ₂ +G ₆	10.987,99	G ₇ +G ₄ +G ₈	6.854,38	
	G ₂ +G ₈	2.420,98	G ₁	16.315,55	
	G ₇ +G ₆	14.706,84	4 ^a - 5 ^a	G ₂ +G ₄ +G ₆	11.586,33
2 ^a - 3 ^a	G ₇ +G ₈	6.139,83	G ₇ +G ₄ +G ₆	15.305,17	
	G ₁	16.315,55	G ₁	16.315,55	
	G ₂ +G ₄ +G ₆	11.586,33	5 ^a - 6 ^a	G ₂ +G ₄ +G ₆	12.059,05
	G ₂ +G ₄ +G ₈	3.019,32	G ₇ +G ₄ +G ₆	15.305,17	
	G ₇ +G ₄ +G ₆	15.305,17	6 ^a - 7 ^a	G ₁	21.432,80
G ₇ +G ₄ +G ₈	6.738,17				

Tabela 4.11 - Processo iterativo: 2ª etapa

Solução inicial							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_0) =							235,66 m
Trecho	Diâmetro	Coefficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	40,72	5,381	70,72
2	254,0	110	2.201,40	3	2,94	10,007	32,94
3	406,4	115	-	4	25,87	-	55,87
4	101,6	125	598,34	52	0,74	26,741	30,74
5	406,4	130	-	6	10,99	-	40,99
6	254,0	125	8.786,58	7	7,45	5,690	37,45
7	254,0	120	5.920,25	51	0,74	8,446	30,71
8	25,4	110	219,58	53	0,00	6,285	30,00
1ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_1) =							234,95 m
Trecho	Diâmetro	Coefficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	40,01	5,381	70,01
2	254,0	110	2.201,40	3	2,23	10,007	32,23
3	406,4	115	-	4	25,15	-	55,15
4	101,6	125	598,34	52	0,02	26,741	30,02
5	406,4	130	-	6	10,28	-	40,28
6	254,0	125	8.786,58	7	6,74	5,690	36,74
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4	110/140	219,58	53	0,00	5,571	30,00
2ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_2) =							234,92 m
Trecho	Diâmetro	Coefficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	39,99	5,381	69,99
2	254,0	110/140	2.201,40	3	2,23	9,984	32,23
3	406,4	115	-	4	25,13	3,009	55,13
4	101,6	125	598,34	52	0,00	26,741	30,00
5	406,4	130	-	6	10,25	-	40,25
6	254,0	125	8.786,58	7	6,72	5,690	36,72
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4	110/140	219,58	53	0,00	5,548	30,00

Tabela 4.11 - Processo iterativo: 2ª etapa (continuação)

3ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_3) =							229,38 m
Trecho	Diâmetro	Coeficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	34,44	5,381	64,44
2	254,0	110/140	2.201,40	3	2,20	4,459	32,20
3	406,4	115	-	4	19,58	3,009	49,58
4	101,6 / 152,4	125/140	598,34	52	0,00	21,193	30,00
5	406,4	130	-	6	4,71	-	34,71
6	254,0	125	8.786,58	7	1,17	5,690	31,17
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4	140	335,79	53	0,00	10,781	30,00

4ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_4) =							228,21 m
Trecho	Diâmetro	Coeficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	33,27	5,381	63,27
2	254,0	110/140	2.201,40	3	2,20	3,292	32,20
3	406,4	115	-	4	18,42	-	48,42
4	101,6 / 152,4	125/140	598,34	52	0,00	20,026	30,00
5	406,4	130	-	6	3,54	-	33,54
6	254,0	125	8.786,58	7	0,00	5,690	30,00
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4 / 50,8	140	335,79	53	0,00	9,613	30,00

5ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_5) =							224,92 m
Trecho	Diâmetro	Coeficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	29,98	5,381	59,98
2	254,0	140	2.674,13	3	2,20	10,459	32,20
3	406,4	115	-	4	15,12	-	45,12
4	101,6 / 152,4	125/140	598,34	52	0,00	16,733	30,00
5	406,4	130	-	6	0,25	-	30,25
6	254 / 304,8	125/140	8.786,58	7	0,00	2,398	30,00
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4 / 50,8	140	335,79	53	0,00	9,613	30,00

Tabela 4.11 - Processo iterativo: 2ª etapa (continuação)

6ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_6) =							224,67 m
Trecho	Diâmetro	Coefficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	110	16.315,55	2	29,73	5,381	59,73
2	254,0 / 304,8	140	2.674,13	3	2,20	10,212	32,20
3	406,4	115	-	4	14,88	3,009	44,88
4	101,6 / 152,4	125/140	598,34	52	0,00	16,486	30,00
5	406,4	130	-	6	0,00	-	30,00
6	254,0 / 304,8	125/140	8.786,58	7	0,00	2,151	30,00
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4 / 50,8	140	335,79	53	0,00	9,613	30,00

7ª iteração							
Cota piezométrica de cabeceira (Z_7) =							219,29 m
Trecho	Diâmetro	Coefficiente H. W.	G (um/m)	Nó jusante	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	457,2	140	21.432,80	2	29,73	3,841	59,73
2	254,0 / 304,8	140	2.674,13	3	2,20	10,212	32,20
3	406,4	115	-	4	14,88	3,009	44,88
4	101,6 / 152,4	125/140	598,34	52	0,00	16,486	30,00
5	406,4	130	-	6	0,00	-	30,00
6	254,0 / 304,8	125/140	8.786,58	7	0,00	2,151	30,00
7	254,0	120	5.920,25	51	0,00	8,446	30,00
8	25,4 / 50,8	140	335,79	53	0,00	9,613	30,00

A tabela 4.12 apresenta os gradientes de câmbio ótimo do processo iterativo.

Tabela 4.12 - Gradientes de câmbio ótimo e trechos potenciais do processo iterativo

iteração	Trechos potenciais	Nós mais desfavoráveis ($EP = 0$)	G^* um/m
sol. inicial - 1ª	8	8	219,58
1ª - 2ª	2 e 8	7 e 8	2.420,98
2ª - 3ª	2, 4 e 8	4, 7 e 8	3.019,32
3ª - 4ª	2, 4 e 8	4, 7 e 8	3.135,53
4ª - 5ª	2, 4 e 6	4, 6, 7 e 8	11.586,33
5ª - 6ª	2, 4 e 6	4, 6, 7 e 8	12.059,05
6ª - 7ª	1	4, 5, 6, 7 e 8	21.432,80

Os comprimentos e as perdas de cargas correspondentes aos pares de diâmetros dos trechos 2, 4, 6 e 8 estão apresentados na tabela 4.13. Os comprimentos dos sub-trechos são proporcionais às relações existentes, respectivamente, entre as perdas de carga em cada sub-trecho e a requerida em todo o trecho, estes valores foram obtidos através das equações 4.1 e 4.2. Obviamente, que os comprimentos dos sub-trechos calculados, na prática, seriam aproximados para valores que facilitassem a instalação das novas tubulações.

$$L = \frac{L(Hf - Hf_{ii})}{(Hf_i - Hf_{ii})} \quad (4.1)$$

$$L_{ii} = L - L_i \quad (4.2)$$

em que:

L - comprimento total do trecho composto por dois diâmetros distintos, em m\;

L_i - comprimento do sub-trecho ocupado pelo diâmetro menor, em m;

L_{ii} - comprimento do sub-trecho ocupado pelo diâmetro maior, em m;

Hf - perda de carga unitária do trecho de comprimento L , em m;

Hf_i - perda de carga unitária do trecho de diâmetro menor, em m; e

Hf_{ii} - perda de carga unitária do trecho de diâmetro maior, em m.

Tabela 4.13 - Comprimentos e perdas de carga nos sub-trechos dos pares de diâmetros dos trechos 2, 4, 6 e 8 da REDE EXEMPLO 1

Trecho	Sub-trecho 1			Sub-trecho 2			Trecho	
	Diâmetro	L_i	Hf_i	Diâmetro	L_{ii}	Hf_{ii}	L	Hf
2	254*	976	17,353	304,8**	24	0,173	1000	17,526
4	101,6	617	18,577	152,4**	383	1,300	1000	19,877
6	254	378	3,228	304,8**	622	1,772	1000	5,000
8	25,4*	892	9,954	50,8**	108	0,041	1000	9,995

* Trechos limpos e reparados e **trechos com tubulações novas.

As tabelas 4.14 e 4.15 apresentam os resultados obtidos pelo método proposto neste trabalho, de maneira que as pressões nos pontos de consumo fossem iguais ou superiores as requeridas, atendendo o pré-requisito do custo total do projeto ser mínimo.

Tabela 4.14 - Resultado final: dados dos trechos da REDE EXEMPLO 1

Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro	Coefficiente H. W.	Comp. (m)	Perdas (m)	Velocidade (m/s)
1	404,44	457,2	140	1000	9,557	2,46
2	120,53	254	140	976	17,353	2,38
		304,8	140	24	0,173	1,65
3	247,8	406,4	115	1000	9,854	1,91
4	12,86	101,6	125	617	18,577	1,59
		152,4	140	383	1,300	0,71
5	191,61	406,4	130	1000	4,877	1,48
6	72,44	254,0	125	378	3,228	1,43
		304,8	140	622	1,772	0,99
7	84,42	254	120	1000	12,228	1,67
8	0,22	25,4	140	892	9,954	0,43
		50,8	140	108	0,041	0,11

Tabela 4.15 - Resultado final: dados dos nós da REDE EXEMPLO 1

(altura manométrica = 49,29 metros)

Nó	Consumo (l/s)	Altura piezométrica (m)	Cota do terreno (m)	Pressão disponível (m)
2	36,11	209,73	150	59,73
3	36,11	192,32	160	32,20
4	43,33	199,88	155	44,88
5	97,50	180,00	150	30,00
6	119,17	195,00	165	30,00
7	72,22	190,00	160	30,00

A tabela 4.16 apresenta as decisões propostas pelo método para a reabilitação da REDE EXEMPLO 1 (ALPEROVITZ & SHAMIR, 1977), com os seus devidos custos.

Para confirmar os resultados encontrados, foi simulada no EPANET a rede de distribuição com as modificações propostas. Pode-se observar que os valores das vazões calculadas inicialmente (traçado original) foram iguais àquelas encontradas após a reabilitação; como é mostrado na figura 4.4 (simulação no EPANET 2). Os dados apresentados nesta figura indicam que a metodologia pode ser empregada satisfatoriamente a redes malhadas, desde que estas sejam seccionadas. A figura 4.5 mostra as características da rede (traçado original) reabilitada (diâmetros e coeficientes de rugosidade de H. W.).

Tabela 4.16 - Decisões de reabilitação do método proposto para a REDE EXEMPLO 1

Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro original	Diâmetro final	Opção de reabilitação	Coef. H. W.	Comp. (m)	Custo (um)	Custo parcial (um)
1	404,44	457,2	457,2	limp. e reparo	140	1000	87,79	87.790,00
2	120,53	254	254	limp. e reparo	140	976	22,03	21.508,44
	120,53		304,8	substituição	140	24	57,50	1.361,32
3	247,8	406,4	406,4	-	115	1000	-	-
4	12,86	101,6	101,6	-	125	617	-	-
	12,86		152,4	substituição	140	383	18,40	7.056,05
5	191,61	406,4	406,4	-	130	1000	-	-
6	72,44	254	254,0	-	125	378	-	-
	72,44		304,8	substituição	140	622	57,50	35.762,60
7	84,42	254	254	-	120	1000	-	-
8	0,22	25,4	25,4	limp. e reparo	140	892	1,38	1.230,57
	0,22		50,8	substituição	140	108	5,75	622,61
Altura manométrica ótima = 49,29 metros					Custo total = 155.331,60 um			

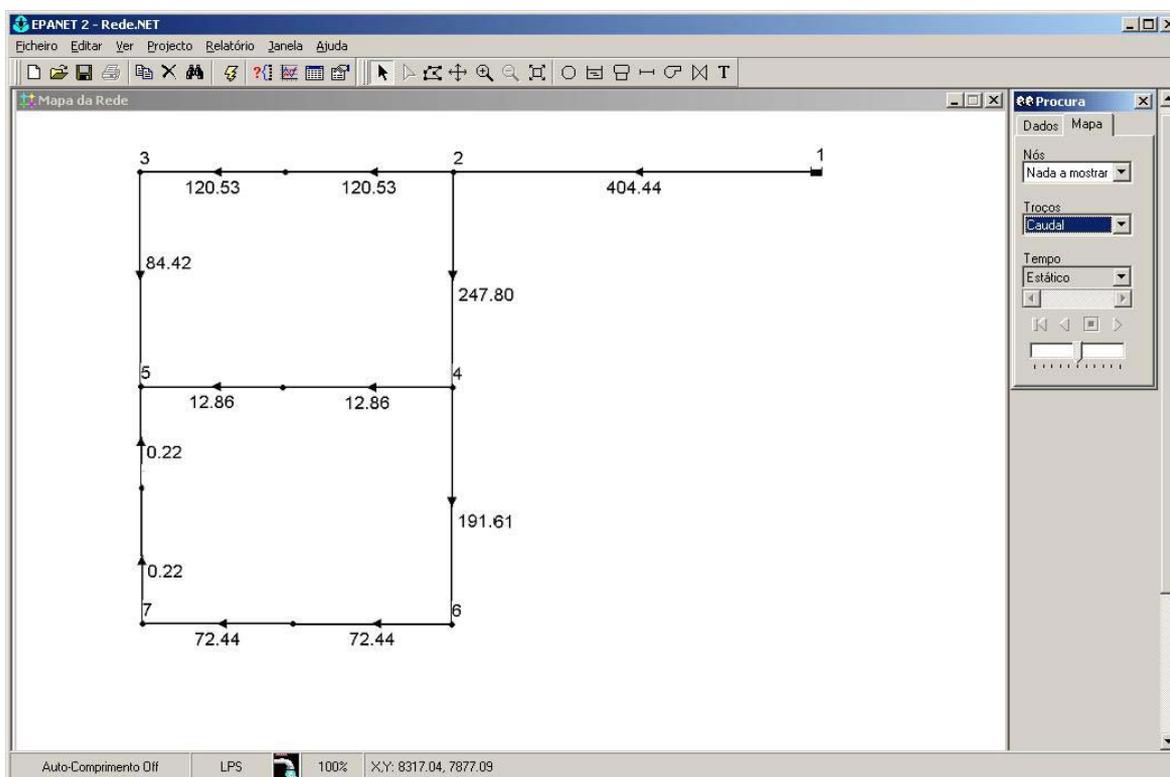


Figura 4.4 - Resultado final: vazões nos trechos (simulação hidráulica do EPANET 2)

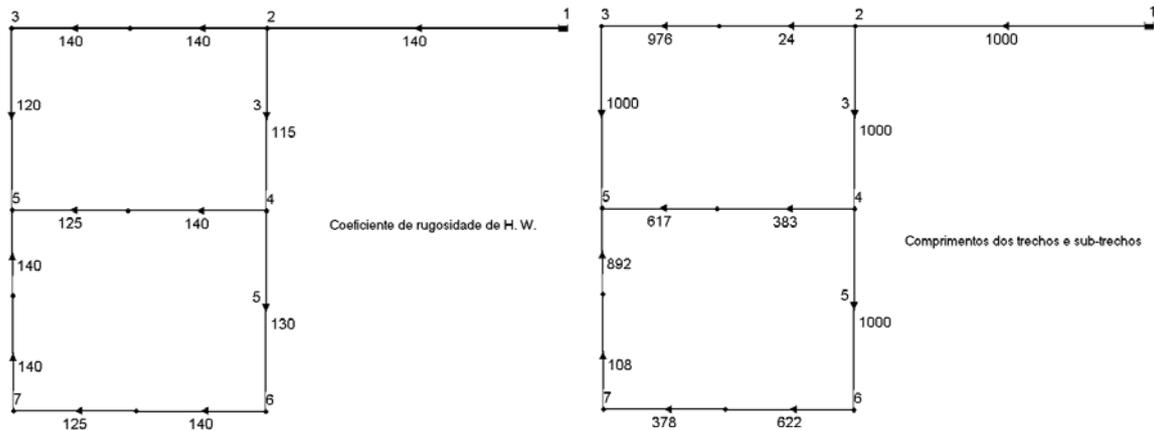


Figura 4.5 - Características da rede reabilitada (diâmetros e coeficientes de rugosidade)

De acordo com os resultados obtidos pelo método (tabela 4.16), a melhor solução obtida (custo mínimo), proporcionada pelas opções de reabilitação, foi igual a 155.331,60 um; calculado com base nos preços constantes da tabela 4.4.

Como já foi citado, os métodos de otimização (critério econômico) tendem a dimensionar as redes malhadas como ramificadas, podendo concluir-se que dificilmente ao termino do processo iterativo, iremos super-redimensionar a rede. A pequena diferença encontrada entre a pressão fornecida e a mínima no ponto mais desfavorável, é corrigida com a subtração ou adição desta diferença na cota de cabeceira da rede, de maneira que no nó mais desfavorável, a pressão disponível seja igual à requerida. É importante salientarmos, que se trata de um caso fictício, onde se procurou explorar algumas opções (substituição, limpeza e reparo) possíveis de serem consideradas pelo método.

4.2. REDE EXEMPLO 2

4.2.1. O Perímetro Senador Nilo Coelho

O perímetro de Irrigação Nilo Coelho, está localizado no nordeste do Brasil (Pernambuco), às margens do rio São Francisco, junto às cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Possui 20.053 hectares irrigáveis¹⁵, distribuídos em 34 setores pressurizados de irrigação, que recebem água de canais, cuja vazão, aduzida do rio São Francisco através de uma estação de bombeamento principal, pode alcançar até 23 m³/s¹⁶, ver figura 4.6.

O maior projeto público de irrigação do país, foi implantado pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) e atualmente vem sendo gerenciado pelo Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho, composto por pequenos irrigantes (agricultores que exploram parcelas de seis hectares), médios e grandes empresários.



Figura 4.6 - Canal principal do Perímetro Nilo Coelho¹⁷

O projeto executivo do PNC foi elaborado por um consórcio entre as consultoras ENCO (brasileira) e TAJAL (israelense), e começou a ser operado parcialmente em 1984. Em 1996, o Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho (PNC), ver figura 4.7, sofreu graves problemas no abastecimento de água, de maneira geral, o fornecimento das

¹⁵ Fonte: BRASIL, Relatório de Gestão, 2002.

¹⁶ GOMES (2001).

