

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE E DECISÃO
MULTICRITERIAL PARA A REABILITAÇÃO DE
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Maria Alice Amado Gouveia Venturini

Campinas
Dezembro /2003

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**METODOLOGIA DE ANÁLISE E DECISÃO
MULTICRITERIAL PARA A REABILITAÇÃO DE
SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Doutoranda: MSc. Maria Alice Amado Gouveia Venturini

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa

Tese de Doutorado apresentada à
Faculdade de Engenharia Civil da
UNICAMP, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de Doutor
em Engenharia Civil, Área de
Concentração Recursos Hídricos

Campinas
Dezembro /2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V568m Venturini, Maria Alice Amado Gouveia
Metodologia de análise e decisão multicriterial para a
reabilitação de sistemas de abastecimento de água. /
Maria Alice amado Gouveia Venturini.--Campinas, SP:
[s.n.], 2003.

Orientador: Paulo Sérgio Franco Barbosa
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Abastecimento de água. 2. Engenharia de
abastecimento de água. 3. Engenharia hidráulica. 4.
Processo decisório por critério múltiplo. I. Barbosa,
Paulo Sérgio Franco. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Analysis methodology and multicriterial decision for water supply
systems

Palavras-chave em Inglês: Water supply networks rehabilitation, Hidraulic networks,
Multicriterial analysis, Hydraulics engineering

Área de concentração: Recursos Hídricos

Titulação: Doutora em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Geraldo Pena de Andrade, Ricardo de Lima Isaac, Kamel
Zahed Filho, Arisvaldo Vieira Mello Júnior

Data da defesa: 15/12/2003

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

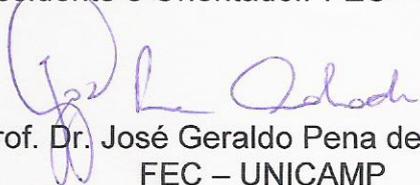
Metodologia de Análise e Decisão Multicriterial para a Reabilitação de
Sistemas de Abastecimento de Água

Maria Alice Amado Gouveia Venturini

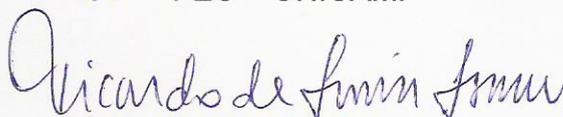
Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



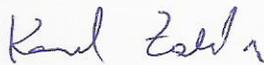
Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa
Presidente e Orientador/ FEC - UNICAMP



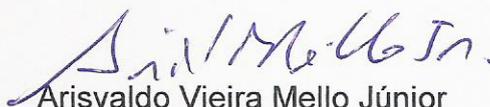
Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
FEC – UNICAMP



Prof. Dr. Ricardo de Lima Isaac
FEC – UNICAMP



Kamel Zahed Filho
EPUSP



Arisvaldo Vieira Mello Júnior
LabSid - EPUSP

Campinas, 15 de dezembro de 2003.

VENTURINI, M. A. A. G. Metodologia de Análise e Decisão Multicriterial para a Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas, 260p. Campinas. Dezembro. 2003.

Resumo

O abastecimento de água é um fator de extrema importância para o bem estar da sociedade. Muitos sistemas de abastecimento de água vêm apresentando deficiências operacionais, seja pelo elevado incremento na demanda nos últimos anos ou pela falta de manutenção adequada. O aumento da frequência de interrupções no fornecimento de água tem sido comum, gerando a insatisfação de seus usuários. Altos investimentos são necessários para a reabilitação dos sistemas de abastecimento de água existentes, visando assegurar níveis operacionais adequados, mas as empresas têm recursos financeiros limitados. Justifica-se, deste modo, o desenvolvimento de novas metodologias que visem a reabilitação destes sistemas buscando o funcionamento adequado dos mesmos, dentro de padrões técnicos satisfatórios com custos aceitáveis. Neste contexto, a metodologia proposta almeja estudar alternativas de reabilitação em sistemas existentes, tendo como suporte um simulador de redes de abastecimento (SPERTS). Para considerar os múltiplos aspectos na tomada de decisão sobre as possíveis soluções de reabilitação a adotar utiliza-se a análise multicriterial que então, fornece uma hierarquia das alternativas encontradas em cada caso.

Palavra Chave: Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água, Redes Hidráulicas, Análise Multicriterial, Engenharia Hidráulica.

Abstract

Water supply is extremely important for the welfare state of society. Many water supply systems have presented operational deficiency due to high increase on the demand or lack of adequate maintenance. The increase of on frequency of the interruption on the water supply has been usual, thus not fulfilling customer expectations for the consumers. High investments are needed to rehabilitate the existing water supply systems aiming at ensuring adequate operational levels. This situation highlights the importance of the development of new methodologies aiming at the rehabilitation of these systems for an adequate operation, within satisfactory technical standard and acceptable costs. Thus, the proposed methodology aims to study rehabilitation alternatives in existing water systems, taking as support a water supply network simulator (SPERTS). In order to consider the multiple aspects on the decision making process about the possible rehabilitation solutions, a multicriterial analysis is used thus, providing an hierarchy of the alternatives found in each case.