¹⁷ Fonte: <http://globo.com/barra.asp?d=/edic/195/rep_frutaa.htm>.

vazões e das pressões nos pontos de tomada d'água eram insuficientes para atender satisfatoriamente as parcelas do setor. Segundo GOMES (1997), esses problemas prejudicaram consideravelmente o desempenho da irrigação, acarretando, evidentemente, diminuição na produtividade do Setor.

O setor 11 (ver figura 4.7) possui uma estação de bombeamento secundária composta de quatro conjuntos motor-bomba, com bombas centrífugas horizontais, de sucção simples, instaladas em paralelo. A pressão requerida na tomada d'água segundo o projeto é de 40 m. Quanto a sua estrutura, o Setor 11 possui 40 trechos, 1 estação elevatória (EB), e 41 nós, que atendem a 49 parcelas.

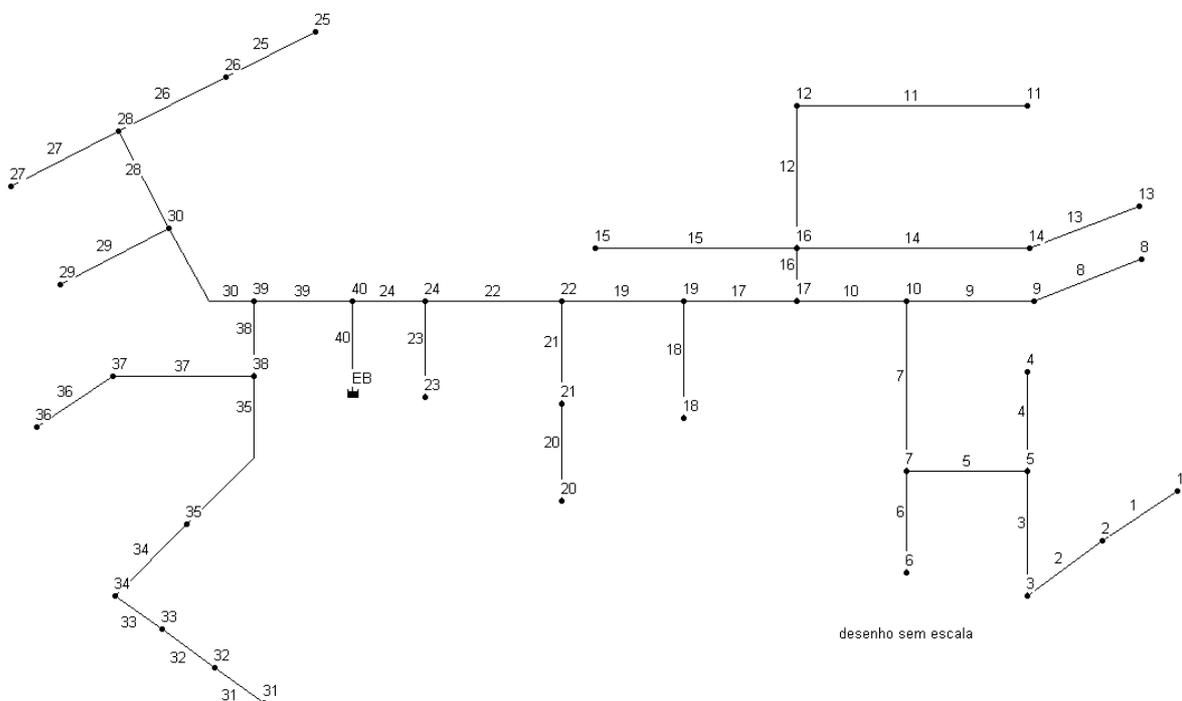


Figura 4.7 - Esquema do Setor 11 do Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho

4.2.2. Diagnóstico Preliminar do Abastecimento do PNC

Segundo GOMES (2001), as condições de exploração do PNC sofreram modificações, em virtude do surgimento de novas conjunturas técnicas, econômicas e sociais. O consultor diagnosticou que as modificações feitas pelos irrigantes (número de aspersores, tipo de aspersor, vazões de demanda superiores às projetadas, ampliação da área a ser irrigada) trouxeram efeitos negativos ao sistema de abastecimento; indicando que o estudo da demanda do setor 11 foi significativamente subestimada. Os novos dados

foram baseados numa série de medições hidrométricas, realizadas pela equipe de operação e manutenção do PNC, com o intuito de diagnosticar com precisão a situação real do abastecimento.

De acordo com os novos cálculos realizados pelo consultor a vazão necessária para irrigar as parcelas de colonização do perímetro (dotação parcelar) adotadas no projeto executivo da ENCO-TAJAL, como sendo igual a 35 m³/h (9,72 l/s), estava distante de representar a realidade da demanda parcelar do perímetro irrigado. De acordo com o rendimento hidro-agrícola realizado, a dotação das parcelas de colonização, para os meses de máxima demanda hídrica (setembro e outubro) é de 58,8 m³/h (16,33 l/s). Apesar da dotação diminuir para os demais meses do ano, ela só é inferior a 35 m³/h (valor adotado pelo projeto original) nos meses de fevereiro, março e abril.

A vazão parcelar adotada para o cenário estudado será de 58,8 m³/h, e a pressão disponível nas entradas das parcelas iguais ou superiores a 40 m, já que a vazão fornecida pela ENCO-TAJAL encontra-se sub-dimensionada.

As tabelas 4.17 e 4.18 apresentam os dados do sistema de distribuição para a vazão parcelar de 58,8 m³/h. E, a tabela 4.19 apresenta as pressões para uma altura manométrica de 54 metros (cota piezométrica de cabeceira igual a 455,2 metros). As perdas de carga por atrito nos trechos da rede coletiva foram calculadas através da fórmula de Hazen-Williams, com o coeficiente de rugosidade¹⁸ (C) igual a 140, e seus valores estão majorados em 15% para considerar as perdas localizadas.

Pode-se observar na tabela 4.18, dos 35 nós que alimentam as 49 parcelas do setor 11, apenas em 6 nós (23, 24, 29, 30, 36 e 37) as pressões disponíveis são superiores as requeridas, com a agravante, que em 13 nós (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 31, 32, 33 e 34) a pressão é negativa, o que na prática resulta em falta d'água.

¹⁸ O material das tubulações implantadas é cimento-amianto.

Tabela 4.17 - Dados dos nós da rede de distribuição do Setor 11 do PNC considerando a vazão parcelar de 16,33 l/s (58,8 m³/s)

Nó	Número de Parcelas	Consumo (l/s)	Cota do terreno (m)
1	1	16,33	386,40
2	1	16,33	387,90
3	1	16,33	389,50
4	1	16,33	391,00
5	0	0	390,60
6	2	32,67	389,60
7	2	32,67	391,90
8	1	16,33	389,50
9	1	16,33	391,50
10	2	32,67	393,60
11	1	16,33	391,30
12	2	32,67	393,00
13	1	16,33	389,50
14	1	16,33	391,40
15	1	16,33	393,90
16	2	32,67	393,30
17	0	0	393,60
18	2	32,67	392,20
19	2	32,67	393,70
20	2	32,67	393,60
21	2	32,67	393,50
22	2	32,67	393,40
23	1	16,33	395,10
24	1	16,33	396,20
25	1	16,33	403,40
26	1	16,33	403,30
27	2	32,67	401,30
28	2	32,67	403,20
29	2	32,67	400,20
30	2	32,67	402,40
31	1	16,33	392,10
32	1	16,33	392,10
33	1	16,33	394,90
34	1	16,33	397,70
35	1	16,33	399,00
36	1	16,33	399,90
37	1	16,33	400,50
38	0	0	401,30
39	0	0	402,40
40	0	0	401,20
EB	0	0	401,20

Tabela 4.18 - Dados dos trechos da rede de distribuição do Setor 11 do PNC (não reabilitado) considerando a vazão parcelar de 58,8 m³/h (16,33 l/s)

ID do Trecho	Vazão (l/s)	Diâmetro (mm)	Coefficiente H. W. ¹⁹	Comprimento (m)	Velocidade (m/s)
1	16,33	150	140	250	0,92
2	32,66	150	140	310	1,84
3	48,99	200	140	160	1,55
4	16,33	150	140	70	0,92
5	65,32	250	140	220	1,32
6	32,67	150	140	310	1,84
7	130,66	250	140	300	2,65
8	16,33	150	140	320	0,92
9	32,66	150	140	220	1,84
10	195,99	300	140	210	2,76
11	16,33	150	140	320	0,92
12	49,00	200	140	220	1,55
13	16,33	150	140	320	0,92
14	32,66	150	140	310	1,84
15	16,33	150	140	300	0,92
16	130,66	250	140	40	2,65
17	326,65	300	140	230	4,59
18	32,67	150	140	310	1,84
19	391,99	350	140	440	4,05
20	32,67	150	140	310	1,84
21	65,34	150	140	300	3,68
22	490,00	400	140	530	3,88
23	16,33	150	140	230	0,92
24	522,66	450	140	450	3,27
25	16,33	150	140	140	0,92
26	32,66	150	140	340	1,84
27	32,67	150	140	320	1,84
28	98,00	200	140	440	3,10
29	32,67	150	140	310	1,84
30	163,34	300	140	310	2,30
31	16,33	150	140	300	0,92
32	32,66	150	140	280	1,84
33	48,99	150	140	310	2,76
34	65,32	150	140	210	3,67
35	81,65	150	140	340	4,59
36	16,33	150	140	310	0,92
37	32,66	150	140	140	1,84
38	114,31	200	140	70	3,62
39	277,65	350	140	110	2,87
40	800,31	500	140	10	4,05

¹⁹ Fonte: GOMES (1997).

Tabela 4.19 - Pressões considerando a cota piezométrica de alimentação de 455,2 metros e vazão parcelar de 16,33 l/s do Setor 11 do PNC

Nó	Consumo (l/s)	Altura piezométrica (m)	Cota do terreno (m)	Pressão disponível (mca)	Pressão requerida (mca)	Déficit de pressão (mca)
1	16,33	375,51	386,40	-10,89	40	50,89
2	16,33	377,15	387,90	-10,75	40	50,75
3	16,33	384,49	389,50	-5,01	40	45,01
4	16,33	386,00	391,00	-5,00	40	45,00
5	0	386,46	390,60	-4,14	0	4,14
6	32,67	380,68	389,60	-8,92	40	48,92
7	32,67	388,03	391,90	-3,87	40	43,87
8	16,33	388,41	389,50	-1,09	40	41,09
9	16,33	390,51	391,50	-0,99	40	40,99
10	32,67	395,72	393,60	2,12	40	37,88
11	16,33	394,57	391,30	3,27	40	36,73
12	32,67	396,67	393,00	3,67	40	36,33
13	16,33	389,95	389,50	0,45	40	39,55
14	16,33	392,05	391,40	0,65	40	39,35
15	16,33	397,42	393,90	3,52	40	36,48
16	32,67	399,39	393,30	6,09	40	33,91
17	0	400,41	393,60	6,81	0	0
18	32,67	406,32	392,20	14,12	40	25,88
19	32,67	413,66	393,70	19,96	40	20,04
20	32,67	397,43	393,60	3,83	40	36,17
21	32,67	404,77	393,50	11,27	40	28,73
22	32,67	430,42	393,40	37,02	40	2,98
23	16,33	444,85	395,10	49,75	40	
24	16,33	446,36	396,20	50,16	40	
25	16,33	419,19	403,40	15,79	40	24,21
26	16,33	420,11	403,30	16,81	40	23,19
27	32,67	420,58	401,30	19,28	40	20,72
28	32,67	428,16	403,20	24,96	40	15,04
29	32,67	440,45	400,20	40,25	40	
30	32,67	447,79	402,40	45,39	40	
31	16,33	362,57	392,10	-29,53	40	69,53
32	16,33	364,54	392,10	-27,56	40	67,56
33	16,33	371,17	394,90	-23,73	40	63,73
34	16,33	386,71	397,70	-10,99	40	50,99
35	16,33	404,66	399,00	5,66	40	34,34
36	16,33	443,23	399,90	43,33	40	-
37	16,33	445,27	400,50	44,77	40	-
38	0	448,58	401,30	47,28	0	0
39	0	452,74	402,40	50,34	0	0
40	0	454,95	401,20	53,75	0	0

4.2.3. Resolução da REDE EXEMPLO 2

Os custos de implantação da rede de distribuição estão descritos na tabela 4.20. Os demais dados para análise econômica da reabilitação da rede de distribuição são:

- horizonte de planejamento (alcance do projeto) de 15 anos ($n = 15$ anos);
- número anual de horas de bombeamento de 5110 ($n_b = 5110$);
- valor da tarifa de consumo²⁰ de 0,05 R\$/kW ($T_c = 0,05$);
- valor da tarifa de demanda de 5,00 R\$/kWh.mês ($T_d = 5,00$);
- rendimento médio esperado do conjunto motor-bomba de 73,2% ($\eta = 0,732$).
- coeficiente de Hazen-Williams para as tubulações (PVC) de 150 ($C = 150$);
- taxa de juros²¹ de 15% a.a ($i = 0,15$); e
- taxa de aumento do preço de energia elétrica de 12 % a.a. ($e = 0,12$).

Tabela 4.20 - Custos de implantação, por metro linear, das tubulações de PVC

Diâmetro nominal	Diâmetro interno (mm)	Custos da tubulação* (R\$/m)	Custos de montagem* (R\$/m)	Custos de implantação* (R\$/m)	Custos de substituição (R\$/m)
100	108,4	17,09	24,30	41,39	47,60
150	156,4	33,80	26,89	60,69	69,79
200	204,2	57,62	32,78	90,40	103,96
250	252,0	88,59	34,59	123,18	141,66
300	299,8	122,24	40,02	162,26	186,60
400	394,6	207,09	45,64	252,73	290,64
500	489,4	319,44	53,16	372,60	428,49

*Fonte: CAGEPA (2004)

Como as tubulações implantadas no setor 11 são de cimento-amianto, achou-se conveniente adotar como única opção de reabilitação, a substituição das tubulações antigas por tubulações de PVC com diâmetros maiores.

²⁰ Tarifa adotada pela CELPE (2004) para o grupo de consumidor B2 (220/380V), isento de ICMS.

²¹ As taxas de juros adotadas atualmente para financiamento de projetos de sistemas de distribuição de água giram em torno de 15% a.a.

Primeira Etapa - Solução Inicial

O primeiro passo da metodologia consiste na determinação das cargas hidráulicas fictícias (CHf) dos nós, cujos valores estão descritos na tabela 4.21. A cota piezométrica de alimentação inicial será o maior valor entre as cargas hidráulicas fictícias (CHf_{max}); neste caso, 524,73 m (Z_0).

Tabela 4.21 - Carga hidráulica fictícia dos nós, em metros, da rede de distribuição de água

Nó	CHf	Nó	CHf	Nó	CHf	Nó	CHf
1	506,09	11	491,93	21	483,93	31	524,73
2	505,95	12	491,53	22	458,18	32	522,76
3	500,21	13	494,75	23	445,45	33	518,93
4	500,20	14	494,55	24	445,04	34	506,19
5	499,34	15	491,68	25	479,41	35	489,54
6	504,12	16	489,11	26	478,39	36	451,87
7	499,07	17	488,39	27	475,92	37	450,43
8	496,29	18	481,08	28	470,24	38	407,92
9	496,19	19	475,24	29	454,95	39	404,86
10	493,08	20	491,37	30	449,81	40	401,45

$Z_0 = 524,73$ metros

A tabela 4.22 apresenta os primeiros resultados do método, fornecendo as pressões nos nós da rede de distribuição para a solução inicial, ou seja, as pressões para uma cota de alimentação de 524,73 metros e os trechos sem alterações.

Tabela 4.22 - Pressões nos nós obtidas na solução inicial do método ($Z_0 = 524,73$ m)

Nó	Consumo (l/s)	Altura piezométrica (m)	Cota do Terreno (m)	Pressão disponível (mca)	Pressão requerida (mca)	Excesso de pressão (mca)
1	16,33	445,04	386,40	58,64	40	18,64
2	16,33	446,68	387,90	58,78	40	18,78
3	16,33	454,02	389,50	64,52	40	24,52
4	16,33	455,53	391,00	64,53	40	24,53
5	0	455,99	390,60	65,39	40	25,39
6	32,67	450,21	389,60	60,61	40	20,61
7	32,67	457,56	391,90	65,66	40	25,66
8	16,33	457,94	389,50	68,44	40	28,44
9	16,33	460,04	391,50	68,54	40	28,54
10	32,67	465,25	393,60	71,65	40	31,65
11	16,33	464,10	391,30	72,80	40	32,80
12	32,67	466,20	393,00	73,20	40	33,20
13	16,33	459,48	389,50	69,98	40	29,98
14	16,33	461,58	391,40	70,18	40	30,18
15	16,33	466,95	393,90	73,05	40	33,05
16	32,67	468,92	393,30	75,62	40	35,62
17	0	469,94	393,60	76,34	40	36,34
18	32,67	475,85	392,20	83,65	40	43,65
19	32,67	483,19	393,70	89,49	40	49,49
20	32,67	466,96	393,60	73,36	40	33,36
21	32,67	474,30	393,50	80,80	40	40,80
22	32,67	499,95	393,40	106,55	40	66,55
23	16,33	514,38	395,10	119,28	40	79,28
24	16,33	515,89	396,20	119,69	40	79,69
25	16,33	488,72	403,40	85,32	40	45,32
26	16,33	489,64	403,30	86,34	40	46,34
27	32,67	490,11	401,30	88,81	40	48,81
28	32,67	497,69	403,20	94,49	40	54,49
29	32,67	509,98	400,20	109,78	40	69,78
30	32,67	517,32	402,40	114,92	40	74,92
31	16,33	432,10	392,10	40,00	40	0,00
32	16,33	434,07	392,10	41,97	40	1,97
33	16,33	440,70	394,90	45,80	40	5,80
34	16,33	456,24	397,70	58,54	40	18,54
35	16,33	474,19	399,00	75,19	40	35,19
36	16,33	512,76	399,90	112,86	40	72,86
37	16,33	514,80	400,50	114,30	40	74,30
38	0	518,11	401,30	116,81	0	116,81
39	0	522,27	402,40	119,87	0	119,87
40	0	524,48	401,20	123,28	0	123,28

Segunda Etapa

Fator de atualização:

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

$$Fa = \frac{(1+0,15)^{15} - (1+0,12)^{15}}{(1+0,15) - (1+0,12)} \times \frac{1}{(1+0,15)^{15}}$$

$$Fa = 10,91$$

Vazão da estação de bombeamento:

$$Q = 800,31 \text{ l/s}$$

Potência requerida por metro de elevação, em kW/m:

$$Pm = 9,81 \times \frac{800,31}{1000} \times \frac{1}{0,732}$$

$$Pm = 10,73 \text{ kW/m}$$

Custo unitário da energia capitalizada por metro de elevação (gradiente energético) da estação de bombeamento, em R\$/m:

$$Ge = Pm \times (Tc \times n_b + Td \times 12) \times Fa$$

$$Ge = 10,73 \times (0,05 \times 5110 + 5,00 \times 12) \times 10,91$$

$$Ge = 3.383,88 \times 10,91$$

$$Ge = 36.918,18 \text{ R\$/m}$$

Processo Iterativo

A seguir, executa-se o processo iterativo de cálculo, no qual se baixa, passo a passo, a cota piezométrica de cabeceira até alcançar a ótima, que corresponde àquela onde o custo total do projeto de reabilitação (investimento mais custo de operação) for mínimo. A tabela 4.23 apresenta os trechos pertencentes às diversas artérias do setor 11 do PNC, e a tabela 4.24 indica os valores dos gradientes de câmbio e das perdas de carga, das diversas possibilidades para os trechos da rede.

Tabela 4.23 - Dados das artérias da rede de distribuição de água do Setor 11 do PNC

ID da artéria	Trechos pertencentes às artérias	Nó mais desfavorável
1	1, 2, 3, 5, 7, 10, 17, 19, 22, 24 e 40	2
2	4, 5, 7, 10, 17, 19, 22, 24 e 40	4
3	6, 7, 10, 17, 19, 22, 24 e 40	6
4	8, 9, 10, 17, 19, 22, 24 e 40	9
5	11, 12, 16, 17, 19, 22, 24 e 40	11
6	13, 14, 16, 17, 19, 22, 24 e 40	14
7	15, 16, 17, 19, 22, 24 e 40	15
8	18, 19, 22, 24 e 40	18
9	20, 21, 22, 24 e 40	20
10	23, 24 e 40	23
11	25, 26, 28, 30, 39 e 40	25
12	27, 28, 30, 39 e 40	27
13	29, 30, 39 e 40	29
14	31, 32, 33, 34, 35, 38, 39 e 40	31
15	36, 37, 38, 39 e 40	36

Tabela 4.24 - Gradientes de câmbio e perdas de carga dos trechos

Trecho	DN	Do (mm)	Coefficiente H. W.	Hf (m)	ΔHf (m)	Preço (R\$/m)	Custo (R\$)	G (R\$/m)
1	150	150,0	140	1,639	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,321	1,318	108,48	27.120,00	20.575,19
	250	252,0	150	0,115	0,206	147,82	36.954,00	47.769,50
2	150	150,0	140	7,338	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,438	5,900	108,48	33.628,80	5.699,50
	250	252,0	150	0,516	0,922	147,82	45.822,96	13.232,54
	300	299,8	150	0,222	0,295	194,71	60.360,72	49.337,10
3	200	200,0	140	1,977	-	0,00	0,00	-
	250	252,0	150	0,565	1,412	147,82	23.650,56	16.744,39
	300	299,8	150	0,242	0,322	194,71	31.153,92	23.283,73
	400	394,6	150	0,064	0,179	303,28	48.524,16	97.183,81
4	150	150,0	140	0,459	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,078	0,381	108,48	7.593,60	19.941,39
	250	252,0	150	0,028	0,050	147,82	10.347,12	54.934,93
5	250	250,0	140	1,562	-	0,00	0,00	-
	300	299,8	150	0,568	0,995	194,71	42.836,64	43.068,27
6	150	150,0	140	7,342	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,439	5,904	108,48	33.628,80	5.696,26
	250	252,0	150	0,517	0,922	147,82	45.822,96	13.225,04
	300	299,8	150	0,222	0,295	194,71	60.360,72	49.309,14
7	250	250,0	140	7,693	-	0,00	0,00	-
	300	299,8	150	2,795	4,898	194,71	58.413,60	11.926,88
	400	394,6	150	0,733	2,062	303,28	90.982,80	15.797,08
	500	489,4	150	0,257	0,476	447,12	134.136,00	90.600,68
8	150	150,0	140	2,098	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,411	1,687	108,48	34.713,60	20.575,19
	250	252,0	150	0,148	0,264	147,82	47.301,12	47.769,50
9	150	150,0	140	5,208	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,020	4,187	108,48	23.865,60	5.699,50
	250	252,0	150	0,366	0,654	147,82	32.519,52	13.232,54
	300	299,8	150	0,157	0,209	194,71	42.836,64	49.337,10
10	300	300,0	140	4,696	-	0,00	0,00	-
	400	394,6	150	1,088	3,608	303,28	63.687,96	17.652,56
	500	489,4	150	0,381	0,706	447,12	93.895,20	42.757,32
11	150	150,0	140	2,098	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,411	1,687	108,48	34.713,60	20.575,19
	250	252,0	150	0,148	0,264	147,82	47.301,12	47.769,50
12	200	200,0	140	2,719	-	0,00	0,00	-
	250	252,0	150	0,777	1,943	147,82	32.519,52	16.738,06
	300	299,8	150	0,333	0,443	194,71	42.836,64	23.274,93
	400	394,6	150	0,087	0,246	303,28	66.720,72	97.147,08
13	150	150,0	140	2,098	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,411	1,687	108,48	34.713,60	20.575,19
	250	252,0	150	0,148	0,264	147,82	47.301,12	47.769,50
14	150	150,0	140	7,338	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,438	5,900	108,48	33.628,80	5.699,50
	250	252,0	150	0,516	0,922	147,82	45.822,96	13.232,54
	300	299,8	150	0,222	0,295	194,71	60.360,72	49.337,10

Tabela 4.24 - Gradientes de câmbio e perdas de carga dos trechos (continuação)

Trecho	DN	Do (mm)	Coefficiente H. W.	Hf (m)	ΔHf (m)	Custo (R\$/m)	Custo (R\$)	G (R\$/m)
	150	150,0	140	1,967	-		0,00	-
	200	204,2		0,385	1,582	108,48	32.544,00	20.575,19
	250	252,0	150	0,138	0,247	147,82		47.769,50
16	250	250,0	140	1,026		0,00	0,00	-
	300		150	0,373	0,653	194,71	7.788,48	11.926,88
	400	394,6	150	0,098	0,275		12.131,04	15.797,08
	500	489,4		0,034	0,064	447,12	17.884,80	90.600,68
17	300	300,0	140	13,245	-	0,00		-
	400	394,6	150		10,177	303,28	69.753,48	6.854,00
		489,4	150	1,075	1,993	447,12	102.837,60	
18	150	150,0	140	7,342		0,00	0,00	-
	200		150	1,439	5,904	108,48	33.628,80	5.696,26
	250	252,0	150	0,517	0,922		45.822,96	13.225,04
	300	299,8	150		0,295	194,71	60.360,72	49.309,14
19		350,0	140	16,765	-	0,00	0,00	-
	400	394,6	150	8,227		303,28	133.441,44	15.628,68
	500		150	2,883	5,344	447,12	196.732,80	11.843,56
	150	150,0	140	7,342		0,00	0,00	-
	200	204,2		1,439	5,904	108,48	33.628,80	5.696,26
	250	252,0	150	0,517	0,922	147,82		13.225,04
	300	299,8	150		0,295	194,71	60.360,72	49.309,14
21	150		140	25,650	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	5,026	20,625		32.544,00	1.577,91
	250	252,0		1,804	3,221	147,82	44.344,80	3.663,44
	300	299,8	150	0,774	1,030	194,71		13.659,03
	400	394,6	150		0,571	303,28	90.982,80	57.011,33
22		400,0	140	15,934	-	0,00	0,00	-
	500	489,4	150	5,250	10,683	447,12	236.973,60	22.181,91
23	150	150,0	140	1,508		0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,295	1,213	108,48	24.950,40	
	250	252,0	150	0,106	0,189	147,82	33.997,68	
24	450	450,0	140	8,591		0,00	0,00	-
	500	489,4	150	5,024	3,567	447,12	201.204,00	
25	150	150,0	140	0,918		0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,180	0,738	108,48	15.187,20	
	250	252,0	150	0,065	0,115	147,82	20.694,24	
26	150	150,0	140	8,048		0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,577	6,471	108,48	36.883,20	
	250	252,0	150	0,566	1,011	147,82	50.257,44	
	300	299,8	150	0,243	0,32	194,71	66.202,08	
27	150	150,0	140	7,579		0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,485	6,094	108,48	34.713,60	5.696,26
	250	252,0	150	0,533	0,952	147,82	47.301,12	13.225,04
28	200	200,0		19,634	-	0,00	0,00	-
	250	252,0	150	5,607	14,027	147,82	65.039,04	4.636,58
	300	299,8	150	2,406	3,200	194,71	85.673,28	6.447,34
	400	394,6	150	0,631	1,775	303,28	133.441,44	26.910,53
	500	489,4	150	0,221	0,410	447,12	196.732,80	154.339,45

Tabela 4.24 - Gradientes de câmbio e perdas de carga dos trechos (continuação)

Trecho	DN	Do (mm)	Coefficiente H. W.	H_f (m)	ΔH_f (m)	Preço (R\$/m)	Custo (R\$)	G (R\$/m)
29	150	150,0	140	7,342	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,439	5,904	108,48	33.628,80	5.696,26
	250	252,0	150	0,517	0,922	147,82	45.822,96	13.225,04
	300	299,8	150	0,222	0,295	194,71	60.360,72	49.309,14
30	300	300,0	140	4,946	-	0,00	0,00	-
	400	394,6	150	1,146	3,800	303,28	94.015,56	24.738,73
	500	489,4	150	0,401	0,744	447,12	138.607,20	59.921,16
31	150	150,0	140	1,967	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,385	1,582	108,48	32.544,00	20.575,19
	250	252,0	150	0,138	0,247	147,82	44.344,80	47.769,50
32	150	150,0	140	6,628	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	1,299	5,329	108,48	30.374,40	5.699,50
	250	252,0	150	0,466	0,832	147,82	41.388,48	13.232,54
	300	299,8	150	0,200	0,266	194,71	54.519,36	49.337,10
33	150	150,0	140	15,549	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	3,047	12,502	108,48	33.628,80	2.689,77
	250	252,0	150	1,094	1,953	147,82	45.822,96	6.244,85
	300	299,8	150	0,469	0,624	194,71	60.360,72	23.283,73
	400	394,6	150	0,123	0,346	303,28	94.015,56	97.183,81
34	150	150,0	140	17,945	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	3,516	14,429	108,48	22.780,80	1.578,81
	250	252,0	150	1,262	2,254	147,82	31.041,36	3.665,52
	300	299,8	150	0,542	0,721	194,71	40.889,52	13.666,78
	400	394,6	150	0,142	0,400	303,28	63.687,96	57.043,66
35	150	150,0	140	43,922	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	8,606	35,316	108,48	36.883,20	1.044,36
	250	252,0	150	3,090	5,516	147,82	50.257,44	2.424,70
	300	299,8	150	1,326	1,764	194,71	66.202,08	9.040,42
	400	394,6	150	0,348	0,978	303,28	103.113,84	37.733,76
	500	489,4	150	0,122	0,226	447,12	152.020,80	216.413,71
36	150	150,0	140	2,033	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,398	1,634	108,48	33.628,80	20.575,19
	250	252,0	150	0,143	0,255	147,82	45.822,96	47.769,50
37	150	150,0	140	3,314	-	0,00	0,00	-
	200	204,2	150	0,649	2,665	108,48	15.187,20	5.699,50
	250	252,0	150	0,233	0,416	147,82	20.694,24	13.232,54
	300	299,8	150	0,100	0,133	194,71	27.259,68	49.337,10
38	200	200,0	140	4,154	-	0,00	0,00	-
	300	252,0	150	1,186	2,968	194,71	13.629,84	4.592,48
	400	299,8	150	0,509	0,677	303,28	21.229,32	11.223,02
	500	394,6	150	0,134	0,376	447,12	31.298,40	26.810,62
39	350	350,0	140	2,213	-	0,00	0,00	-
	400	394,6	150	1,086	1,127	303,28	33.360,36	29.601,24
	500	489,4	150	0,381	0,705	447,12	49.183,20	22.432,10
40	500	500,0	140	0,390	-	0,00	0,00	-

Na solução inicial, o excesso de pressão nulo ocorre no nó 31, pertencente à artéria 14, formada pelos trechos 31 ($G_{31} = 20.575,19$ R\$/m), 32 ($G_{32} = 5.699,50$ R\$/m), 33 ($G_{33} = 2.689,77$ R\$/m), 34 ($G_{34} = 1.578,81$ R\$/m), 35 ($G_{35} = 1.044,36$ R\$/m), 38 ($G_{38} = 4.592,48$ R\$/m), 39 ($G_{39} = 4.592,48$ R\$/m) e 40 ($G_{40} = 29.601,24$ R\$/m). O menor gradiente de câmbio da artéria corresponde ao do trecho 35, que é igual a $1.044,36$ R\$/m (G_{0-1}^*). O decréscimo da cota de cabeceira (ΔZ_{0-1}) será de $18,64$ metros (EP_1), referente ao menor valor entre a perda de carga disponível no trecho 35 (ΔHf_{35}) e os excessos de pressão nos demais trechos da rede ($EP_1, EP_2, EP_3, EP_4, EP_5, EP_6, EP_7, EP_8, EP_9, EP_{10}, EP_{11}, EP_{12}, EP_{13}, EP_{14}, EP_{15}, EP_{16}, EP_{17}, EP_{18}, EP_{19}, EP_{20}, EP_{21}, EP_{22}, EP_{23}, EP_{24}, EP_{25}, EP_{26}, EP_{27}, EP_{28}, EP_{29}, EP_{30}, EP_{31}, EP_{36}, EP_{37}, EP_{38}, EP_{39}$ e EP_{40}), com exceção dos trechos a jusante do trecho potencial (trechos 32, 33 e 34). O custo de reabilitação da rede será igual a R\$ $19.465,66$; que é o resultado do produto de ΔHf_{35} por G_{0-1}^* . Com isto, o trecho será ocupado pelos diâmetros 150 e 200 e os novos excessos de pressão passam a ser iguais aos anteriores menos $18,64$ metros. Os valores das pressões disponíveis nos nós serão iguais, em cada iteração, aos valores de EP mais a pressão requerida.

Como resultado da 1ª iteração, os excessos de pressão são nulos nos nós 1 e 31, situados em paralelo. Como consequência, o gradiente de câmbio ótimo será o menor valor entre os diversos valores resultados da soma dos gradientes de câmbios dos trechos em paralelo das artérias mais desfavoráveis, neste caso, $G_{1-2}^* = G_2 + G_{35}$ ($6.743,86$ R\$/m). O decréscimo de pressão na cota de cabeceira (ΔZ_{1-2}) será o menor valor entre a melhora da perda de carga (ΔHf_2 e ΔHf_{35}) nos trechos potenciais (trechos 2 e 35) e o mínimo excesso de pressão nos diversos pontos da rede situados à montante dos trechos potenciais ($EP_3, EP_4, EP_5, EP_6, EP_7, EP_8, EP_9, EP_{10}, EP_{11}, EP_{12}, EP_{13}, EP_{14}, EP_{15}, EP_{16}, EP_{17}, EP_{18}, EP_{19}, EP_{20}, EP_{21}, EP_{22}, EP_{23}, EP_{24}, EP_{25}, EP_{26}, EP_{27}, EP_{28}, EP_{29}, EP_{30}, EP_{31}, EP_{36}, EP_{37}, EP_{38}, EP_{39}$ e EP_{40}). Portanto, o decréscimo da cota de cabeceira nesta iteração será igual a $1,97$ metros.

O processo iterativo de cálculo segue, conforme a tabela 4.25, baixando passo a passo a cota piezométrica de alimentação, até alcançar a cota de alimentação que proporciona o custo mínimo do sistema (intervenções físicas e energia elétrica).

O processo iterativo termina na 20ª iteração, quando o valor de G^* passa de $36.267,44$ R\$/m para $41.101,03$ R\$/m, que é maior que G_e ($36.918,18$ R\$/m). Os valores das variáveis da última iteração (20ª), tabela 4.25, sintetizam os resultados da reabilitação da rede de distribuição, cujo custo de reabilitação (substituição de tubulações) é R\$

923.472,86. Os diâmetros definitivos dos trechos e as pressões disponíveis resultantes se encontram nas colunas 2 e 6, respectivamente. A cota piezométrica ótima de alimentação é de 458 metros, correspondente a uma altura manométrica de bombeamento de 56,81 mca, já que a cota do nível de água da sucção é de 401,2 metros.

Na tabela 4.25 encontram-se os resultados das variáveis necessárias para fornecer, em cada iteração, o custo ótimo da reabilitação da rede de distribuição (R) e a cota piezométrica de cabeceira (Z_i) correspondente. A tabela ainda fornece em cada iteração, para o(s) diâmetro(s) de cada trecho, os gradientes de câmbio (coluna 3), os excessos de pressão (coluna 4), a diferença das perdas de carga (coluna 5) e as pressões disponíveis no nó de jusante de cada trecho (coluna 6). Os trechos (ID) em negrito indicam os trechos potenciais; os valores em negrito dos EP e ΔH_f são os “candidatos” a serem o decréscimo de pressão na cabeceira da rede, dentre estes, o valor tachado (riscado) corresponde ao decréscimo adotado (menor valor entre os “candidatos”); e os valores em itálico são aqueles que sofreram alterações em relação à iteração anterior.

As combinações para o cálculo dos gradientes de câmbio ótimo da 2ª iteração até a 8ª iteração estão descritas resumidamente entre as iterações. As demais não foram descritas devido ao grande número de valores.