Key Words: Water Supply Networks Rehabilitation, Hydraulic Networks, Multicriterial Analysis, Hydraulic Engineering

Sumário

Resumo	v
Abstract	vii
Sumário	ix
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas.....	xix
Lista de Abreviaturas	xxiii
Dedicatória.....	xxv
Agradecimentos.....	xxvii
1. Introdução	01
2. A Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água e os Recursos Hídricos	05
2.1. A Limitação Quantitativa dos Recursos Hídricos e a Reabilitação	05
2.1.1. Deterioração dos Recursos Hídricos	07
2.2. A Política Pública dos Recursos Hídricos	09
2.3. A Limitação de Energia	12
2.4. Saneamento no Brasil	14
2.4.1. Situação das Empresas Brasileiras de Saneamento	15

2.4.2.	Dificuldades na Obtenção de Financiamento	18
3.	Componentes dos Sistemas de Abastecimento de Água, Reabilitação e Gestão	21
3.1.	Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água	21
3.1.1.	As Deficiências dos Sistemas de Abastecimento de Água	24
3.1.1.1.	Problemas na Captação	26
3.1.1.2.	Problemas na Estação de Tratamento	26
3.1.1.3.	Problemas na Estação de Bombeamento	27
3.1.1.4.	Problemas com os Reservatórios	28
3.1.1.5.	Problemas com Adutoras	29
3.1.2.	Elementos de Controle nos Sistemas de Distribuição de Água	29
3.1.2.1.	Bombas	30
3.1.2.2.	Válvulas de Controle Automático	30
3.1.2.3.	Válvulas de Bloqueio – Registros.....	35
3.2.	Recursos e Ações de Gestão dos Sistemas de Abastecimento de Água	36
3.2.1.	Conhecimento do Sistema	37
3.2.1.1.	Micro e Macromedição	38
3.2.1.2.	Pitometria	39
3.2.1.3.	Cadastro Técnico da Rede e Demais Componentes	39
3.2.1.4.	Cadastro dos Consumidores	40
3.2.1.5.	Recursos Humanos	41
3.2.2.	Estudos das Perdas	42
3.2.2.1.	O Combate às Perdas	44
3.2.2.2.	Automação dos Sistemas	49
3.2.2.3.	Setorização do Sistema de Distribuição	51
3.2.2.4.	Sistema de Informação Geográfica	52
3.3.	Potencial de Melhoria dos Sistemas de Abastecimento	54
3.3.1.	Estação de Tratamento	55
3.3.2.	Estação de Bombeamento	57

3.3.3.	Reservatórios	59
4.	Reabilitação do Sistema de Distribuição	63
4.1	Técnicas de Reabilitação de Tubulações	66
4.1.1.	Métodos de Limpeza das Tubulações	66
4.1.1.1.	Limpeza a Hidrojato	66
4.1.1.2.	Raspadores Elétricos	67
4.1.1.3.	Raspador Hidráulico	68
4.1.1.4.	Método “Drag”	69
4.1.1.5.	Método “Scraper”	70
4.1.1.6.	Power Boring	70
4.1.1.7.	Método “Pig”	71
4.1.2.	Métodos Não Destrutivos	75
4.1.2.1.	Revestimento de Argamassa de Cimento	75
4.1.2.2.	Revestimento com Argamassa Acrílica	86
4.1.2.3.1.	Revestimento de Resina Epóxi	91
4.1.2.3.2.	Processo A. S.	94
4.1.2.4.	Método “Pipebrusting”	98
4.1.2.5.	Método da Perfuratriz Direcional	103
4.1.2.6.1.	Método da Cura no Local – (Cured in Place: CIPP)	105
4.1.2.6.2.	Método da Cura no Local – Sliplining Seccionado	108
4.1.2.6.3.	Método da Cura no Local – Sliplining	110
4.1.2.7.	Método de “Woven Hose”	112
4.1.2.8.	Sistemas de Roletes	113
4.1.3.	Métodos Destrutivos	116
4.1.3.1.	Substituição	116
4.1.3.2.	Instalação de Redes Paralelas	117
4.1.4.	Métodos Alternativos	118
4.2.	A Corrosão e as Necessidades de Proteção e Reabilitação	119
4.2.1.	Reabilitação Química	122
4.2.2.	Revestimento Interno	125

4.2.3.	Revestimento Externo	126
4.2.4.	Proteção Catódica	128
4.2.5.	Proteção Anódica	129
4.2.6.	O Emprego de Técnicas de Reabilitação no Combate à Corrosão	129
4.3.	Investimentos e Reabilitação dos Sistemas	130
4.3.1.	A Importância da Manutenção Adequada	131
4.4.	Tubulações de Pequenos Diâmetros – Ramais de Entrada	134
4.5.	Materiais das Tubulações	138
5.	O Uso de Modelos Matemáticos no Planejamento da Reabilitação	141
5.1.	Técnicas de Otimização	142
5.2.	O Emprego da Otimização e Simulação	145
5.2.1.	Modelos Matemáticos Aplicados aos Sistemas de Abastecimento	147
5.2.1.1.	Combate à Redução das Perdas	148
5.2.1.2.	Minimização do Custo Operacional	149
5.2.1.3.	Reabilitação dos Sistemas	151
5.3.	Otimização Multiobjetivo ou Multicritério	152
5.3.1.	Diferentes Escolas de Análise Multicriterial	155
5.3.2.	Classificação das Técnicas Multiobjetivo ou Multicritério.....	157
5.3.2.1.	Técnicas de Geração de Soluções Não-Dominadas.....	157
5.3.2.2.	Técnica com Articulação de Preferência Prévia	158
5.3.2.3.	Técnica com Articulação Progressiva de Preferência	159
5.4.	Conceitos e Definições Gerais	160
5.5.	Métodos Multicriteriais	162
5.5.1.	Programação de Compromisso	162
5.5.2.	Método ELECTRE	166
5.5.3.	Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)	170
5.5.3.1.	Modelo VIP	171
5.5.4.	Método Analítico Hierárquico (AHP)	176
5.5.4.1.	Modelo Expert Choice (EC)	177
5.6.	Análise de Sensibilidade	180

6.	Metodologia e Aplicações	183
6.1.	Estudo de Caso	186
6.1.1.	Aplicação do Modelo SPERTS	188
6.1.1.1.	Mudança na Curva de Demanda	202
6.1.2.	Aplicação dos Modelos Multicriteriais	206
6.1.2.1.	Resultados Obtidos	208
6.2.	Alternativas de Reabilitação versus Critério Custo Direto	225
6.2.1	Análise dos Resultados	228
6.2.2.	Análise do Perfil dos Decisores	231
6.2.2.1.	Conclusão sobre o Julgamento dos Decisores	231
7.	Conclusões	237
8.	Referências Bibliográficas	241
	Anexos	253

Lista de Figuras

Figura 2.1:	Problemática dos recursos hídricos	08
Figura 3.1:	Representação dos elementos dos sistemas de abastecimento de água	22
Figura 3.2:	Presença de “pittings” dentro da carcaça da válvula	34
Figura 3.3:	Desgaste na mola da válvula	35
Figura 3.4:	Aplicação de resina em trinca de reservatório	60
Figura 4.1:	Raspador hidráulico	68
Figura 4.2:	Raspador	69
Figura 4.3:	Scraper	70
Figura 4.4:	Modelos de “Pigs”	72
Figura 4.5:	Variação do Coeficiente de Hazen-Willians	73
Figura 4.6:	Aplicação de argamassa de cimento em tubulações de pequenos diâmetros	77
Figura 4.7:	Alisamento da argamassa com pás rotativas	77
Figura 4.8:	Aplicação de argamassa de cimento em tubulações de grandes diâmetros	78
Figura 4.9:	Poço de acesso	81

Figura 4.10: Tubulação reabilitada com argamassa de cimento	83
Figura 4.11: Estratificador	87
Figura 4.12: Anéis de borrachas.....	87
Figura 4.13 Caminhão tracionador	88
Figura 4.14: Os detritos retirados	88
Figura 4.15: Cabeça do aplicador	88
Figura 4.16: Tubulação revestida	88
Figura 4.17: Resíduo da limpeza do ramal	90
Figura 4.18: Máquina de revestimento de resina epóxi	92
Figura 4.19: Tubulação de PEAD	93
Figura 4.20: Detalhe de engate na rede	93
Figura 4.21: Esquema do Processo A. S.	95
Figura 4.22: Tubulação incrustada	96
Figura 4.23: Peça do vareteador	96
Figura 4.24: Abrasivos	96
Figura 4.25: Equipamento de limpeza	96
Figura 4.26: Esquema do método de “Pipebrusting”	99
Figura 4.27: Detalhe inicial	100
Figura 4.28: Inserção do PEAD	100
Figura 4.29: Pedacos de tubulação	101
Figura 4.30: Processo de eletro-fusão	101
Figura 4.31: Transtorno mínimo	103
Figura 4.32: Foto da perfuratriz direcional	104
Figura 4.33: Coluna de inversão	107
Figura 4.34: Processo de inversão	107
Figura 4.35: Esquema do método “Sliplining Seccionado”	109
Figura 4.36: Esquema do método “Sliplining”	110
Figura 4.37: Testemunha utilizada	123
Figura 4.38: Interior da testemunha antes e depois da aplicação do ortopolifosfato	123
Figura 4.39: Tubulação com presença de tubérculos	125

Figura 5.1:	Matriz de entrada do modelo VIP	174
Figura 5.2:	Resultado gráfico da hierarquização das alternativas	175
Figura 5.3:	Estruturação hierárquica do modelo	179
Figura 5.4:	Ilustração do nível hierárquico do modelo	179
Figura 5.5:	Ilustração dos resumos fornecidos pelo Expert Choice	180
Figura 6.1:	Diagrama Esquemático da metodologia	185
Figura 6.2:	Rede hipotética	187
Figura 6.3:	Operação dos reservatórios 1 e 3	188
Figura 6.4:	Perfil da curva de demanda	190
Figura 6.5:	Simulação da rede hipotética	192
Figura 6.6:	Trechos de tubulações a serem substituídas	193
Figura 6.7:	Trechos de tubulações a serem limpos	195
Figura 6.8:	Trecho da rede a ser reabilitada	197
Figura 6.9:	Fechamento de anéis da rede	199
Figura 6.10:	Comportamento das pressões nos nós para as alternativas propostas.	200
Figura 6.11:	Pressão (mca) nos nós – acréscimo de demanda	206
Figura 6.12:	Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “consumidores”	209
Figura 6.13:	Hierarquização do modelo VIP para a categoria “consumidores”	210
Figura 6.14:	Hierarquização do método CP para a categoria “consumidores”	211
Figura 6.15:	Hierarquização do modelo EC para a categoria “consumidores”	212
Figura 6.16:	Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “acadêmicos e especialistas”	213
Figura 6.17:	Hierarquização do modelo VIP para a categoria “acadêmicos e especialistas”	214
Figura 6.18:	Hierarquização do método CP para a categoria “acadêmicos e especialistas”	215
Figura 6.19:	Hierarquização do modelo EC para a categoria “acadêmicos e especialistas”	216
Figura 6.20:	Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “empresas de saneamento”	217

Figura 6.21: Hierarquização do modelo VIP para a categoria “empresas de saneamento”.....	218
Figura 6.22: Hierarquização do método CP para a categoria “empresas de saneamento”.....	219
Figura 6.23: Hierarquização do modelo EC para a categoria “empresas de saneamento”	220
Figura 6.24: Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “empresas prestadoras de serviços	221
Figura 6.25: Hierarquização do modelo VIP para a categoria “empresas prestadoras de serviços	222
Figura 6.26: Hierarquização do método CP para a categoria “empresas prestadoras de serviço	222
Figura 6.27: Hierarquização do modelo EC para a categoria “empresas prestadoras de serviços”	223
Figura 6.28: Análise de custo das alternativas propostas	229