Tabela 4.25 - Processo iterativo (2ª etapa)

Solução Inicial

Cota piezométrica de cabeceira (Z_0) = 524,73 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	18,639	1,318	58,64
2	150	5.699,50	18,778	5,900	58,78
3	200	16.744,39	24,516	1,412	64,52
4	150	19.941,39	24,534	0,381	64,53
5	250	-	65,393	0,995	65,39
6	150	5.696,26	20,613	5,904	60,61
7	250	11.926,88	25,655	4,898	65,66
8	150	20.575,19	28,442	1,687	68,44
9	150	5.699,50	28,540	4,187	68,54
10	300	17.652,56	31,648	3,608	71,65
11	150	20.575,19	32,800	1,687	72,80
12	200	16.738,06	33,198	1,943	73,20
13	150	20.575,19	29,981	1,687	69,98
14	150	5.699,50	30,180	5,900	70,18
15	150	20.575,19	33,051	1,582	73,05
16	250	11.926,88	35,618	0,653	75,62
17	300	6.854,00	76,344	10,177	76,34
18	150	5.696,26	43,646	5,904	83,65
19	350	15.628,68	49,489	8,538	89,49
20	150	5.696,26	33,361	5,904	73,36
21	150	1.577,91	40,804	20,625	80,80
22	400	22.181,91	66,554	10,683	106,55
23	150	20.575,19	79,279	1,213	119,28
24	450	-	79,687	3,567	119,69
25	150	20.575,19	45,319	0,738	85,32
26	150	5.699,50	46,337	6,471	86,34
27	150	5.696,26	48,806	6,094	88,81
28	200	4.636,58	54,485	14,027	94,49
29	150	5.696,26	69,777	5,904	109,78
30	300	24.738,73	74,919	3,800	114,92
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	150	1.044,36	35,189	35,316	75,19
36	150	20.575,19	72,865	1,634	112,86
37	150	5.699,50	74,297	2,665	114,30
38	200	4.592,48	116,811	2,968	116,81
39	350	29.601,24	119,865	1,127	119,87
40	500	-	123,278	-	123,28

1ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_1) = 506,09 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,318	40,00
2	150	5.699,50	<u>0,139</u>	5,900	40,14
3	200	16.744,39	5,877	1,412	45,88
4	150	19.941,39	5,895	0,381	45,90
5	250	-	46,754	-	46,75
6	150	5.696,26	1,974	5,904	41,97
7	250	11.926,88	7,017	4,898	47,02
8	150	20.575,19	9,803	1,687	49,80
9	150	5.699,50	9,902	4,187	49,90
10	300	17.652,56	13,009	3,608	53,01
11	150	20.575,19	14,161	1,687	54,16
12	200	16.738,06	14,560	1,943	54,56
13	150	20.575,19	11,343	1,687	51,34
14	150	5.699,50	11,541	5,900	51,54
15	150	20.575,19	14,412	1,582	54,41
16	250	11.926,88	16,979	0,653	56,98
17	300	6.854,00	57,705	10,177	57,70
18	150	5.696,26	25,008	5,904	65,01
19	350	15.628,68	30,850	8,538	70,85
20	150	5.696,26	14,722	5,904	54,72
21	150	1.577,91	22,165	20,625	62,16
22	400	22.181,91	47,915	10,683	87,92
23	150	20.575,19	60,641	1,213	100,64
24	450	-	61,049	-	101,05
25	150	20.575,19	26,680	0,738	66,68
26	150	5.699,50	27,698	6,471	67,70
27	150	5.696,26	30,167	6,094	70,17
28	200	4.636,58	35,846	14,027	75,85
29	150	5.696,26	51,138	5,904	91,14
30	300	24.738,73	56,281	3,800	96,28
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	150/200	1.044,36	35,189	16,678	75,19
36	150	20.575,19	54,226	1,634	94,23
37	150	5.699,50	55,659	2,665	95,66
38	200	4.592,48	98,172	2,968	98,17
39	350	29.601,24	101,227	1,127	101,23
40	500	-	104,640	-	104,64

$$R_1 = 18,639 \times 1.044,36 = \text{R\$ } 19.465,66$$

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 2ª iteração

$G_1+G_{31} =$	41.150,39	$G_{10}+G_{38} =$	22.245,04	$G_7+G_{34} =$	13.505,68
$G_1+G_{32} =$	26.274,69	$G_{10}+G_{39} =$	47.253,80	$G_7+G_{35} =$	12.971,24
$G_1+G_{33} =$	23.264,97	$G_{17}+G_{31} =$	27.429,19	$G_7+G_{38} =$	16.519,36
$G_1+G_{34} =$	22.154,00	$G_{17}+G_{32} =$	12.553,49	$G_7+G_{39} =$	41.528,12
$G_1+G_{35} =$	21.619,56	$G_{17}+G_{33} =$	9.543,77	$G_{19}+G_{31} =$	36.203,88
$G_1+G_{38} =$	25.167,68	$G_{17}+G_{34} =$	8.432,80	$G_{19}+G_{32} =$	21.328,18
$G_1+G_{39} =$	50.176,43	$G_{17}+G_{35} =$	7.898,36	$G_{19}+G_{33} =$	18.318,45
$G_2+G_{31} =$	26.274,69	$G_{17}+G_{38} =$	11.446,48	$G_{19}+G_{34} =$	17.207,49
$G_2+G_{32} =$	11.398,99	$G_{17}+G_{39} =$	36.455,23	$G_{19}+G_{35} =$	16.673,04
$G_2+G_{33} =$	8.389,27	$G_3+G_{31} =$	37.319,58	$G_{19}+G_{38} =$	20.221,16
$G_2+G_{34} =$	7.278,30	$G_3+G_{32} =$	22.443,89	$G_{19}+G_{39} =$	45.229,92
$G_2+G_{35} =$	6.743,86	$G_3+G_{33} =$	19.434,16	$G_{22}+G_{31} =$	42.757,10
$G_2+G_{38} =$	10.291,98	$G_3+G_{34} =$	18.32,20	$G_{22}+G_{32} =$	27.881,40
$G_2+G_{39} =$	35.300,73	$G_3+G_{35} =$	17.788,75	$G_{22}+G_{33} =$	24.871,68
$G_{10}+G_{31} =$	38.227,75	$G_3+G_{38} =$	21.336,87	$G_{22}+G_{34} =$	23.760,71
$G_{10}+G_{32} =$	23.352,05	$G_3+G_{39} =$	46.345,63	$G_{22}+G_{35} =$	23.226,27
$G_{10}+G_{33} =$	20.342,33	$G_7+G_{31} =$	32.502,07	$G_{22}+G_{38} =$	26.774,39
$G_{10}+G_{34} =$	19.231,37	$G_7+G_{32} =$	17.626,37	$G_{22}+G_{39} =$	51.783,15
$G_{10}+G_{35} =$	18.696,92	$G_7+G_{33} =$	14.616,65		

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 3ª iteração

$G_1+G_{31}+G_6 =$	46.846,65	$G_3+G_{38}+G_6 =$	27.033,14	$G_{17}+G_{34} =$	8.432,80
$G_1+G_{32}+G_6 =$	31.970,95	$G_3+G_{39}+G_6 =$	52.041,89	$G_{17}+G_{35} =$	7.898,36
$G_1+G_{33}+G_6 =$	28.961,23	$G_7+G_{31} =$	32.502,07	$G_{17}+G_{38} =$	11.446,48
$G_1+G_{34}+G_6 =$	27.850,27	$G_7+G_{32} =$	17.626,37	$G_{17}+G_{39} =$	36.455,23
$G_1+G_{35}+G_6 =$	27.315,82	$G_7+G_{33} =$	14.616,65	$G_{19}+G_{31} =$	36.203,88
$G_1+G_{38}+G_6 =$	30.863,94	$G_7+G_{34} =$	13.505,68	$G_{19}+G_{32} =$	21.328,18
$G_1+G_{39}+G_6 =$	55.872,70	$G_7+G_{35} =$	12.971,24	$G_{19}+G_{33} =$	18.318,45
$G_2+G_{31}+G_6 =$	31.970,95	$G_7+G_{38} =$	16.519,36	$G_{19}+G_{34} =$	17.207,49
$G_2+G_{32}+G_6 =$	17.095,26	$G_7+G_{39} =$	41.528,12	$G_{19}+G_{35} =$	16.673,04
$G_2+G_{33}+G_6 =$	14.085,53	$G_{10}+G_{31} =$	38.227,75	$G_{19}+G_{38} =$	20.221,16
$G_2+G_{34}+G_6 =$	12.974,57	$G_{10}+G_{32} =$	23.352,05	$G_{19}+G_{39} =$	45.229,92
$G_2+G_{35}+G_6 =$	12.440,12	$G_{10}+G_{33} =$	20.342,33	$G_{22}+G_{31} =$	42.757,10
$G_2+G_{38}+G_6 =$	15.988,24	$G_{10}+G_{34} =$	19.231,37	$G_{22}+G_{32} =$	27.881,40
$G_2+G_{39}+G_6 =$	40.997,00	$G_{10}+G_{35} =$	18.696,92	$G_{22}+G_{33} =$	24.871,68
$G_3+G_{31}+G_6 =$	43.015,85	$G_{10}+G_{38} =$	22.245,04	$G_{22}+G_{34} =$	23.760,71
$G_3+G_{32}+G_6 =$	28.140,15	$G_{10}+G_{39} =$	47.253,80	$G_{22}+G_{35} =$	23.226,27
$G_3+G_{33}+G_6 =$	25.130,43	$G_{17}+G_{31} =$	27.429,19	$G_{22}+G_{38} =$	26.774,39
$G_3+G_{34}+G_6 =$	24.019,46	$G_{17}+G_{32} =$	12.553,49	$G_{22}+G_{39} =$	51.783,15
$G_3+G_{35}+G_6 =$	23.485,02	$G_{17}+G_{33} =$	9.543,77		

2ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_2) = 504,12 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	3,926	40,14
3	200	16.744,39	3,903	1,412	43,90
4	150	19.941,39	3,921	0,381	43,92
5	250	-	44,780	-	44,78
6	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
7	250	11.926,88	5,042	4,898	45,04
8	150	20.575,19	7,829	1,687	47,83
9	150	5.699,50	7,927	4,187	47,93
10	300	17.652,56	11,035	3,608	51,03
11	150	20.575,19	12,187	1,687	52,19
12	200	16.738,06	12,585	1,943	52,59
13	150	20.575,19	9,368	1,687	49,37
14	150	5.699,50	9,567	5,900	49,57
15	150	20.575,19	12,438	1,582	52,44
16	250	11.926,88	15,005	0,653	55,00
17	300	6.854,00	55,730	10,177	55,73
18	150	5.696,26	23,033	5,904	63,03
19	350	15.628,68	28,875	8,538	68,88
20	150	5.696,26	12,748	5,904	52,75
21	150	1.577,91	20,190	20,625	60,19
22	400	22.181,91	45,941	10,683	85,94
23	150	20.575,19	58,666	1,213	98,67
24	450	-	59,074	-	99,07
25	150	20.575,19	24,706	0,738	64,71
26	150	5.699,50	25,724	6,471	65,72
27	150	5.696,26	28,193	6,094	68,19
28	200	4.636,58	33,872	14,027	73,87
29	150	5.696,26	49,164	5,904	89,16
30	300	24.738,73	54,306	3,800	94,31
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	150/200	1.044,36	35,189	14,703	75,19
36	150	20.575,19	52,251	1,634	92,25
37	150	5.699,50	53,684	2,665	93,68
38	200	4.592,48	96,198	2,968	96,20
39	350	29.601,24	99,252	1,127	99,25
40	500	-	102,665	-	102,67

$$R_2 = 19.465,66 + 1,974 \times (5.699,50 + 1.044,36) = R\$ 32.780,45$$

3ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_3) = 493,94 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	3,926	40,14
3	200	16.744,39	3,903	1,412	43,90
4	150	19.941,39	3,921	0,381	43,92
5	250	-	44,780	-	44,78
6	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
7	250	11.926,88	5,042	4,898	45,04
8	150	20.575,19	7,829	1,687	47,83
9	150	5.699,50	7,927	4,187	47,93
10	300	17.652,56	11,035	3,608	51,03
11	150	20.575,19	12,187	1,687	52,19
12	200	16.738,06	12,585	1,943	52,59
13	150	20.575,19	9,368	1,687	49,37
14	150	5.699,50	9,567	5,900	49,57
15	150	20.575,19	12,438	1,582	52,44
16	250	11.926,88	15,005	0,653	55,00
17	400	<i>16.601,47</i>	55,730	<i>1,993</i>	55,73
18	150	5.696,26	12,856	5,904	52,86
19	350	15.628,68	18,698	8,538	58,70
20	150	5.696,26	2,571	5,904	42,57
21	150	1.577,91	10,013	20,625	50,01
22	400	22.181,91	35,764	10,683	75,76
23	150	20.575,19	48,489	1,213	88,49
24	450	-	48,897	-	88,90
25	150	20.575,19	14,529	0,738	54,53
26	150	5.699,50	15,547	6,471	55,55
27	150	5.696,26	18,016	6,094	58,02
28	200	4.636,58	23,695	14,027	63,70
29	150	5.696,26	38,987	5,904	78,99
30	300	24.738,73	44,129	3,800	84,13
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	150/200	1.044,36	35,189	4,526	75,19
36	150	20.575,19	42,074	1,634	82,07
37	150	5.699,50	43,507	2,665	83,51
38	200	4.592,48	86,021	2,968	86,02
39	350	29.601,24	89,075	1,127	89,08
40	500	-	92,488	-	92,49

$$R_3 = 32.780,45 + 10,177 \times (6.854,00 + 1.044,36) = R\$ 113.162,47$$

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 4ª iteração

$G_1+G_{31}+G_6 =$		$G_{10}+G_{31} =$	38.227,75
$G +G +G =$	31.970,95	$G_{10}+G =$	23.352,05
$G_1+G_{33}+G_6 =$		$G_{10}+G_{33} =$	20.342,33
$G +G +G =$	27.850,27	$G_{10}+G =$	19.231,37
$G_1+G_{35}+G_6 =$		$G_{10}+G_{35} =$	18.696,92
$G +G +G =$	30.863,94	$G_{10}+G =$	22.245,04
$G_1+G_{39}+G_6 =$		$G_{10}+G_{39} =$	47.253,80
$G +G +G =$	31.970,95	$G_{17}+G =$	37.176,66
$G_2+G_{32}+G_6 =$		$G_{17}+G_{32} =$	22.300,97
$G_2+G_{33}+G_6 =$	14.085,53	$G_{17}+G =$	19.291,24
$G_2+G_{34}+G_6 =$	12.974,57	$G_{17}+G_{34} =$	18.180,28
$G_2+G_{35}+G_6 =$	12.440,12	$G_{17}+G =$	17.645,83
$G_2+G_{38}+G_6 =$	15.988,24	$G_{17}+G_{38} =$	21.193,95
$G_2+G_{39}+G_6 =$	40.997,00	$G_{17}+G_{39} =$	46.202,71
$G_3+G_{31}+G_6 =$	43.015,85	$G_{19}+G_{31} =$	36.203,88
$G_3+G_{32}+G_6 =$	28.140,15		21.328,18
$G_3+G_{33}+G_6 =$	25.130,43	$G_{19}+G_{33} =$	18.318,45
$G_3+G_{34}+G_6 =$	24.019,46	$G_{19}+G_{34} =$	17.207,49
$G_3+G_{35}+G_6 =$	23.485,02	$G_{19}+G_{35} =$	16.673,04
$G_3+G_{38}+G_6 =$	27.033,14	$G_{19}+G_{38} =$	20.221,16
$G_3+G_{39}+G_6 =$	52.041,89	$G_{19}+G_{39} =$	45.229,92
$G_7+G_{31} =$	32.502,07	$G_{22}+G_{31} =$	42.757,10
$G_7+G_{32} =$	17.626,37	$G_{22}+G_{32} =$	27.881,40
$G_7+G_{33} =$	14.616,65	$G_{22}+G_{33} =$	24.871,68
$G_7+G_{34} =$	13.505,68	$G_{22}+G_{34} =$	23.760,71
$G_7+G_{35} =$	12.971,24	$G_{22}+G_{35} =$	23.226,27
$G_7+G_{38} =$	16.519,36	$G_{22}+G_{38} =$	26.774,39
$G_7+G_{39} =$	41.528,12	$G_{22}+G_{39} =$	51.783,15

4ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_4) = 491,37 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	1,355	40,14
3	200	16.744,39	1,332	1,412	41,33
4	150	19.941,39	1,350	0,381	41,35
5	250	-	42,209	-	42,21
6	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	3,333	40,00
7	250	11.926,88	2,471	4,898	42,47
8	150	20.575,19	5,258	1,687	45,26
9	150	5.699,50	5,356	4,187	45,36
10	300	17.652,56	8,464	3,608	48,46
11	150	20.575,19	9,616	1,687	49,62
12	200	16.738,06	10,014	1,943	50,01
13	150	20.575,19	6,797	1,687	46,80
14	150	5.699,50	6,996	5,900	47,00
15	150	20.575,19	9,866	1,582	49,87
16	250	11.926,88	12,434	0,653	52,43
17	400	16.601,47	53,159	1,993	53,16
18	150	5.696,26	10,285	5,904	50,29
19	350	15.628,68	16,127	8,538	56,13
20	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	150	1.577,91	7,442	20,625	47,44
22	400	22.181,91	33,193	10,683	73,19
23	150	20.575,19	45,918	1,213	85,92
24	450	-	46,326	-	86,33
25	150	20.575,19	11,958	0,738	51,96
26	150	5.699,50	12,976	6,471	52,98
27	150	5.696,26	15,445	6,094	55,44
28	200	4.636,58	21,124	14,027	61,12
29	150	5.696,26	36,416	5,904	76,42
30	300	24.738,73	41,558	3,800	81,56
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	150/200	1.044,36	35,189	1,955	75,19
36	150	20.575,19	39,503	1,634	79,50
37	150	5.699,50	40,936	2,665	80,94
38	200	4.592,48	83,450	2,968	83,45
39	350	29.601,24	86,504	1,127	86,50
40	500	-	89,917	-	89,92

$$R_4 = 113.162,47 + 1,332 \times (5.699,50 + 5.696,26 + 1.577,91 + 1.044,36) = \text{R\$ } 145.147,09$$