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Comparação entre os serviços prestados pelas empresas de saneamento	17
Tabela 3.1: Fatores e perdas nas unidades do sistema de abastecimento de água	48
Tabela 4.1: Limpeza através de pigs	74
Tabela 4.2: Limpeza através de limpador hidráulico	74
Tabela 4.3: Espessura do revestimento com argamassa de cimento	83
Tabela 4.4: Aplicações do método de revestimento com argamassa de cimento	85
Tabela 4.5: Obras executadas com revestimento de argamassa de cimento	86
Tabela 4.6: Obras executadas pelo processo de revestimento com argamassa acrílica	91
Tabela 4.7: Obras executadas pelo processo de revestimento de epóxi	94
Tabela 4.8: Obras executadas com revestimento de epóxi	98
Tabela 4.9 Obras executadas através do método “Pipebrusting”	101
Tabela 4.10: Resumo dos fatores controláveis na reabilitação de sistemas de água	114

Tabela 4.11: Resumo dos fatores não controláveis na reabilitação de sistemas de água	115
Tabela 4.12: Comentários das técnicas empregadas na reabilitação dos ramais	137
Tabela 4.13: Os principais tipos de tubulações empregadas no abastecimento de água	140
Tabela 6.1: Características da rede hipotética	189
Tabela 6.2: Perfil dos nós da rede de distribuição	190
Tabela 6.3: Nós com deficiência de pressão (mca).....	191
Tabela 6.4: Trechos de tubulações a serem substituídas	194
Tabela 6.5: Pressão nos nós deficientes após a substituição	194
Tabela 6.6: Trechos das tubulações a serem limpas	195
Tabela 6.7: Pressão nos nós deficientes após a limpeza	196
Tabela 6.8: Trecho da tubulação reabilitada	197
Tabela 6.9: Pressão nos nós deficientes após a reabilitação das tubulações	198
Tabela 6.10: Fechamento de anéis na rede.....	199
Tabela 6.11: Pressão nos nós após o fechamento da malha	200
Tabela 6.12: Acréscimo da demanda nos nós	202
Tabela 6.13: Pressões (mca) para os nós deficientes – Substituição	203
Tabela 6.14: Pressões (mca) para os nós deficientes – Limpeza	203
Tabela 6.15: Pressões (mca) para os nós deficientes – Reabilitação	204
Tabela 6.16: Pressões (mca) para os nós deficientes – Fechamento da malha	205
Tabela 6.17: Matriz “PayOff”	208
Tabela 6.18: Resultados da aplicação do método ELECTRE II	209
Tabela 6.19: Resultados da aplicação do modelo VIP.....	210
Tabela 6.20: Resultados da aplicação do método CP.....	211
Tabela 6.21: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice	212
Tabela 6.22: Resultados da aplicação do método ELECTRE II	213
Tabela 6.23: Resultados da aplicação do modelo VIP.....	214
Tabela 6.24: Resultados da aplicação do método CP.....	215
Tabela 6.25: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice	216
Tabela 6.26: Resultados da aplicação do método ELECTRE II	217

Tabela 6.27: Resultados da aplicação do método VIP.....	218
Tabela 6.28: Resultados da aplicação do método CP.....	219
Tabela 6.29: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice	220
Tabela 6.30: Resultados da aplicação do método ELECTRE II	221
Tabela 6.31: Resultados da aplicação do modelo VIP.....	221
Tabela 6.32: Resultados da aplicação do método CP.....	222
Tabela 6.33: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice	223
Tabela 6.34: Classificação geral dos métodos multicriteriais	225
Tabela 6.35: Custo da substituição em ferro fundido	226
Tabela 6.36: Custo da substituição em PEAD	226
Tabela 6.37: Custo da limpeza nos trechos	227
Tabela 6.38: Custo da limpeza e revestimento	227
Tabela 6.39: Custo da colocação dos trechos em PEAD	228
Tabela 6.40: Pesos atribuídos X grau de importância	231
Tabela 6.41: Resumo do julgamento dos critérios pelos diferentes decisores	236

Lista de Abreviaturas

ANA	Agência Nacional de Águas
AHP	<u>A</u> nal <u>Y</u> tic <u>H</u> ierarcly <u>P</u> rocess
AWWA	American Water Works Association
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
DAEV	Departamento de Água e Esgoto de Valinhos
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgoto
EC	<u>E</u> xpert <u>C</u> hoice
ELECTRE	<u>E</u> limination and(et) <u>C</u> hoice <u>T</u> ranslating <u>R</u> eality
ETA	Estação de Tratamento de Água
ERCON	ERCON Engenharia Ltda
PMSS	Programa de Modernização do Setor de Saneamento
NIEDUNG	NIEDUNG do Brasil Ltda
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A
SANEAR	SANEAR Engenharia e Construção Ltda
SANIT	SANIT Engenharia e Serviços Ltda
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition

SEMASA	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SMSB	Secretaria Municipal de Saneamento Básico
SEDU – PR	Secretaria Estadual de Desenvolvimento Urbano – Presidência da República
VCA	Válvula de Controle Automática
VIP	<u>V</u> ariable <u>I</u> nterdependent <u>P</u> arameters

*Aos meus amores,
José Otávio e Jéssica*

Agradecimentos

Ao amigo e Professor Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa, por sua dedicação e clareza na orientação do trabalho e por se manter sempre pronto para dialogar, sugerir e nunca impor, proporcionando assim um clima cordial de estudo.

Ao Professor e amigo Kamel Zahed Filho, pelo desprendimento e companherismo demonstrado na forma de sugestões apresentadas para o aprimoramento desse trabalho.

Aos professores e aos funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, que me deram apoio durante o programa de pós-graduação e pela atenção e préstimos durante os anos de convivência.

As grandes amigas Solenge, Rose e Raquel, funcionárias da Biblioteca da Área de Engenharia Civil, pela orientação e préstimos.

Aos grandes amigos Alberto Francato, Wlamir Rodrigues, César Gumier, Lydiane Leal e Carla Silva pelo incentivo e ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao tio Lino por estar presente, principalmente, nas horas difíceis.

À minha família, pelo sentido da vida, embora em muitos momentos de trabalho, necessitei ausentar de nosso convívio.

À Fapesp pelo apoio financeiro.

À Deus por me ajudar a cumprir mais uma etapa.

1. Introdução

O progresso em geral e a preservação da saúde estão condicionados a um serviço eficiente de distribuição de água de boa qualidade. Quando uma população é mal servida de suprimento de água e coleta de esgoto, torna-se inevitável a tendência à estagnação ou ao retrocesso, caracterizando o Saneamento como insumo fundamental ao bem estar humano, em aglomerações urbanas ou rurais. No Brasil, a importância do setor tem sido amplamente debatida mais recentemente, especialmente após a divulgação dos dados do Censo 2000, em virtude dos números insatisfatórios quanto aos serviços de redes de abastecimento, coleta e tratamento de esgotos, dos altos índices de perdas no sistema e da maior conexão que hoje se faz entre o Saneamento e as questões ambientais.

Os números são contundentes e falam por si só, destacando-se, dentre outros, os seguintes aspectos apontados por NOVAES (2003): (a) das 27 companhias estaduais de saneamento, 9 têm perdas superiores a 50% e 3 apresentam valores próximos aos 70%, com base em estudo desenvolvido pela UFRJ onde aponta-se perda de 46% na água ou 5,8 bilhões de metros cúbicos anuais nas redes públicas do País; (b) o governo federal gastou em 2000 pelo menos R\$ 178 milhões em atendimento a doenças relacionadas com a água; (c) ocorre alta perversidade na distribuição do atendimento, pois apenas 68% das pessoas que recebem até dois

salários mínimos mensais têm abastecimento público de água e 41% dispõem de rede de esgotos, enquanto 99% são servidos de água e 81% por redes de esgotos entre os que ganham mais de dez salários mínimos e, (d) a crise no abastecimento de água é uma realidade, principalmente em regiões metropolitanas como as de São Paulo, Rio, Belo Horizonte, Recife, Salvador, Fortaleza, Belém, Curitiba, Porto Alegre, Florianópolis, Natal, Vitória, entorno de Brasília, Londrina, Maringá e Vale do Itajaí, entre outras.

Sob esse contexto de elevada complexidade, o atendimento das demandas, seja no Saneamento como em outros setores de infra-estrutura, tem sido feito através de uma lógica passiva (reforçada até pelas próprias políticas de financiamento) na qual prioriza-se a eficiência na fase da instalação da infra-estrutura e, dirigem-se menores esforços às fases da operação e manutenção. No entanto, com o passar dos anos, muitos sistemas de distribuição de água que não apresentavam problema algum na sua operação, começam a ter piores desempenhos em decorrência da deterioração de muitos de seus componentes. Perdas graduais na capacidade de adução e eventuais falhas nos sistemas de distribuição tornam-se ocorrências comuns, as quais se associam, em muitos casos, à superação dos limites de pressão na rede, tendo como consequência, alta taxa de rompimento de tubulações. A interrupção no fornecimento de água se torna comum, gerando a insatisfação dos usuários.

Reconhece-se que as empresas de saneamento, sejam públicas ou privadas, estão enfrentando novos desafios buscando atender a uma multiplicidade de aspectos no âmbito de gestão operacional dos sistemas. A qualidade do serviço de abastecimento de água é traduzida não apenas com base na confiabilidade do atendimento à demanda. Dentre outros fatores, é importante também considerar: (a) tarifa cobrada pelo serviço; (b) o grau de utilização e comprometimento dos recursos hídricos disponíveis, em termos quantitativos e qualitativos; (c) a sustentabilidade dos recursos e serviços, a médio e longo prazos; (d) a garantia do atendimento aos requisitos de pressão mínima e máxima na rede; (e) a operação com o mínimo de perdas. Fica evidente a necessidade de modernização do setor de abastecimento de

água diante da demanda imposta pela sociedade urbana, especialmente induzida pelos processos de crescente democratização e conscientização ecológica.

Nesse contexto de múltiplos fatores e necessidades de gestão, a autora dessa tese percebeu a oportunidade de desenvolver o trabalho de pesquisa abordando o tema da reabilitação de sistemas de abastecimento de água. A motivação decorreu de muitos fatores, destacando-se dentre outros: (a) a pobre literatura técnica disponível no cenário nacional, limitada a relatórios técnicos no âmbito interno das empresas; (b) a falta de cultura técnica para considerar a reabilitação como opção em relação à substituição de componentes e, (c) o progressivo envelhecimento e a deterioração das redes e demais componentes dos sistemas de abastecimento em geral, sendo adotadas soluções corretivas localizadas, ou, em outro extremo, a completa e onerosa substituição de trechos em grande extensão. Dessa forma, ao longo do desenvolvimento do trabalho, percebeu-se inicialmente a importância de proceder a uma revisão completa da tecnologia disponível internacionalmente para a reabilitação de sistemas de abastecimento de água. Reconheceu-se nesta etapa uma razoável distância entre o uso dessas tecnologias no País e nos países desenvolvidos (EUA e Europa). Um conhecimento melhor sobre o que existe disponível no Brasil foi conseguido com uma série de entrevistas a empresas prestadoras dos serviços de reabilitação e também junto às empresas de saneamento que contrataram tais serviços.