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 5ª iteração

$G_1+G_{31}+G_6+G_{20} = 52.542,92$	$G_{17}+G_{31}+G_{20} = 42.872,93$	$G_{10}+G_{31}+G_{21} = 39.805,67$
$G_1+G_{32}+G_6+G_{20} = 37.667,22$	$G_{17}+G_{32}+G_{20} = 27.997,23$	$G_{10}+G_{32}+G_{21} = 24.929,97$
$G_1+G_{33}+G_6+G_{20} = 34.657,50$	$G_{17}+G_{33}+G_{20} = 24.987,51$	$G_{10}+G_{33}+G_{21} = 21.920,24$
$G_1+G_{34}+G_6+G_{20} = 33.546,53$	$G_{17}+G_{34}+G_{20} = 23.876,54$	$G_{10}+G_{34}+G_{21} = 20.809,28$
$G_1+G_{35}+G_6+G_{20} = 33.012,09$	$G_{17}+G_{35}+G_{20} = 23.342,10$	$G_{10}+G_{35}+G_{21} = 20.274,83$
$G_1+G_{38}+G_6+G_{20} = 36.560,21$	$G_{17}+G_{38}+G_{20} = 26.890,22$	$G_{10}+G_{38}+G_{21} = 23.822,95$
$G_1+G_{39}+G_6+G_{20} = 61.568,96$	$G_{17}+G_{39}+G_{20} = 51.898,97$	$G_{10}+G_{39}+G_{21} = 48.831,71$
$G_2+G_{31}+G_6+G_{20} = 37.667,22$	$G_1+G_{31}+G_6+G_{21} = 48.424,57$	$G_{17}+G_{31}+G_{21} = 38.754,58$
$G_2+G_{32}+G_6+G_{20} = 22.791,52$	$G_1+G_{32}+G_6+G_{21} = 33.548,87$	$G_{17}+G_{32}+G_{21} = 23.878,88$
$G_2+G_{33}+G_6+G_{20} = 19.781,80$	$G_1+G_{33}+G_6+G_{21} = 30.539,14$	$G_{17}+G_{33}+G_{21} = 20.869,15$
$G_2+G_{34}+G_6+G_{20} = 18.670,83$	$G_1+G_{34}+G_6+G_{21} = 29.428,18$	$G_{17}+G_{34}+G_{21} = 19.758,19$
$G_2+G_{35}+G_6+G_{20} = 18.136,39$	$G_1+G_{35}+G_6+G_{21} = 28.893,73$	$G_{17}+G_{35}+G_{21} = 19.223,74$
$G_2+G_{38}+G_6+G_{20} = 21.684,51$	$G_1+G_{38}+G_6+G_{21} = 32.441,85$	$G_{17}+G_{38}+G_{21} = 22.771,86$
$G_2+G_{39}+G_6+G_{20} = 46.693,26$	G	$57.450,61$
$G_3+G_{31}+G_6+G_{20} = 48.712,11$	$G_2+G_{31}+G_6+G_{21} = 33.548,87$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 41.900,14$
$G_3+G_{32}+G_6+G_{20} = 33.836,41$	$G_2+G_{32}+G_6+G_{21} = 18.673,17$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 27.024,44$
$G_3+G_{33}+G_6+G_{20} = 30.826,69$	$G_2+G_{33}+G_6+G_{21} = 15.663,44$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 24.014,72$
$G_3+G_{34}+G_6+G_{20} = 29.715,73$	$G_2+G_{34}+G_6+G_{21} = 14.552,48$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 22.903,75$
$G_3+G_{35}+G_6+G_{20} = 29.181,28$	$G_2+G_{35}+G_6+G_{21} = 14.018,03$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 22.369,31$
$G_3+G_{38}+G_6+G_{20} = 32.729,40$	$G_2+G_{38}+G_6+G_{21} = 17.566,15$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 25.917,43$
$G_3+G_{39}+G_6+G_{20} = 57.738,16$	$G_2+G_{39}+G_6+G_{21} = 42.574,91$	$G_{19}+G_{31}+G_{20} = 50.926,18$
$G_7+G_{31}+G_{20} = 38.198,34$	$G_3+G_{31}+G_6+G_{21} = 44.593,76$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 37.781,79$
$G_7+G_{32}+G_{20} = 23.322,64$	$G_3+G_{32}+G_6+G_{21} = 29.718,06$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 22.906,09$
$G_7+G_{33}+G_{20} = 20.312,91$	$G_3+G_{33}+G_6+G_{21} = 26.708,34$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 19.896,36$
$G_7+G_{34}+G_{20} = 19.201,95$	$G_3+G_{34}+G_6+G_{21} = 25.597,37$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 18.785,40$
$G_7+G_{35}+G_{20} = 18.667,50$	$G_3+G_{35}+G_6+G_{21} = 25.062,93$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 18.250,96$
$G_7+G_{38}+G_{20} = 22.215,62$	$G_3+G_{38}+G_6+G_{21} = 28.611,05$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 21.799,08$
$G_7+G_{39}+G_{20} = 47.224,38$	$G_3+G_{39}+G_6+G_{21} = 53.619,81$	$G_{19}+G_{31}+G_{21} = 46.807,83$
$G_{10}+G_{31}+G_{20} = 43.924,02$	$G_7+G_{31}+G_{21} = 34.079,98$	$G_{22}+G_{31} = 42.757,10$
$G_{10}+G_{32}+G_{20} = 29.048,32$	$G_7+G_{32}+G_{21} = 19.204,28$	$G_{22}+G_{32} = 27.881,40$
$G_{10}+G_{33}+G_{20} = 26.038,60$	$G_7+G_{33}+G_{21} = 16.194,56$	$G_{22}+G_{33} = 24.871,68$
$G_{10}+G_{34}+G_{20} = 24.927,63$	$G_7+G_{34}+G_{21} = 15.083,59$	$G_{22}+G_{34} = 23.760,71$
$G_{10}+G_{35}+G_{20} = 24.393,19$	$G_7+G_{35}+G_{21} = 14.549,15$	$G_{22}+G_{35} = 23.226,27$
$G_{10}+G_{38}+G_{20} = 27.941,31$	$G_7+G_{38}+G_{21} = 18.097,27$	$G_{22}+G_{38} = 26.774,39$
$G_{10}+G_{39}+G_{20} = 52.950,06$	$G_7+G_{39}+G_{21} = 43.106,03$	$G_{22}+G_{39} = 51.783,15$

5ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_5) = 490,04 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	<u>0,000</u>	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018		40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	2,001	40,00
7	250	11.926,88	1,139	4,898	41,14
8	150	20.575,19	3,926	1,687	43,93
9	150	5.699,50		4,187	44,02
10	300	17.652,56	7,132	3,608	47,13
11	150	20.575,19	8,284	1,687	48,28
12	200	16.738,06	8,682	1,943	48,68
13	150	20.575,19	5,465	1,687	45,47
14	150	5.699,50		5,900	45,66
15	150	20.575,19	8,535	1,582	48,53
16	250	11.926,88	11,102	0,653	51,10
17	400	16.601,47	51,827	1,993	51,83
18	150	5.696,26	8,953	5,904	48,95
19	350	15.628,68	14,795	8,538	54,80
20	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	150/200	1.577,91	7,442	19,293	47,44
22	400	22.181,91	31,861	10,683	71,86
23	150	20.575,19		1,213	84,59
24	450	-	44,994	-	84,99
25	150	20.575,19	10,626	0,738	50,63
26	150	5.699,50	11,644	6,471	51,64
27	150	5.696,26	14,113	6,094	54,11
28	200	4.636,58	19,792	14,027	59,79
29	150	5.696,26	35,084	5,904	75,08
30	300	24.738,73	40,226	3,800	80,23
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	150/200	1.044,36	35,189	0,623	75,19
36	150	20.575,19	38,171	1,634	78,17
37	150	5.699,50	39,604	2,665	79,60
38	200	4.592,48	82,118	2,968	82,12
39	350	29.601,24	85,172	1,127	85,17
40	500	-	88,585	-	88,59

$$R_5 = 145.147,09 + 0,623 \times (11.926,88 + 1.577,91 + 1.044,36) = R\$ 163.817,56$$

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 6ª iteração

$G_3+G_{31}+G_6+G_{20} =$	48.712,11	$G_3+G_{35}+G_6+G_{21} =$	26.443,27
	33.836,41	$G_3+G_{38}+G_6+G_{21} =$	28.611,05
	30.826,69	$G_3+G_{39}+G_6+G_{21} =$	53.619,81
	29.715,73	$G_7+G_{31}+G_{21} =$	34.079,98
$G_3+G_{35}+G_6+G_{20} =$	30.561,62	$G_7+G_{32}+G_{21} =$	19.204,28
$G +G +G +G =$	32.729,40	$G_7+G_{33}+G_{21} =$	16.194,56
$G_3+G_{39}+G_6+G_{20} =$	57.738,16	$G_7+G_{34}+G_{21} =$	15.083,59
$G_7+G_{31}+G_{20} =$	38.198,34	$G_7+G_{35}+G_{21} =$	15.929,49
$G_7+G_{32}+G_{20} =$	23.322,64		18.097,27
$G_7+G_{33}+G_{20} =$	20.312,91	$G_7+G_{39}+G_{21} =$	43.106,03
$G_7+G_{34}+G_{20} =$	19.201,95	$G_{10}+G_{31}+G_{21} =$	39.805,67
$G_7+G_{35}+G_{20} =$	20.047,84	$G_{10}+G_{32}+G_{21} =$	24.929,97
$G_7+G_{38}+G_{20} =$	22.215,62	$G_{10}+G_{33}+G_{21} =$	21.920,24
$G_7+G_{39}+G_{20} =$		$G_{10}+G_{34}+G_{21} =$	20.809,28
$G_{10}+G_{31}+G_{20} =$	43.924,02	$G_{10}+G_{35}+G_{21} =$	21.655,17
$G_{10}+G_{32}+G_{20} =$	29.048,32	$G_{10}+G_{38}+G_{21} =$	23.822,95
$G_{10}+G_{33}+G_{20} =$	26.038,60	$G_{10}+G_{39}+G_{21} =$	48.831,71
$G_{10}+G_{34}+G_{20} =$	24.927,63	$G_{17}+G_{31}+G_{21} =$	38.754,58
$G_{10}+G_{35}+G_{20} =$	25.773,53	G	23.878,88
$G_{10}+G_{38}+G_{20} =$	27.941,31	$G_{17}+G_{33}+G_{21} =$	20.869,15
$G_{10}+G_{39}+G_{20} =$	52.950,06	$G_{17}+G_{34}+G_{21} =$	19.758,19
$G +G +G =$	42.872,93	$G_{17}+G_{35}+G_{21} =$	20.604,08
$G_{17}+G_{32}+G_{20} =$		$G_{17}+G_{38}+G_{21} =$	22.771,86
$G_{17}+G_{33}+G_{20} =$	24.987,51	$G_{17}+G_{39}+G_{21} =$	47.780,62
$G_{17}+G_{34}+G_{20} =$	23.876,54	$G_{19}+G_{31}+G_{21} =$	37.781,79
	24.722,44	$G_{19}+G_{32}+G_{21} =$	22.906,09
$G_{17}+G_{38}+G_{20} =$	26.890,22	$G_{19}+G_{33}+G_{21} =$	19.896,36
$G_{17}+G_{39}+G_{20} =$	51.898,97		18.785,40
$G_{19}+G_{31}+G_{20} =$	41.900,14	$G_{19}+G_{35}+G_{21} =$	19.631,29
$G_{19}+G_{32}+G_{20} =$	27.024,44	$G_{19}+G_{38}+G_{21} =$	21.799,08
$G_{19}+G_{33}+G_{20} =$	24.014,72	$G_{19}+G_{39}+G_{21} =$	46.807,83
$G_{19}+G_{34}+G_{20} =$	22.903,75	$G_{22}+G_{31} =$	42.757,10
$G_{19}+G_{35}+G_{20} =$	23.749,65	$G_{22}+G_{32} =$	27.881,40
$G_{19}+G_{38}+G_{20} =$	25.917,43	$G_{22}+G_{33} =$	24.871,68
$G +G +G =$	50.926,18	$G_{22}+G_{34} =$	23.760,71
$G_3+G_{31}+G_6+G_{21} =$		$G_{22}+G_{35} =$	24.606,61
$G_3+G_{32}+G_6+G_{21} =$	29.718,06	$G_{22}+G_{38} =$	26.774,39
$G_3+G_{33}+G_6+G_{21} =$	26.708,34	$G_{22}+G =$	51.783,15
$G_3+G_{34}+G_6+G_{21} =$	25.597,37		

6ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_6) = 489,41 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19		1,318	40,00
2	150/200		0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39		1,412	40,00
4	150		0,018	0,381	40,02
5	250		40,877	-	40,88
6	150/200		<u>0,000</u>	2,001	40,00
7		11.926,88	1,139	4,274	41,14
8		20.575,19	3,303	1,687	43,30
9	150	5.699,50	3,401	4,187	43,40
10	300	17.652,56	6,509	3,608	46,51
11	150	20.575,19	7,661	1,687	47,66
12	200	16.738,06	8,059	1,943	48,06
13	150	20.575,19	4,842	1,687	44,84
14		5.699,50	5,040	5,900	45,04
15		20.575,19	7,911	1,582	47,91
16		11.926,88	10,478	0,653	50,48
17		16.601,47	51,204	1,993	51,20
18		5.696,26	8,330	5,904	48,33
19		15.628,68	14,172	8,538	54,17
20		5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	150/200	1.577,91	7,442	18,670	47,44
22	400	22.181,91	31,237	10,683	71,24
23	150	20.575,19	43,963	1,213	83,96
24	450	-	44,371	-	84,37
25	150	20.575,19	10,003	0,738	50,00
26	150	5.699,50	11,021	6,471	51,02
27	150	5.696,26	13,490	6,094	53,49
28		4.636,58	19,169	14,027	59,17
29		5.696,26	34,461	5,904	74,46
30		24.738,73	39,603	3,800	79,60
31		20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150	1.578,81	18,544	14,429	58,54
35	200	2.424,70	35,189	5,516	75,19
36	150	20.575,19	37,548	1,634	77,55
37	150	5.699,50	38,981	2,665	78,98
38	200	4.592,48	81,495	2,968	81,49
39		29.601,24	84,549	1,127	84,55
	500	-	87,962	-	87,96

$$R_6 = 163.817,56 + 3,303 \times (11.926,88 + 1.577,91 + 1.578,81) = R\$ 172.885,76$$

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 7ª iteração

$G_3+G_{31}+G_6+G_{20}+G_8=$	69.287,31		42.872,93		39.779,48
	54.411,61		27.997,23		24.903,78
	51.401,89		24.987,51		21.894,05
	50.290,92		23.876,54		20.783,09
	51.136,82		24.722,44		21.628,98
	53.304,60		26.890,22		23.796,77
	78.313,35		51.898,97		48.805,52
	58.773,53		41.900,14		39.805,67
	43.897,83		27.024,44		24.929,97
	40.888,11		24.014,72		21.920,24
	39.777,14		22.903,75		20.809,28
	40.623,04		23.749,65		21.655,17
	42.790,82		25.917,43		23.822,95
	67.799,57		50.926,18		48.831,71
	54.411,61		65.168,96		38.754,58
	39.535,91		50.293,26		23.878,88
	36.526,19		47.283,53		20.869,15
	35.415,22		46.172,57		19.758,19
	36.261,12		47.018,46		20.604,08
	38.428,90		49.186,24		22.771,86
	63.437,65		74.195,00		47.780,62
	43.897,83		54.655,18	$G_{19}+G_{31}+G_{21}==$	37.781,79
$G_7+G_{32}+G_{20}+G_9==$	29.022,13	$G_7+G_{32}+G_{21}+G_8==$	39.779,48	$G_{19}+G_{32}+G_{21}==$	22.906,09
$G_7+G_{33}+G_{20}+G_9==$	26.012,41	$G_7+G_{33}+G_{21}+G_8==$	36.769,75	$G_{19}+G_{33}+G_{21}==$	19.896,36
$G_7+G_{34}+G_{20}+G_9==$	24.901,44	$G_7+G_{34}+G_{21}+G_8==$	35.658,79	<math>G_{19}+G_{34}+G_{21}= =</math>	18.785,40
$G_7+G_{35}+G_{20}+G_9==$	25.747,34	$G_7+G_{35}+G_{21}+G_8==$	36.504,68	$G_{19}+G_{35}+G_{21}==$	19.631,29
$G_7+G_{38}+G_{20}+G_9==$	27.915,12	$G_7+G_{38}+G_{21}+G_8==$	38.672,47	$G_{19}+G_{38}+G_{21}==$	21.799,08
$G_7+G_{39}+G_{20}+G_9==$	52.923,88	$G_7+G_{39}+G_{21}+G_8==$	63.681,22	$G_{19}+G_{39}+G_{21}==$	46.807,83
$G_{10}+G_{31}+G_{20}==$	43.924,02	$G_3+G_{31}+G_6+G_{21}+G_9==$	50.293,26	$G_{22}+G_{31}==$	42.757,10
$G_{10}+G_{32}+G_{20}==$	29.048,32	$G_3+G_{32}+G_6+G_{21}+G_9==$	35.417,56	$G_{22}+G_{32}==$	27.881,40
$G_{10}+G_{33}+G_{20}==$	26.038,60	$G_3+G_{33}+G_6+G_{21}+G_9==$	32.407,83	$G_{22}+G_{33}==$	24.871,68
$G_{10}+G_{34}+G_{20}==$	24.927,63	$G_3+G_{34}+G_6+G_{21}+G_9==$	31.296,87	$G_{22}+G_{34}==$	23.760,71
$G_{10}+G_{35}+G_{20}==$	25.773,53	$G_3+G_{35}+G_6+G_{21}+G_9==$	32.142,76	$G_{22}+G_{35}==$	24.606,61
$G_{10}+G_{38}+G_{20}==$	27.941,31	$G_3+G_{38}+G_6+G_{21}+G_9==$	34.310,55	$G_{22}+G_{38}==$	26.774,39
$G_{10}+G_{39}+G_{20}==$	52.950,06	$G_3+G_{39}+G_6+G_{21}+G_9==$	59.319,30	$G_{22}+G_{39}==$	51.783,15

7ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_7) = 486,11 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	<u>0,000</u>	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	400	16.601,47	47,901	1,993	47,90
18	150	5.696,26	5,027	5,904	45,03
19	350	15.628,68	10,869	8,538	50,87
20	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	150/200	1.577,91	7,442	15,367	47,44
22	400	22.181,91	27,935	10,683	67,93
23	150	20.575,19	40,660	1,213	80,66
24	450	-	41,068	-	81,07
25	150	20.575,19	6,700	0,738	46,70
26	150	5.699,50	7,718	6,471	47,72
27	150	5.696,26	10,187	6,094	50,19
28	200	4.636,58	15,866	14,027	55,87
29	150	5.696,26	31,158	5,904	71,16
30	300	24.738,73	36,300	3,800	76,30
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150/200	1.578,81	18,544	11,126	58,54
35	200	2.424,70	31,886	5,516	71,89
36	150	20.575,19	34,245	1,634	74,25
37	150	5.699,50	35,678	2,665	75,68
38	200	4.592,48	78,192	2,968	78,19
39	350	29.601,24	81,246	1,127	81,25
40	500	-	84,659		84,66

$$R_7 = 172.885,76 + 6,700 \times (15.628,68 + 1.577,91 + 1.578,81) = R\$ 222.702,05$$