Além da percepção sobre a falta de cultura técnica no País em nível suficiente diante das carências, a autora percebeu a necessidade de desenvolver metodologia de planejamento que garantisse visão sistêmica sobre a necessidade e potencialidade de possíveis intervenções na rede, evitando-se ações localizadas. Não obstante, além dos fatores técnicos e econômicos tradicionalmente incorporados nos estudos de reabilitação, propõe-se na tese que o planejamento deve também incorporar um conjunto mais amplo de aspectos na decisão sobre como reabilitar os sistemas, incluindo entre eles o grau de intervenção e de impactos no contexto social onde se situa o sistema. Para dar fundamentação a essa proposição, desenvolveu-se uma metodologia de análise multicriterial para avaliar as múltiplas alternativas num processo

de planejamento de reabilitação. Em síntese, caracteriza-se a contribuição da tese como sendo a proposição de uma nova metodologia de análise e planejamento da reabilitação de sistemas de abastecimento de água, a qual parte das opções técnicas pertinentes numa análise trecho a trecho (reabilitação física) para a posterior análise do desempenho hidráulico considerando o conjunto das opções técnicas possíveis e seus efeitos sobre toda a rede (reabilitação operacional sistêmica) e conclui com a análise multicriterial na seleção das alternativas mais robustas para a solução do problema, considerando fatores adicionais ao âmbito técnico (reabilitação sustentável).

Para a estruturação da metodologia foi necessário a definição de critérios de avaliação a serem aplicados na formulação multicriterial. De posse das soluções técnicas obtidas com o modelo SPERTS, e que portanto satisfazem o problema operacionais detectados, e de posse dos pesos atribuídos pelos decisores, inicia-se neste ponto, a real contribuição acadêmica do trabalho proposto, onde num ambiente multicriterial, procede-se ao estudo de hierarquização de alternativas conjuntamente com a quantificação da contribuição de cada alternativa para a reabilitação do sistema.

O texto está organizado em capítulos, sendo que neste primeiro capítulo, fez-se a introdução ao assunto da tese; no capítulo dois são abordados a importância da reabilitação no contexto dos recursos hídricos e, o desafio do saneamento no Brasil; no capítulo três é discutida a importância do conhecimento do sistema para a reabilitação; sendo apresentado no capítulo quatro os comentários das visitas técnicas realizadas e as principais técnicas de reabilitação dos sistemas de distribuição de água; no capítulo cinco é feita uma breve revisão sobre a análise multicritério e os métodos empregados na metodologia proposta; no capítulo seis são apresentados a metodologia proposta, estudo de caso e os resultados obtidos e por fim, no capítulo sete a conclusão desta pesquisa.

2. A Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água e os Recursos Hídricos

Neste capítulo destaca-se a importância da reabilitação no contexto dos recursos hídricos. A adequada exploração dos recursos hídricos sem dúvida, constitui uma atividade essencial para a garantia da qualidade no setor do abastecimento de água.

2.1. A Limitação Quantitativa dos Recursos Hídricos e a Reabilitação

O processo de reabilitação dos sistemas de abastecimento é de importância fundamental para preservação dos recursos hídricos. O uso de técnicas de reabilitação vem ao encontro da necessidade mundial de evitar o desperdício da água, no caso de vazamentos, perdas físicas, desperdícios operacionais, entre outros.

A água é essencial para a sobrevivência humana e, embora todos saibam de sua importância, pouco tem sido feito para preservá-la. O homem precisa de água de qualidade adequada e em quantidade suficiente para suprir suas necessidades. Muitos países enfrentam problemas referentes ao uso da água, especialmente devido ao fato de que os governantes não abordam os recursos hídricos de maneira abrangente.

A qualidade do recurso hídrico está diminuindo ao mesmo tempo em que as populações urbanas estão crescendo.

As atividades de irrigação, geração de energia elétrica, abastecimento e transporte decidem suas próprias operações hídricas sem a preocupação dos efeitos sobre outros usos. Em nível mundial, a agricultura é o maior usuário de água, perfazendo um total de 69%, em comparação aos 23% da indústria e aos 8% gastos com abastecimento doméstico. Nos países em desenvolvimento, a agricultura utiliza até 80% dos recursos hídricos (BANCO MUNDIAL, 1998).

Poucos têm a completa consciência sobre a problemática da água, e não perceberam tratar-se de um recurso limitado e vulnerável. Segundo dados do BANCO MUNDIAL (1998), a água poderá ser um recurso escasso em 1/3 dos países no início do século XXI. Outros levantamentos apontam que o crescimento populacional reduzirá em até 35% a disponibilidade de água per capita. É estimado que a disponibilidade hídrica superficial do Brasil é de aproximadamente 12% da água do mundo e metade da quantidade da América Latina. Entretanto, este recurso está distribuído de forma desigual, ou seja, 80% estão concentrados na Bacia Amazônica, que abrange 63% do território nacional, mas somente 5% da população. Em contrapartida, na região Sul e Sudeste encontram-se os grandes centros urbanos e industriais com 60% da população brasileira, onde os problemas de escassez de água em quantidade e qualidade começam a se agravar.

Segundo BANCO MUNDIAL (2002) o consumo mundial da água doce disponível no mundo dobrou nos últimos 50 anos e hoje corresponde à metade de todos os recursos hídricos acessíveis, quais sejam os rios, alagados, lagos e aquíferos subterrâneos. Acredita-se que em 2025, cerca de 5 bilhões de pessoas estarão vivendo em zonas urbanas. A urbanização crescente agravará tanto os conflitos pela água como os impactos ambientais decorrentes das obras necessárias para abastecer as populações, cada vez mais concentradas. A migração ou crescimento vegetativo, nas megacidades (cidades com mais de 10 milhões de habitantes), entre elas São

Paulo, são o grande desafio na gestão de água para os governantes, devido aos problemas decorrentes da superexploração, poluição ou má gestão dos recursos hídricos disponíveis e as companhias de saneamento terão papel vital no gerenciamento dos recursos água e energia consumida no atendimento a demanda de água.

2.1.1. Deterioração dos Recursos Hídricos

O mau uso da terra, particularmente em agricultura, desmatamento e mineração, provoca não só a sedimentação dos rios e a poluição das águas como também a pobreza, uma vez que as terras são degradadas e as famílias migram para os grandes centros. Há necessidade de novas estruturas para o fornecimento de água ao mesmo tempo que se agravam os problemas ambientais, principalmente nos locais a jusante dos rios, devido à grande produção de esgoto que se torna comum.

Adicionalmente, com o crescimento populacional, eleva-se a demanda por suprimentos alimentícios e portanto, novos sistemas de produção agrícola irrigada, além de aumentar a demanda por água de qualidade aceitável para uso doméstico, industrial e tratamento de esgoto. No entanto, os sistemas de abastecimento de água existentes e as infra-estruturas sanitárias, na sua grande maioria, deixaram de prover serviços adequados, assim tornando potencialmente maiores os problemas da poluição. Outro fato a considerar é que a urbanização e a industrialização também aumentaram a demanda por energia elétrica, que no caso brasileiro é tipicamente hidroelétrica.

Aproximadamente 80% da população brasileira é servida de água potável, mas somente 47% tem coleta de esgoto. A redução da poluição da água nas áreas urbanas requer políticas e medidas coordenadas para diminuir as descargas municipais e industriais de esgoto. O País tem experimentado uma rápida degradação da qualidade da água para abastecimento, principalmente ao redor das grandes áreas

metropolitanas como, São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Recife, Salvador, Fortaleza, Porto Alegre, Curitiba, Campinas e outros centros agrícolas e industriais.

Segundo TUCCI (2000) um dos principais problemas de recursos hídricos no país é o impacto resultante do desenvolvimento urbano, tanto em nível interno de município como em nível externo, exportando poluição e inundações para a jusante. As regiões metropolitanas deixaram de crescer e até regridem no seu núcleo, e começaram a se expandir na periferia, justamente onde se concentram os mananciais. Torna-se nítida a ineficiência da administração pública, ao observarmos os seguintes fatos: alto volume de água tratada e perdida durante sua distribuição implicando na procura de novos mananciais para garantir a demanda; a insuficiência de redes para a coleta de esgoto e baixa capacidade de tratamento; as redes pluviais além de transportarem esgoto não coletados e tratados, também transportam de forma indevida para nossos rios as cargas orgânicas, tóxicos e metais (poluição difusa). A Figura 2.1 ilustra a problemática dos recursos hídricos.

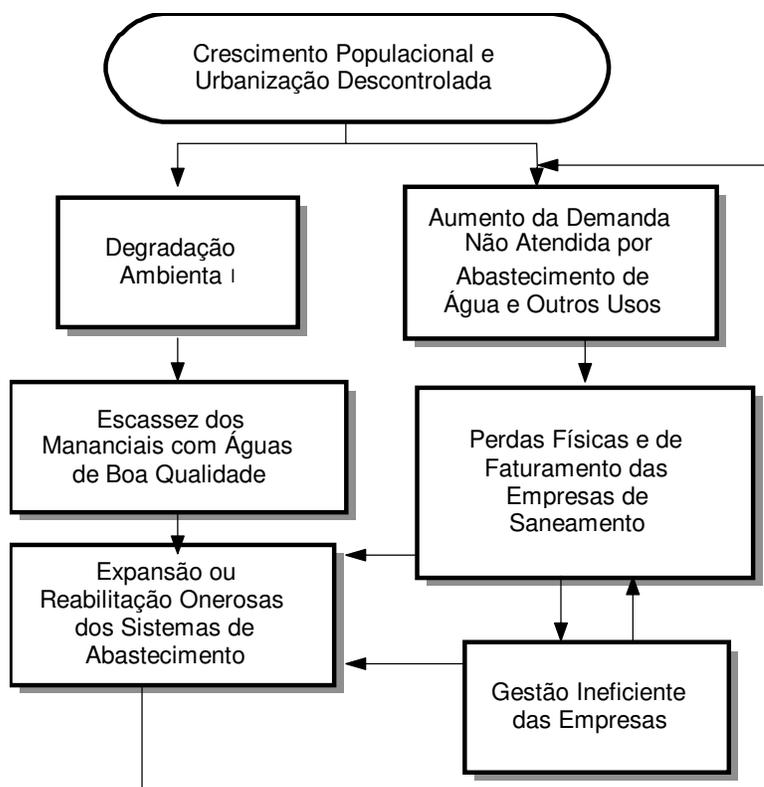


Figura 2.1: Problemática dos recursos hídricos

2.2 A Política Pública dos Recursos Hídricos

Tardiamente, o homem se conscientizou da necessidade de explorar e utilizar os recursos naturais de maneira racional e parcimoniosa. Em meados do século passado, o comprometimento das reservas hídricas mundiais começou a ser previsto, principalmente, devido ao mau uso. Embora o Brasil seja privilegiado quanto ao volume de recursos hídricos, a preocupação com a qualidade da água e seu valor econômico, teve seu marco na legislação brasileira por meio do Código de Águas, na década de 30.