Resumo do cálculo dos gradientes de câmbio para a 8ª iteração

$G_3+G_{31}+G_6+G_{20}+G_8 =$	69.287,31	$G_7+G_{31}+G_{20}+G_9 =$	43.897,83	$G_{10}+G_{31}+G_{21} =$	39.805,67
$G_3+G_{32}+G_6+G_{20}+G_8 =$	54.411,61	$G_7+G_{32}+G_{20}+G_9 =$	29.022,13	$G_{10}+G_{32}+G_{21} =$	24.929,97
$G_3+G_{33}+G_6+G_{20}+G_8 =$	51.401,89	$G_7+G_{33}+G_{20}+G_9 =$	26.012,41	$G_{10}+G_{33}+G_{21} =$	21.920,24
$G_3+G_{34}+G_6+G_{20}+G_8 =$	50.290,92	$G_7+G_{34}+G_{20}+G_9 =$	24.901,44	$G_{10}+G_{34}+G_{21} =$	20.809,28
$G_3+G_{35}+G_6+G_{20}+G_8 =$	51.136,82	$G_7+G_{35}+G_{20}+G_9 =$	25.747,34	$G_{10}+G_{35}+G_{21} =$	21.655,17
$G_3+G_{38}+G_6+G_{20}+G_8 =$	53.304,60	G	27.915,12	$G_{10}+G_{38}+G_{21} =$	23.822,95
$G_3+G_{39}+G_6+G_{20}+G_8 =$	78.313,35	$G_7+G_{39}+G_{20}+G_9 =$	52.923,88	$G_{10}+G_{39}+G_{21} =$	48.831,71
$G_3+G_{31}+G_6+G_{20}+G_9 =$	54.411,61	$G_7+G_{31}+G_{21}+G_8 =$	54.655,18	$G_{17}+G_{31}+G_{21} =$	38.754,58
$G_3+G_{32}+G_6+G_{20}+G_9 =$	39.535,91	$G_7+G_{32}+G_{21}+G_8 =$	39.779,48	$G_{17}+G_{32}+G_{21} =$	23.878,88
$G_3+G_{33}+G_6+G_{20}+G_9 =$	36.526,19	$G_7+G_{33}+G_{21}+G_8 =$	36.769,75	$G_{17}+G_{33}+G_{21} =$	20.869,15
$G_3+G_{34}+G_6+G_{20}+G_9 =$	35.415,22	$G_7+G_{34}+G_{21}+G_8 =$	35.658,79	$G_{17}+G_{34}+G_{21} =$	19.758,19
$G_3+G_{35}+G_6+G_{20}+G_9 =$	36.261,12	$G_7+G_{35}+G_{21}+G_8 =$	36.504,68	$G_{17}+G_{35}+G_{21} =$	20.604,08
$G_3+G_{38}+G_6+G_{20}+G_9 =$	38.428,90	$G_7+G_{38}+G_{21}+G_8 =$	38.672,47	$G_{17}+G_{38}+G_{21} =$	22.771,86
G	63.437,65	G	63.681,22	$G_{17}+G_{39}+G_{21} =$	47.780,62
$G_3+G_{31}+G_6+G_{21}+G_8 =$	65.168,96	$G_7+G_{31}+G_{21}+G_9 =$	39.779,48	$G_{19}+G_{31}+G_{20} =$	41.900,14
$G_3+G_{32}+G_6+G_{21}+G_8 =$	50.293,26	$G_7+G_{32}+G_{21}+G_9 =$	24.903,78	$G_{19}+G_{32}+G_{20} =$	27.024,44
$G_3+G_{33}+G_6+G_{21}+G_8 =$	47.283,53	$G_7+G_{33}+G_{21}+G_9 =$	21.894,05	$G_{19}+G_{33}+G_{20} =$	24.014,72
$G_3+G_{34}+G_6+G_{21}+G_8 =$	46.172,57	$G_7+G_{34}+G_{21}+G_9 =$	20.783,09	$G_{19}+G_{34}+G_{20} =$	22.903,75
$G_3+G_{35}+G_6+G_{21}+G_8 =$	47.018,46	$G_7+G_{35}+G_{21}+G_9 =$	21.628,98	$G_{19}+G_{35}+G_{20} =$	23.749,65
$G_3+G_{38}+G_6+G_{21}+G_8 =$	49.186,24		23.796,77	$G_{19}+G_{38}+G_{20} =$	25.917,43
$G_3+G_{39}+G_6+G_{21}+G_8 =$	74.195,00	$G_7+G_{39}+G_{21}+G_9 =$	48.805,52	$G_{19}+G_{39}+G_{20} =$	50.926,18
$G_3+G_{31}+G_6+G_{21}+G_9 =$	50.293,26	$G_{10}+G_{31}+G_{20} =$	43.924,02	$G_{19}+G_{31}+G_{21} =$	37.781,79
$G_3+G_{32}+G_6+G_{21}+G_9 =$	35.417,56	$G_{10}+G_{32}+G_{20} =$	29.048,32	$G_{19}+G_{32}+G_{21} =$	22.906,09
$G_3+G_{33}+G_6+G_{21}+G_9 =$	32.407,83	$G_{10}+G_{33}+G_{20} =$	26.038,60	$G_{19}+G_{33}+G_{21} =$	19.896,36
$G_3+G_{34}+G_6+G_{21}+G_9 =$	31.296,87	$G_{10}+G_{34}+G_{20} =$	24.927,63	$G_{19}+G_{34}+G_{21} =$	18.785,40
$G_3+G_{35}+G_6+G_{21}+G_9 =$	32.142,76	$G_{10}+G_{35}+G_{20} =$	25.773,53	$G_{19}+G_{35}+G_{21} =$	19.631,29
$G_3+G_{38}+G_6+G_{21}+G_9 =$	34.310,55	$G_{10}+G_{38}+G_{20} =$	27.941,31	$G_{19}+G_{38}+G_{21} =$	21.799,08
$G_3+G_{39}+G_6+G_{21}+G_9 =$	59.319,30	$G_{10}+G_{39}+G_{20} =$	52.950,06	$G_{19}+G_{39}+G_{21} =$	46.807,83
$G_7+G_{31}+G_{20}+G_8 =$	58.773,53	$G_{17}+G_{31}+G_{20} =$	42.872,93	$G_{22}+G_{31} =$	42.757,10
$G_7+G_{32}+G_{20}+G_8 =$	43.897,83	$G_{17}+G_{32}+G_{20} =$	27.997,23	$G_{22}+G_{32} =$	27.881,40
$G_7+G_{33}+G_{20}+G_8 =$	40.888,11	$G_{17}+G_{33}+G_{20} =$	24.987,51	$G_{22}+G_{33} =$	24.871,68
$G_7+G_{34}+G_{20}+G_8 =$	39.777,14	$G_{17}+G_{34}+G_{20} =$	23.876,54	G	23.760,71
$G_7+G_{35}+G_{20}+G_8 =$	40.623,04	$G_{17}+G_{35}+G_{20} =$	24.722,44	$G_{22}+G_{35} =$	24.606,61
$G_7+G_{38}+G_{20}+G_8 =$	42.790,82	$G_{17}+G_{38}+G_{20} =$	26.890,22	$G_{22}+G_{38} =$	26.774,39
	67.799,57	$G_{17}+G_{39}+G_{20} =$	51.898,97	$G_{22}+G_{39} =$	51.783,15

8ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_8) = 479,41 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	<u>0,000</u>	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	400	16.601,47	47,901	1,993	47,90
18	150	5.696,26	5,027	5,904	45,03
19	350/400	15.628,68	10,869	4,838	50,87
20	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	150/200	1.577,91	7,442	8,667	47,44
22	400	22.181,91	21,235	10,683	61,23
23	150	20.575,19	33,960	1,213	73,96
24	450	-	34,368	-	74,37
25	150	20.575,19	<u>0,000</u>	0,738	40,00
26	150	5.699,50	<u>1,018</u>	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200	4.636,58	9,166	14,027	49,17
29	150	5.696,26	24,458	5,904	64,46
30	300	24.738,73	29,600	3,800	69,60
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150/200	1.578,81	18,544	4,427	58,54
35	204,2	2.424,70	25,187	5,516	65,19
36	150	20.575,19	27,546	1,634	67,55
37	150	5.699,50	28,978	2,665	68,98
38	200	4.592,48	71,492	2,968	71,49
39	350	29.601,24	74,546	1,127	74,55
40	500	-	77,959	-	77,96

9ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_9) = 477,57 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	<u>0,000</u>	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	400	16.601,47	47,901	1,993	47,90
18	150	5.696,26	5,027	5,904	45,03
19	400	11.843,56	10,869	5,344	50,87
20	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	150/200	1.577,91	7,442	6,829	47,44
22	400	22.181,91	19,397	10,683	59,40
23	150	20.575,19	32,122	1,213	72,12
24	450	-	32,530	-	72,53
25	150	20.575,19	<u>0,000</u>	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200	4.636,58	9,166	12,189	49,17
29	150	5.696,26	22,620	5,904	62,62
30	300	24.738,73	27,762	3,800	67,76
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	150/200	1.578,81	18,544	2,588	58,54
35	204,2	2.424,70	23,348	5,516	63,35
36	150	20.575,19	25,707	1,634	65,71
37	150	5.699,50	27,140	2,665	67,14
38	200	4.592,48	69,654	2,968	69,65
39	350	29.601,24	72,708	1,127	72,71
40	500	-	76,121	-	76,12

Método de Otimização para a Reabilitação de Redes de Distribuição de Água

10ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{10}) = 474,98 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	400	16.601,47	47,901	1,993	47,90
18	150	-	5,904	5,904	45,03
19	400/500	-	2,756	2,756	50,87
	150	5.696,26	-	5,904	-
21	-	-	7,442	4,240	47,44
22	400	22.181,91	16,808	10,683	-
23	150	20.575,19	29,534	-	-
24	450	-	29,942	-	-
25	-	-	0,000	0,738	40,00
	150	5.699,50	1,018	-	-
27	150	-	-	6,094	43,49
	-	4.636,58	9,166	9,601	-
29	150	5.696,26	-	-	60,03
30	300	24.738,73	-	-	65,17
31	150	-	0,000	1,582	40,00
	150	5.699,50	-	-	41,97
33	-	-	5,795	12,502	45,80
34	200	3.665,52	18,544	-	-
35	200	2.424,70	-	-	60,76
36	-	-	23,119	1,634	63,12
37	150	-	-	2,665	64,55
38	-	-	67,066	2,968	67,07
39	350	29.601,24	70,120	1,127	70,12
	-	-	73,533	-	-

11ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{11}) = 472,23 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	400	16.601,47	47,901	1,993	-
18	-	-	5,027	5,904	45,03
19	500	-	10,869	-	-
	150	5.696,26	-	-	40,00
21	150/200	-	-	7,485	47,44
	400	22.181,91	14,053	10,683	54,05
23	150	20.575,19	-	-	66,78
24	450	-	-	3,567	67,19
25	-	-	0,000	0,738	-
26	150	5.699,50	1,018	-	-
	-	5.696,26	3,487	6,094	43,49
	200/250	4.636,58	-	-	49,17
29	-	-	17,276	5,904	57,28
30	300	24.738,73	22,418	-	-
31	150	-	0,000	1,582	-
32	150	5.699,50	-	-	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	200	-	-	2,254	58,54
35	200/250	2.424,70	-	-	60,76
36	150	-	-	1,634	60,36
	-	5.699,50	21,796	2,665	61,80
38	-	29.601,24	64,310	2,968	64,31
	-	-	67,364	1,127	67,36
	500	-	70,777	-	70,78

12ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_{12}) =

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔH_f (m)	P_d (m)
	150	20.575,19	0,000		40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	400/500	16.601,47	47,901	0,508	47,90
18	150	5.696,26	3,543	5,904	43,54
19	500	-	9,385	-	49,38
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200	3.663,44	7,442	3,221	47,44
22	400	22.181,91	12,568	10,683	52,57
23	150	20.575,19	25,293	1,213	65,29
24	450	-	25,701	-	65,70
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200/250	4.636,58	9,166	5,360	49,17
29	150	5.696,26	15,791	5,904	55,79
30	300	24.738,73	20,933	3,800	60,93
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	200	3.665,52	18,544	2,254	58,54
35	200/250	2.424,70	20,760	1,275	60,76
36	150	20.575,19	18,879	1,634	58,88
37	150	5.699,50	20,311	2,665	60,31
38	200	4.592,48	62,825	2,968	62,83
39	350	29.601,24	65,879	1,127	65,88
40	500	-	69,292	-	69,29

13ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_{13}) =

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔH_f (m)	P_d (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,972	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150	5.699,50	0,098	4,187	40,10
10	300	17.652,56	3,206	3,608	43,21
11	150	20.575,19	4,358	1,687	44,36
12	200	16.738,06	4,756	1,943	44,76
13	150	20.575,19	1,539	1,687	41,54
14	150	5.699,50	1,738	5,900	41,74
15	150	20.575,19	4,609	1,582	44,61
16	250	11.926,88	7,176	0,653	47,18
17	500	-	47,901	-	47,90
18	150	5.696,26	3,034	5,904	43,03
19	500	-	8,877	-	48,88
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	2,713	47,44
22	400	22.181,91	12,060	10,683	52,06
23	150	20.575,19	24,785	1,213	64,79
24	450	-	25,193	-	65,19
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200/250	4.636,58	9,166	4,852	49,17
29	150	5.696,26	15,283	5,904	55,28
30	300	24.738,73	20,425	3,800	60,43
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	200	3.665,52	18,544	2,254	58,54
35	200/250	2.424,70	20,760	0,767	60,76
36	150	20.575,19	18,370	1,634	58,37
37	150	5.699,50	19,803	2,665	59,80
38	200	4.592,48	62,317	2,968	62,32
39	350	29.601,24	65,371	1,127	65,37
40	500	-	68,784	-	68,78

14ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{14}) = 469,47 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	250/300	11.926,88	1,139	0,204	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,420	40,10
10	300	17.652,56	2,439	3,608	42,44
11	150	20.575,19	3,591	1,687	43,59
12	200	16.738,06	3,989	1,943	43,99
13	150	20.575,19	0,772	1,687	40,77
14	150	5.699,50	0,970	5,900	40,97
15	150	20.575,19	3,841	1,582	43,84
16	250	11.926,88	6,408	0,653	46,41
17	500	-	47,134	-	47,13
18	150	5.696,26	2,267	5,904	42,27
19	500	-	8,109	-	48,11
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,946	47,44
22	400	22.181,91	11,293	10,683	51,29
23	150	20.575,19	24,018	1,213	64,02
24	450	-	24,426	-	64,43
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200/250	4.636,58	9,166	4,085	49,17
29	150	5.696,26	14,516	5,904	54,52
30	300	24.738,73	19,658	3,800	59,66
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150	2.689,77	5,795	12,502	45,80
34	200	3.665,52	18,544	2,254	58,54
35	250	9,040,42	20,760	1,764	60,76
36	150	20.575,19	17,603	1,634	57,60
37	150	5.699,50	19,036	2,665	59,04
38	200	4.592,48	61,550	2,968	61,55
39	350	29.601,24	64,604	1,127	64,60
40	500	-	68,017	-	68,02

15ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{15}) = 469,26 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	300	15.797,08	1,139	2,062	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,216	40,10
10	300	17.652,56	2,234	3,608	42,23
11	150	20.575,19	3,386	1,687	43,39
12	200	16.738,06	3,785	1,943	43,78
13	150	20.575,19	0,568	1,687	40,57
14	150	5.699,50	0,766	5,900	40,77
15	150	20.575,19	3,637	1,582	43,64
16	250	11.926,88	6,204	0,653	46,20
17	500	-	46,930	-	46,93
18	150	5.696,26	2,063	5,904	42,06
19	500	-	7,905	-	47,90
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,741	47,44
22	400	22.181,91	11,088	10,683	51,09
23	150	20.575,19	23,814	1,213	63,81
24	450	-	24,222	-	64,22
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200/250	4.636,58	9,166	3,881	49,17
29	150	5.696,26	14,311	5,904	54,31
30	300	24.738,73	19,454	3,800	59,45
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150/200	2.689,77	5,795	12,298	45,80
34	200	3.665,52	18,340	2,254	58,34
35	250	9,040,42	20,556	1,764	60,56
36	150	20.575,19	17,399	1,634	57,40
37	150	5.699,50	18,831	2,665	58,83
38	200	4.592,48	61,345	2,968	61,35
39	350	29.601,24	64,400	1,127	64,40
40	500	-	67,812	-	67,81

16ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{16}) = 468,70 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	300	15.797,08	1,139	2,062	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,216	40,10
10	300/400	17.652,56	2,234	3,040	42,23
11	150	20.575,19	2,819	1,687	42,82
12	200	16.738,06	3,217	1,943	43,22
13	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
14	150	5.699,50	0,198	5,900	40,20
15	150	20.575,19	3,069	1,582	43,07
16	250	11.926,88	5,636	0,653	45,64
17	500	-	46,362	-	46,36
18	150	5.696,26	1,495	5,904	41,49
19	500	-	7,337	-	47,34
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,174	47,44
22	400	22.181,91	10,520	10,683	50,52
23	150	20.575,19	23,246	1,213	63,25
24	450	-	23,654	-	63,65
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	200/250	4.636,58	9,166	3,313	49,17
29	150	5.696,26	13,744	5,904	53,74
30	300	24.738,73	18,886	3,800	58,89
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150/200	2.689,77	5,795	11,730	45,80
34	200	3.665,52	17,772	2,254	57,77
35	250	9.040,42	19,988	1,764	59,99
36	150	20.575,19	16,831	1,634	56,83
37	150	5.699,50	18,264	2,665	58,26
38	200	4.592,48	60,778	2,968	60,78
39	350	29.601,24	63,832	1,127	63,83
40	500	-	67,245	-	67,24

17ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{17}) = 465,38 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	300	15.797,08	1,139	2,062	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,216	40,10
10	300/400	17.652,56	2,234	3,040	42,23
11	150	20.575,19	2,819	1,687	42,82
12	200	16.738,06	3,217	1,943	43,22
13	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
14	150	5.699,50	0,198	5,900	40,20
15	150	20.575,19	3,069	1,582	43,07
16	250	11.926,88	5,636	0,653	45,64
17	500	-	46,362	-	46,36
18	150	5.696,26	1,495	5,904	41,49
19	500	-	7,337	-	47,34
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,174	47,44
22	400/500	22.181,91	10,520	7,370	50,52
23	150	20.575,19	19,933	1,213	59,93
24	450	-	20,341	-	60,34
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150	5.699,50	1,018	6,471	41,02
27	150	5.696,26	3,487	6,094	43,49
28	250	6.447,34	9,166	3,200	49,17
29	150	5.696,26	10,431	5,904	50,43
30	300	24.738,73	15,573	3,800	55,57
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150/200	2.689,77	5,795	8,417	45,80
34	200	3.665,52	14,459	2,254	54,46
35	250	9.040,42	16,675	1,764	56,68
36	150	20.575,19	13,518	1,634	53,52
37	150	5.699,50	14,951	2,665	54,95
38	200	4.592,48	57,465	2,968	57,46
39	350	29.601,24	60,519	1,127	60,52
40	500	-	63,932	-	63,93

18ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{18}) = 461,90 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	300	15.797,08	1,139	2,062	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,216	40,10
10	300/400	17.652,56	2,234	3,040	42,23
11	150	20.575,19	2,819	1,687	42,82
12	200	16.738,06	3,217	1,943	43,22
13	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
14	150	5.699,50	0,198	5,900	40,20
15	150	20.575,19	3,069	1,582	43,07
16	250	11.926,88	5,636	0,653	45,64
17	500	-	46,362	-	46,36
18	150	5.696,26	1,495	5,904	41,49
19	500	-	7,337	-	47,34
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,174	47,44
22	400/500	22.181,91	10,520	3,883	50,52
23	150	20.575,19	16,446	1,213	56,45
24	450	-	16,854	-	56,85
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150/200	5.699,50	1,018	2,984	41,02
27	150	5.696,26	0,000	6,094	40,00
28	250	6.447,34	5,679	3,200	45,68
29	150	5.696,26	6,944	5,904	46,94
30	300	24.738,73	12,086	3,800	52,09
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150/200	2.689,77	5,795	4,930	45,80
34	200	3.665,52	10,972	2,254	50,97
35	250	9.040,42	13,188	1,764	53,19
36	150	20.575,19	10,031	1,634	50,03
37	150	5.699,50	11,464	2,665	51,46
38	200	4.592,48	53,978	2,968	53,98
39	350	29.601,24	57,032	1,127	57,03
40	500	-	60,445	-	60,44

19ª Iteração
Cota piezométrica de cabeceira (Z_{19}) = 458,70 m

Trecho	DN	G (R\$/m)	FP (m)	ΔHf (m)	Pd (m)
1	150	20.575,19	0,000	1,318	40,00
2	150/200	5.699,50	0,139	0,023	40,14
3	200	16.744,39	0,000	1,412	40,00
4	150	19.941,39	0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	0,000	2,001	40,00
7	300	15.797,08	1,139	2,062	41,14
8	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,216	40,10
10	300/400	17.652,56	2,234	3,040	42,23
11	150	20.575,19	2,819	1,687	42,82
12	200	16.738,06	3,217	1,943	43,22
13	150	20.575,19	0,000	1,687	40,00
14	150	5.699,50	0,198	5,900	40,20
15	150	20.575,19	3,069	1,582	43,07
16	250	11.926,88	5,636	0,653	45,64
17	500	-	46,362	-	46,36
18	150	5.696,26	1,495	5,904	41,49
19	500	-	7,337	-	47,34
20	150	5.696,26	0,000	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,174	47,44
22	400/500	22.181,91	10,520	0,683	50,52
23	150	20.575,19	13,245	1,213	53,25
24	450	-	13,654	-	53,65
25	150	20.575,19	0,000	0,738	40,00
26	150/200	5.699,50	1,018	2,984	41,02
27	150	5.696,26	0,000	6,094	40,00
28	300	26.910,53	5,679	1,775	45,68
29	150	5.696,26	3,743	5,904	43,74
30	300	24.738,73	8,885	3,800	48,89
31	150	20.575,19	0,000	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150/200	2.689,77	5,795	1,730	45,80
34	200	3.665,52	7,772	2,254	47,77
35	250	9.040,42	9,988	1,764	49,99
36	150	20.575,19	6,831	1,634	46,83
37	150	5.699,50	8,263	2,665	48,26
38	200	4.592,48	50,777	2,968	50,78
39	350	29.601,24	53,831	1,127	53,83
40	500	-	57,244	-	57,24

20ª Iteração

Cota piezométrica de cabeceira (Z_{20}) = 458,01 metros

Trecho	DN	G (R\$/m)	EP (m)	ΔH_f (m)	Pd (m)
1	150		<u>0,000</u>		40,00
2	150/200		0,139		40,14
3			<u>0,000</u>		40,00
	150		0,018	0,381	40,02
5	250	-	40,877	-	40,88
6	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	2,001	40,00
7	300	15.797,08	1,139	2,062	41,14
8	150	20.575,19	<u>0,000</u>		40,00
9	150/200	5.699,50	0,098	3,216	40,10
10	300/400	17.652,56	2,234	3,040	42,23
11	150	20.575,19	2,819	1,687	42,82
12	200	16.738,06	3,217	1,943	43,22
13	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,687	40,00
14	150	5.699,50	0,198	5,900	40,20
15	150	20.575,19	3,069	1,582	43,07
16	250	11.926,88	5,636	0,653	45,64
17	500	-	46,362	-	46,36
18	150	5.696,26	1,495	5,904	41,49
19	500	-	7,337	-	47,34
20	150	5.696,26	<u>0,000</u>	5,904	40,00
21	200/250	3.663,44	7,442	1,174	47,44
22	500	-	10,520	-	50,52
23	150	20.575,19	12,563	1,213	52,56
24	450	-	12,971	-	52,97
25	150	20.575,19	<u>0,000</u>	0,738	40,00
26	150/200	5.699,50	1,018	2,301	41,02
27	150/200	5.696,26	<u>0,000</u>	5,411	40,00
28	300	26.910,53	4,996	1,775	45,00
29	150	5.696,26	3,060	5,904	43,06
30	300	24.738,73	8,203	3,800	48,20
31	150	20.575,19	<u>0,000</u>	1,582	40,00
32	150	5.699,50	1,967	5,329	41,97
33	150/200	2.689,77	5,795	1,047	45,80
34	200	3.665,52	7,089	2,254	47,09
35	250	9.040,42	9,305	1,764	49,30
36	150	20.575,19	6,148	1,634	46,15
37	150	5.699,50	7,581	2,665	47,58
38	200	4.592,48	50,095	2,968	50,09
39	350	29.601,24	53,149	1,127	53,15
40	500	-	56,562	-	56,56

 $R_T = R\$ 923.472,86$

A tabela 4.26 apresenta os gradientes de cambio ótimo do processo iterativo.

Tabela 4.26 - Gradientes de câmbio ótimo e trechos potenciais do processo iterativo

Iteração	Trechos potenciais	Nós mais desfavoráveis ($EP = 0$)	G* R\$/m
SI - 1	35	31	1.044,36
1 - 2	2 e 35	1 e 31	6.743,86
2 - 3	17 e 35	1, 6 e 31	7.898,36
3 - 4	2, 6 e 35	1, 6 e 31	12.440,12
4 - 5	2, 6, 21 e 35	1, 6, 20 e 31	14.018,03
5 - 6	7, 21 e 35	1, 3, 6, 20 e 31	14.549,15
6 - 7	7, 21 e 34	1, 3, 6, 20 e 31	15.083,59
7 - 8	19, 21 e 34	1, 3, 6, 8, 20 e 31	18.785,40
8 - 9	19, 21, 28 e 34	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	23.421,98
9 - 10	19, 21, 28 e 34	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	19.636,86
10 - 11	19, 21, 28 e 35	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	20.482,75
11 - 12	17, 21, 28 e 35	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	25.240,66
12 - 13	17, 21, 28 e 35	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	27.326,19
13 - 14	7, 9, 21, 28 e 35	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	28.351,09
14 - 15	7, 9, 21, 28 e 33	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	28.616,16
15 - 16	10, 21, 28 e 33	1, 3, 6, 8, 20, 25 e 31	28.642,35
16 - 17	22, 28 e 33	1, 3, 6, 8, 13, 20, 25 e 31	29.508,26
17 - 18	22, 26 e 33	1, 3, 6, 8, 13, 20, 25 e 31	30.571,17
18 - 19	22, 28 e 33	1, 3, 6, 8, 13, 20, 25, 27 e 31	31.319,02
19 - 20	22, 26, 27 e 33	1, 3, 6, 8, 13, 20, 25, 27 e 31	36.267,44
20 - 21	10, 14, 21, 26, 27 e 33	1, 3, 6, 8, 13, 20, 25, 27 e 31	41.101,03

Os comprimentos dos sub-trechos são proporcionais às relações existentes, respectivamente, entre as perdas de carga em cada sub-trecho e a requerida em todo o trecho, estes valores foram obtidos através das equações 4.1 e 4.2 e estão apresentados na tabela 4.27. Obviamente, que os comprimentos dos sub-trechos calculados, na prática, seriam aproximados para valores que facilitassem a instalação de novas tubulações.

Tabela 4.27 - Comprimentos e perdas de carga nos sub-trechos dos pares de diâmetros dos trechos 2, 6, 9, 10, 21, 26, 27 e 33 da rede de distribuição do setor 11

Trecho	Sub-trecho 1			Sub-trecho 2			Trecho		
	DN	L_i	Hf_i	DN	L_{ii}	Hf_{ii}	DN	L	Hf
2	150	1,26	0,030	200	308,74	1,432	150/200	310	1,462
6	150	105,10	2,489	200	204,90	0,951	150/200	310	3,440
9	150	5,13	0,121	200	214,87	0,997	150/200	220	1,118
10	300	130,11	2,909	400	79,89	0,414	300/400	210	3,323
21	200	109,29	1,831	250	190,71	1,147	200/250	300	2,978
26	150	120,90	2,862	200	219,10	1,016	150/200	340	3,878
27	150	283,84	6,723	200	37,34	0,173	150/200	320	6,896
33	150	25,98	1,303	200	284,02	2,791	150/200	310	4,094

As tabelas 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam os resultados obtidos pelo método proposto neste trabalho, de maneira que as pressões nos pontos de consumo fossem iguais ou superiores as requeridas, atendendo o pré-requisito do custo total do projeto ser mínimo.

Tabela 4.28 - Decisões de reabilitação do método proposto para o setor 11 do PNC

Trecho	DN original	Solução do método proposto		
		DN	Do (mm)	Comp. (m)
2	150	150	150	1
		200	204,2	309
6	150	150	150	105
		200	204,2	205
7	250	300	299,8	300
9	150	150	150	169
		200	204,2	51
10	300	300	300	177
		400	394,6	33
17	300	500	489,4	230
19	350	500	489,4	440
21	150	200	204,2	109
		250	252	191
22	400	500	489,4	530
26	150	150	150	121
		200	204,2	219
27	150	150	150	284
		200	204,2	36
28	200	300	299,8	440
33	150	150	150	26
		200	204,2	284
34	150	200	204,2	210
35	150	250	252	340

ALTURA MANOMÉTRICA ÓTIMA = 56,81 metros

Tabela 4.29 - Resultado final: dados dos trechos da rede de distribuição do Setor 11

Trecho	Vazão (l/s)	DN	Do (mm)	Coefficiente H. W.	Comp. (m)	Perdas (m)	Velocidade (m/s)
1	16.33	150	150	140	250.00	1.639	0.92
2	32.66	150	150	140	1.26	0.030	
	32.66	200	204.2	150	308.74	1.432	0.99
3	48.99	200	200	140	160.00	1.977	1.55
4	16.33	150	150	140	70.00	0.459	0.92
5	65.32	250	250	140	220.00	1.562	1.32
6	32.67	150	150	140	105.09	2.489	1.84
	32.67	200	204.2	150	204.91	0.951	0.99
7	130.66	300	299.8	150	300.00	2.795	1.84
8	16.33	150	150	140	320.00	2.098	0.92
9	32.66	150	150	140	168.95	3.999	1.84
	32.66	200	204.2	150	51.05	0.237	0.99
10	195.99	300	300	140	176.96	3.957	2.76
	195.99	400	394.6		33.04	0.171	1.59
11	16.33		150	140	320.00	2.098	0.92
12	49.00	200	200	140	220.00	2.719	1.55
13	16.33	150	150	140	320.00	2.098	0.92
14	32.66	150	150	140	310.00	7.338	1.84
15	16.33	150	150	140	300.00	1.967	0.92
16	130.66	250	250	140	40.00		2.65
17	326.65	500	489.4	150	230.00	1.075	1.73
18	32.67	150	150	140	310.00	7.342	1.84
19	391.99	500	489.4	150	440.00	2.883	2.07
20	32.67	150	150	140	310.00	7.342	1.84
21	65.34	200	204.2	150	109.29	1.831	1.98
	65.34	250	252	150	190.71	1.147	1.30
22	490.00	500	489.4	150	530.00	5.250	
23	16.33	150	150	140	230.00	1.508	0.92
24	522.66	450	450	140	450.00	8.591	3.27
25	16.33	150	150	140	140.00	0.918	0.92
26	32.66	150	150	140	120.90	2.862	1.84
	32.66	200	204.2	150	219.10	1.016	0.99
27	32.67	150	150	140	283.84	6.723	1.84
	32.67	200	204.2	150	36.16	0.168	0.99
28	98.00	300	299.8	150	440.00	2.406	1.38
29	32.67	150	150	140	310.00	7.342	1.84
30	163.34	300	300	140	310.00	4.946	2.30
31	16.33	150	150	140	300.00	1.967	0.92
32	32.66	150	150	140	280.00	6.628	1.84
33	48.99	150	150	140	25.98	1.303	2.76
	48.99	200	204.2	150	284.02	2.791	1.49
34	65.32	200	204.2	150	210.00	3.516	1.98
35	81.65	250	252	150	340.00	3.090	1.63
36	16.33	150	150	140	310.00	2.033	0.92
37	32.66	150	150	140	140.00	3.314	1.84
38	114.31	200	200	140	70.00	4.154	3.62
39	277.65	350	350	140	110.00	2.213	2.87
40	800.31	500	500	140	10.00	0.252	4.05

Tabela 4.30 - Resultado final: dados dos nós da rede de distribuição do Setor 11 do PNC
(altura manométrica = 56,81 metros)

Nó	Consumo (l/s)	Altura piezométrica (m)	Cota do terreno (m)	Pressão disponível (m)	Pressão requerida (m)	Excesso de pressão (m)
1	16,33	426,39	386,40	40,00	40	0,00
2	16,33	428,03	387,90	40,14	40	0,14
3	16,33	429,49	389,50	40,00	40	0,00
4	16,33	431,00	391,00	40,02	40	0,02
5	0	431,46	390,60	40,88	40	0,88
6	32,67	429,59	389,60	40,00	40	0,00
7	32,67	433,03	391,90	41,14	40	1,14
8	16,33	429,49	389,50	40,00	40	0,00
9	16,33	431,59	391,50	40,10	40	0,10
10	32,67	435,82	393,60	42,23	40	2,23
11	16,33	434,11	391,30	42,82	40	2,82
12	32,67	436,20	393,00	43,22	40	3,22
13	16,33	429,49	389,50	40,00	40	0,00
14	16,33	431,59	391,40	40,20	40	0,20
15	16,33	436,96	393,90	43,07	40	3,07
16	32,67	438,92	393,30	45,64	40	5,64
17	0	439,95	393,60	46,36	40	6,36
18	32,67	433,68	392,20	41,49	40	1,49
19	32,67	441,02	393,70	47,34	40	7,34
20	32,67	433,59	393,60	40,00	40	0,00
21	32,67	440,93	393,50	47,44	40	7,44
22	32,67	443,91	393,40	50,52	40	10,52
23	16,33	447,65	395,10	52,56	40	12,56
24	16,33	449,16	396,20	52,97	40	12,97
25	16,33	443,39	403,40	40,00	40	0,00
26	16,33	444,31	403,30	41,02	40	1,02
27	32,67	441,29	401,30	40,00	40	0,00
28	32,67	448,18	403,20	45,00	40	5,00
29	32,67	443,25	400,20	43,06	40	3,06
30	32,67	450,59	402,40	48,20	40	8,20
31	16,33	432,09	392,10	40,00	40	0,00
32	16,33	434,05	392,10	41,97	40	1,97
33	16,33	440,68	394,90	45,80	40	5,80
34	16,33	444,78	397,70	47,09	40	7,09
35	16,33	448,29	399,00	49,30	40	9,30
36	16,33	446,03	399,90	46,15	40	6,15
37	16,33	448,07	400,50	47,58	40	7,58
38	0	451,38	401,30	50,09	0	50,09
39	0	455,54	402,40	53,15	0	53,15
40	0	457,75	401,20	56,56	0	56,56

A tabela 4.31 e a figura 4.8 apresentam diversos custos de reabilitação para cada iteração da 2ª etapa, todas estas soluções representam intervenções que podem ser implementadas na rede, possibilitando ao decisor do sistema escolher ao longo do processo iterativo. Por exemplo, se o órgão gestor do sistema decidir que o investimento inicial na reabilitação da rede deve ser inferior a R\$ 800.000,00, a decisão a ser escolhida será a indicada pela 18ª iteração, onde a cota de alimentação é 60,70 metros. Neste caso, as intervenções na rede hidráulica provenientes da 19ª e 20ª iterações seriam descartadas.

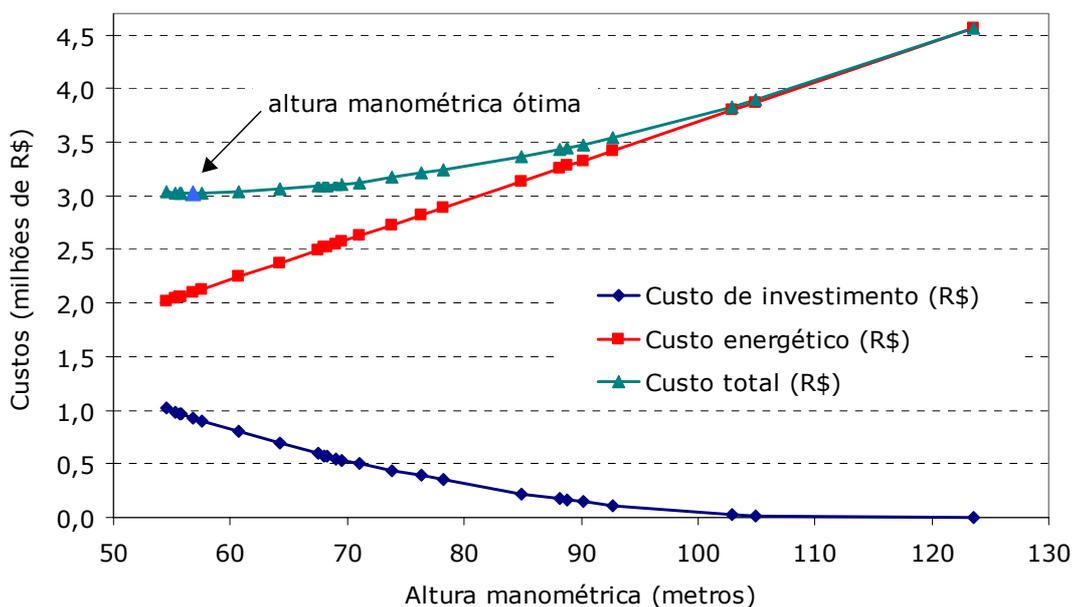


Figura 4.8 - Custos do projeto de reabilitação (investimento e operação) em função da altura manométrica

De acordo com os resultados obtidos pelo método (tabela 4.29), a melhor solução obtida (custo mínimo), proporcionada pelas substituições das tubulações antigas por novas, foi igual a R\$ 923.472,86; calculado com base nos preços constantes da tabela 4.20. O custo energético capitalizado para uma vida útil de 15 anos é de R\$ 2.097.321,81 (custo total do projeto de R\$ 3.020.794,67).

Para a construção da tabela 4.31 e a figura 4.8 foram calculados os valores dos custos até a 24ª iteração.

Tabela 4.31 - Custos de reabilitação (investimento mais operação) da rede de distribuição em função da altura manométrica para um horizonte de 15 anos

Iteração	Altura manométrica (m)	Custo de investimento (R\$)	Custo energético (R\$)	Custo total do projeto (R\$)
solução inicial	123,53	0,00	4.560.502,78	4.560.502,78
1	104,89	19.465,66	3.872.347,90	3.891.813,56
2	102,92	32.780,45	3.799.619,09	3.832.399,54
3	92,74	113.162,47	3.423.792,01	3.536.954,48
4	90,17	145.147,10	3.328.912,29	3.474.059,39
5	88,84	163.817,57	3.279.811,11	3.443.628,68
6	88,21	172.885,76	3.256.552,66	3.429.438,42
7	84,91	222.702,05	3.134.722,66	3.357.424,71
8	78,21	348.561,97	2.887.370,86	3.235.932,83
9	76,37	391.620,01	2.819.441,41	3.211.061,41
10	73,78	442.444,29	2.723.823,32	3.166.267,61
11	71,03	498.889,39	2.622.298,33	3.121.187,71
12	69,54	536.364,08	2.567.290,24	3.103.654,32
13	69,04	550.249,81	2.548.831,15	3.099.080,96
14	68,27	572.002,16	2.520.404,15	3.092.406,31
15	68,06	577.852,32	2.512.651,33	3.090.503,65
16	67,50	594.113,35	2.491.977,15	3.086.090,50
17	64,18	691.868,83	2.369.408,79	3.061.277,62
18	60,70	798.474,23	2.240.933,53	3.039.407,75
19	57,50	898.708,40	2.122.795,35	3.021.503,75
20	56,81	923.472,86	2.097.321,81	3.020.794,67
21	55,76	966.505,64	2.058.668,47	3.025.174,11
22	55,64	971.703,78	2.054.107,62	3.025.811,40
23	55,32	985.876,12	2.042.245,88	3.028.121,99
24	54,51	1.026.038,92	2.012.475,54	3.038.514,46

Deve-se salientar, que o projeto de reabilitação também depende do contexto em que o sistema está inserido, envolvendo critérios não só de natureza técnica, mas também de natureza ambiental, política e econômica. Podendo estes aspectos serem considerados através da aplicação de pesos aos valores dos custos adotados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A reabilitação dos sistemas de distribuição de água foi executada durante décadas, e, continua sendo, por muitos projetistas, através do método de tentativa e erro, com o auxílio de simuladores (EPANET, WATERCAD, dentre outros). Os quais consideram somente o equilíbrio hidráulico das redes, desconsiderando a busca de soluções mais econômicas. Nas últimas décadas, surgiram métodos para a reabilitação das redes, baseados em técnicas de otimização, visando a minimização dos custos das intervenções físicas e maximização dos benefícios, considerando variáveis como: confiabilidade, benefícios, custos, dentre outros. No entanto, na maioria dos métodos, o custo ótimo do sistema de distribuição é definido sem considerar as despesas com energia elétrica gasta pelas estações de bombeamento.

Nesta pesquisa, os custos com a operação foram um fator determinante para a tomada de decisão. A eficiência da energia elétrica foi analisada com a devida prioridade, o que gera para os agentes envolvidos, uma maior disponibilidade de recursos para expansão dos sistemas, aumento da disponibilidade de investimentos, maiores lucros, etc.

Neste trabalho foram desenvolvidos estudos sobre a reabilitação de sistemas de distribuição de água, tendo chegado às conclusões citadas a seguir:

A substituição de tubulações é inevitável quando as tubulações apresentam um grande número de rompimentos, nível de deterioração alto ou capacidade de transporte inferior à requerida; não podendo em muitos casos, ser desprezada. É importante frisamos, que esta opção também pode ser aplicada por técnicas não-destrutivas (Método *Brusting*).

É importante, para qualquer que seja a metodologia empregada na análise da reabilitação dos sistemas, a elaboração de um diagnóstico que apresente as características físicas e hidráulicas mais próximas da realidade do sistema. Os resultados do método proposto, assim como os demais, vão depender dos dados de entrada.

O emprego do método à rede exemplo de ALPEROVITZ & SHAMIR (1977) modificada, mostrou que a aplicação a redes malhadas seccionadas apresentou resultados satisfatórios, isso foi comprovado, quando se verificou que os valores encontrados ao término do processo de reabilitação, com a rede ramificada, apresentou as vazões e pressões nos pontos de consumo iguais aos encontrados com a rede em seu traçado original (traçado da rede em forma de anéis). Além de o exemplo demonstrar a inserção de outras opções de reabilitação, fora à alternativa de substituição das tubulações por novas, na tomada de decisão do método.

O processo de análise da reabilitação do Setor 11 do Perímetro Senador Nilo Coelho apresentou altos custos envolvidos, quando se obtém, para a solução inicial - solução de reabilitação considerando apenas o aumento da altura manométrica - um custo total (operação mais investimento) de R\$ 4.560.502,78, o que representa um acréscimo de mais de 50% no valor ótimo do custo total (R\$ 3.020.794,67). Indicando a importância da aplicação da metodologia proposta.

É imprescindível a análise econômica de reabilitação por meio da otimização dos custos envolvidos, de forma a proporcionar ao decisor (tomador de decisão), eficientemente, qual altura manométrica de bombeamento adotar e quais trechos intervir na rede de distribuição. O Método Granados adaptado para ser utilizado como ferramenta de *Reabilitação* de sistemas, conforme o objetivo principal dessa dissertação, mostrou-se bastante eficaz.

Em complemento a este estudo, podem ser feitas as seguintes recomendações:

- realização de um estudo aprofundado sobre a determinação dos efeitos das incrustações, por ser um dos problemas mais comuns nas redes atuais, e por estarem relacionados diretamente com a redução dos diâmetros, que ocasionam aumento nas perdas de carga e redução na capacidade de transporte da água nas tubulações;

- inclusão de outros objetivos, como a maximização da confiabilidade, benefícios, resiliência; minimização de vazamentos, etc;
- analisar a reabilitação dos sistemas de distribuição de água de maneira dinâmica (considerando as variações das características do sistema ao longo do tempo e/ou proporcionando soluções paulatinas); e
- adaptar o método proposto para aplicação direta em sistemas com múltiplas fontes de alimentação.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALENCAR NETO, M. F. *Otimização de redes de abastecimento de água através de algoritmos genéticos*. 2003. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.
- ALLIANCE - Aliança para Conservação de Energia. *Água e Energia: Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais*. PROCEL/ELETRONAS. Washington, EUA, 159 p, 2002.
- ALPEROVITS, E. e SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*. v. 13, n. 6, p. 885-900, 1977.
- ANEEL - *Agência Nacional de Energia Elétrica*. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2004.
- BARROSO, L. B. e GASTALDINI, M. C. C. Calibração do modelo EPANET 2.0 para simulação das vazões e pressões em redes de distribuição. In: XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica, 2004. *Anais...* São Pedro: UNICAMP, L246. 2004. 1 CD-ROM.
- BRAILEY, D., JACOBS, A. Energy management in the waterworks Industry. *J. N. Eng. Water Works Association*. v. 94, n. 3, p. 216-226, 1980.
- BHAVE, P. R. Calibrating water distribution network models. *Journal of Environmental Engineering Division*, v. 114, n. 1, p. 120-136, 1988.
- BRASIL. *Relatório de Gestão 2002*: Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba. Brasília: CODEVASF, Área de Planejamento. Coordenadoria de Acompanhamento e Avaliação, 2003, 78 p. Disponível em <http://www.codevasf.gov.br/menu/contas/Relatorio_de_Gestao_2002.pdf>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2004.

BRASIL. Secretaria de Acompanhamento Econômico do Ministério da Fazenda - SEAE. *Relatório de Atividades de 1997, 1998*. Disponível em <<http://www.fazenda.gov.br/seae/relatorio/Relatorio97c.html>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2004.

CAGEPA - Companhia de Água e Esgoto da Paraíba. *Relatório Técnico*. João Pessoa, 2004.

CELPE - *Companhia de Eletricidade de Pernambuco*. Disponível em <<http://www.celpe.com.br/ORIENTACAO%20AO%20CLIENTE/BAIXA%20TENSAO/TARIFAS/37735%3B57839%3B110214%3B0%3B0.asp?c=17#a5>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2004.

CHEUNG, P. B. *Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo*. 2004. 268 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CUNHA, M. C. e SOUSA, J. Water distribution networks design optimization: simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning e Management*, New York: ASCE, p. 215-221, jul/aug 1999.

DANDY, G. C. e ENGELHARDT, M. O. Optimum rehabilitation of water distribution system considering cost e reliability. In: World Water e Environmental Resources Congress, 2001. *Proceedings...* Orlando, Florida: ASCE, 2004. Disponível em <<http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=ASCECP000111040569000399000001&idtype=cvips>>. Acesso em: 8 de novembro de 2004.

FERREIRA, P. A. e QUINTELA, J. P. Reabilitação de dutos corroídos, com revestimento interno - solução ou problema? In: XXIII Congresso Brasileiro de Corrosão, 2003. *Anais...* Florianópolis, 2003. Disponível em <<http://www.abraco.org.br/23sduto.htm>>. Acesso em 14 de janeiro de 2005.

FUNASA. *Portaria n° 1.469/2000*, de 29 de dezembro de 2000: Aprova o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: FUNASA. 2001. Disponível em <http://dtr2001.saude.gov.br/svs/pub/pdfs/portaria_1469.pdf>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2005.

GESSLER, J. Pipe network optimization, e machine learning, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1985.

GOMES, H. P. Análise do desempenho hidro-agrícola do Perímetro de Irrigação Nilo Coelho. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 6, n. 2, p.119-127, Porto Alegre: ABRH, 2001.

GOMES, H. P. *Desempenho hidráulico da irrigação do Setor 11 do Perímetro Senador Nilo Coelho*: Diagnóstico e soluções. Relatório Técnico Conclusivo. Campina Grande, 1997.

GOMES, H. P. *Sistema de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias*. 242 p. Editora Universitária da UFPB, João Pessoa, 2004.

GÓMEZ, R; SALAS, D. E. e SALDARRIAGA, J. G. Calibración de redes de distribución de agua potable con lógica difusa. In: XXI Congreso Latino Americano de Hidráulica, 2004. *Anais...* São Pedro: UNICAMP, L021. 2004. 1 CD-ROM.

GOUTER, I. C; LUSSIER, B. M.; MORGAN, D. R. Implications of head loss path choice in optimization of water distribution networks. *Water Resources Research*, New York, NY, USA: ASCE, v. 22, n. 5, p. 819-822, 1986.

GRANADOS, A. *Infraestructuras de regadíos: redes colectivas de riego a presión*. Madrid: Servicio de Publicación de E.T.S.I. de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid, Espanha, 1986.

HALHAL, D.; WALTERS, G. A.; OUZAR, F. e SAVIC, D. A. et al. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning e Management*, New York: ASCE, v. 123, n. 3, p. 137-146, 1996.

HARRIS, R. U. Computer modeling in water system planning e design. *Journal of the American Water Works Association*, p. 78-81, 1984.

JIMÉNEZ, P. A. L.; SOLANO, F. J. M.; IGLESIAS, P. L. e MIQUEL, V. F. *Calibración del modelo hidráulico de una red. Aplicación práctica*. In: III SEREA - Seminario Hispano-Brasileño sobre Planificación, Proyecto y Operación de Redes de Abastecimiento de Agua. 2004. *Anais...* Valencia - Espanha: UPV, 2004, 1 CD-ROM.

KIM, J. H. e MAYS, L. W. Rehabilitation e replacement of water distribution system components considering uncertainties. *Stochastic Hydrology e Hydraulics*, Springer Verlag, p. 277-249, 1990.

KLEINER, Y.; ADAMS, B. J. e ROGERS, J. S. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, n. 3, p. 131-150, 1998.

LE GAT, Y. e EINSENBEIS, P. Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban Water*, v. 2, p. 173-181, 2000.

LI, D. e HAIMES, Y. Optimal maintenance-related decision making for deteriorating Water Distribution System. *Water Resources Research*, v. 28, n. 4, p. 1053-1061, 1992.

MAIA, F. C. Some regulatory tools to deal with competition in the Brazilian electricity sector. In: The Institute of Brazilian Business & Public Management Issues. The George Washington University, 1999. Disponível em <<http://www.gwu.edu/~ibi/minerva/Fall1999/Maia.Fernando.pdf>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2004.

MARILES, O. A. F, PLASCENCIA, I. L. A. R. e CRUZ, F. L. C. Metodología para rehabilitar redes de distribución de agua potable. In: XXI Congreso Latino Americano de Hidráulica, 2004. *Anais...* São Pedro: UNICAMP, L246. 2004. 1 CD-ROM.

MAYS, L. W. *Water distribution systems handbrook* - Ed. McGraw Hill, USA, 2000 (apud SOBRINHO e MARTINS, 2004).

MICHALIK, P. Status e Rehabilitation of the Distribution Network in Dresden, *Water Supply*, v. 12, n. 3/4, Zurich, p. 81-87, 1994.

MURPHY, L. J. e SIMPSON, A. R. Pipe optimization using genetic algorithms. Res. Rep. N. R93, Department of Civil Engineering, University of Adelaide, Adelaide, Australia, 1992 (apud CHEUNG, 2004).

PEZESHK, S. e HELWEG, O. J. Adaptive Search Optimization in Reducing Pump operating Cost. *Journal of Water Resources Planning e Management*, New York: ASCE, v. 122, n. 1, p. 57-63, 1996.

RAJANI, B. e KLEINER, Y. Comprehensive review of structural deteriorations of water mains: statistical models. *Urban Water*, p. 151-164, 2001.

RIGHETTO, A. M. Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 3, p. 33-44, 2001.

ROSSMAN, L. A. *EPANET 2 users manual*. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2000.

ROSSMAN, L. A. *EPANET users manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1994.

SAMUEL, P. R. S.; FRAGA, A. S. e NASCIMENTO, L. F. Efeitos da substituição de redes sobre as perdas d'água no Distrito Pitométrico de Ipanema. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES, II-007. 2000. Disponível na <http://www.ciplima.org.pe/sanitaria/xxvii_con/tema02/ii-007.pdf>. Acesso em: 21 de dezembro de 2004.

SÁNCHEZ J. e FUENTES O. Actualización de un método para calcular redes de tuberías funcionando a presión en régimen permanente, *Revista de Ingeniería*, v. LXI, México, 1991.

SANDIM, M. P. et al. 2002. Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água de Campo Grande (2000 - 2030). 1 CD-ROM.

SANTOS, M. C. C. Simulação de cenários de operação de sistemas de distribuição de água através do método PNL2000. 2002. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

SAVIC, D. A e WALTERS, G. A genetic algorithms for least-cost design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning e Management*, New York: ASCE, v. 125, n. 2, p. 67-77, 1997.

SHAMIR, U. e HOWARD, C. D. D. An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Journal of the American Water Works Association*, p. 248-258, 1979.

SILVA, F. G. B. *Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos*. 2003. 234 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003a.

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R. e SOARES, A. K. Calibração de rede de distribuição de água considerando as perdas por vazamentos explicitamente no modelo com o uso de

algoritmos genéticos - Aplicação para a rede da cidade de São Carlos. In: SEREA - Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. 2002. *Anais...* João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2002, 1 CD-ROM.

SILVA, J. G. da. *Otimização de sistemas de abastecimento de água considerando variáveis as condições de contorno do projeto*. 2003. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2003b.

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

SKEAT, W. O. Manual of British water engineering practice. *Cambridge: Institution of Water Engineers by W. Heffer*, 1961 (apud CHEUNG, 2004).

SOARES, A. K. *Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão*. 2003. 152 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2003.

SOBRINHO, P. A. e MARTINS, G. Abastecimento de água. In: TSUTIYA, M. T. (Coord.) *Abastecimento de água*. São Paulo: USP, 2004.

SWAMEE, P. K. e SHARMA, A. K. Reorganization of water distribution system. *Journal of Environmental Engineering*, v. 116, n. 3, 1990.

TODINI, E. e PILATI, S. *A Gradient algorithm for the analysis of pipe networks*. In: COULBECK, B.; ORR, C. H. (Eds.): *Computer Applications in Water Supply - System Analysis e Simulation*, v. 1, p. 1-20, 1988.

TSUTIYA, M. T. *Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água*. 1ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, 185 p.

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

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A. e TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285, 1999.

VENTURINI, M. A. G. e BARBOSA, P. S. F. Subsídios à escolha de técnicas de reabilitação de redes de distribuição de água. In: SEREA - Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. 2002. *Anais...* João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2002, 1 CD-ROM.

VENTURINI, M. A. A. G.; BARBOSA, P. S. F. e LUVIZOTTO Jr. E. Estudo de Alternativas de Reabilitação para Sistemas de Abastecimento de Água. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, *Anais...* Aracajú: ABRH, 2001, 1 CD-ROM

VÍTOVSKÝ, J. e SIMPSON, A. Leak detection e calibration using transients e genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning e Management*, New York: ASCE, v. 126, n. 4, p. 262-265, 2000.

WALSKI, T. M. e PELLICCIA, A. Economic analysis of water main breaks. *Journal of the American Water Works Association*, p. 140-147, 1982.

WALSKI, T. M. Making Water System Rehabilitation Decisions” *Water Forum '86'*, New York: ASCE, p. 467-474, 1986 (apud VENTURINI et al., 2001).

WALSKI, T. M. Technique for calibrating network models. *Journal of Resources Planning e Management*, New York: ASCE, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.

WALTER, G. A.; HALHAL, D.; SAVIC, D. A. e OUZAR, D. Improved design of any town distribution network using structured messy genetic algorithms. *Urban Water*, v. 1, p. 23-28, 1999.