A questão ambiental vinha sendo discutida em vários países, e teve como marco a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente, em Estocolmo, em 1972, colocando o tema ambiental na agenda política internacional. Em resposta à questão diplomática frente a posição do Brasil em Estocolmo, e para acompanhar de forma efetiva as questões globais, criou-se em 1973, em âmbito federal, a Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA).

Outros encontros internacionais deram continuidade ao debate sobre as questões ambientais. A Conferência das Nações Unidas sobre Água, em Mar Del Plata, em 1977, abordou a necessidade do uso eficiente da água e ressaltou seu múltiplo aproveitamento enfocando a criação de um modelo de gestão da água. Durante a Conferência Internacional das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, na Irlanda, em 1992, a Declaração de Dublin, verificou a necessidade do comprometimento político desde as altas esferas governamentais até as menores comunidades. No Rio de Janeiro, em 1992, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento originou a Agenda 21, documento assinado por 170 países, onde foram identificadas ações que aliem desenvolvimento e proteção ambiental, destacando a participação dos cidadãos com pré-requisito fundamental para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Em 1996, na Costa Rica, ocorreu a Conferência sobre Avaliação e Gerenciamento Estratégico dos Recursos Hídricos na América Latina e Caribe. A

Conferência Internacional sobre Água e Desenvolvimento Sustentável ocorrida em Paris, em 1998, constatou que a água é tão essencial para o desenvolvimento sustentável quanto para a vida. Não obstante, a garantia de água para todos no século XXI foi enfocada no II Fórum Mundial da Água, na Holanda, em 2000.

A degradação dos rios, no Brasil, notadamente na região metropolitana de São Paulo, e o agravamento de conflitos entre diversos setores de usuários das águas, indicaram a necessidade de um gerenciamento integrado dos recursos hídricos. A escassez de água levou o Estado de São Paulo a situações com índices críticos de disponibilidade de água e a necessidade de solucionar o problema de degradação. Então, em 1985, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), promove a descentralização administrativa mediante a criação de Diretorias de Bacias Hidrográficas.

Em 1987, foi criado o Conselho Estadual de Recursos Hídricos com objetivo de propor a política e a estruturação do Sistema de Gestão para o setor. O primeiro Plano Estadual de Recursos Hídricos é editado em 1990, e em 1991 é sancionada a lei que instituiu a Política e o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH). A mesma lei criou o Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO) com intuito de gerir os recursos captados em decorrência dos aproveitamentos hidroenergéticos e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos. O Estado de São Paulo foi dividido em 22 Unidades de Gestão de Recursos Hídricos (UGRHs). Em 1989, numa iniciativa pioneira, é formado o Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari.

Sem dúvida, a apreensão com o uso e destino das águas paulistas proporcionou uma verdadeira revolução conceitual tanto no âmbito estadual, quanto no federal. Neste contexto, em 1997, foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e em 2000 o Plenário da Câmara de Deputados aprovou a criação da Agência Nacional de Águas (ANA), autarquia vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, com autonomia administrativa e financeira que tem a finalidade de

implementar a política nacional, coordenar o desenvolvimento do sistema e gerenciar os recursos hídricos.

Para o BANCO MUNDIAL (2002) as instituições e políticas ligadas à área de gestão dos recursos hídricos no Brasil vêm operando de forma autônoma, desvinculadas das instituições e políticas responsáveis pelo abastecimento de água e gestão de efluentes urbanos e/ou industriais. Esse divórcio, prejudicou o desenvolvimento e a implantação de políticas coerentes de gestão da qualidade da água. Por isso, a criação da ANA constituiu uma iniciativa fundamental para que a gestão da qualidade da água seja alcançada.

A despeito da cobrança pelo uso da água vir sendo discutida em todo o país, o Código de Águas já previa dispositivos legais para a cobrança do uso da água, tanto para o poluidor-pagador como para o usuário-pagador. AZEVEDO *et.al* (2000) comentaram que, em estudo comparativo realizado pelo Banco Mundial sobre as experiências de cobrança pelo uso da água, concluiu-se que em países onde o acesso a água é gratuito, os sistemas são ineficientes e altos índices de perdas foram observados.

Evidencia-se a necessidade de maior eficiência político-administrativa dos governos para estabelecer ações públicas e privadas visando alcançar o melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Objetivando o incentivo à busca de tais ações, o BANCO MUNDIAL (1998) vem adotando alguns procedimentos em nível global para induzir a melhoria do gerenciamento da água, a saber:

- Incorporar as questões relacionadas com a política e o gerenciamento dos recursos hídricos nas conversações periódicas que mantém com cada país e na formulação estratégica de ajuda aos países onde as questões relacionadas com a água são significativas;
- Apoiar as medidas para o uso mais eficiente da água;

- Dar prioridade à proteção, melhoria e recuperação da qualidade da água e à redução da poluição das águas através de políticas "poluidor-pagador" (quem polui paga, na proporção do dano);
- Apoiar os esforços governamentais para descentralizar a administração da água e encorajar a participação do setor privado, a participação das corporações públicas financeiramente autônomas e das associações comunitárias no abastecimento de água aos usuários;
- Apoiar programas de treinamento para introduzir reformas nos sistemas de gerenciamento de água.

2.3. Limitação de Energia

Os períodos prolongados de seca e a falta de planejamento dos recursos hídricos, principalmente nas últimas décadas, têm agravado o problema com a qualidade e a quantidade de água disponível para o abastecimento de água e demais usos múltiplos da água. Segundo o BANCO MUNDIAL estima-se que entre 2 e 3% do consumo de energia no mundo é usado com o bombeamento e o tratamento de água nos sistemas de abastecimento de água.

No Brasil a produção energética exhibe uma concentração na fonte hidrelétrica, em torno de 91% da energia total. Segundo a Agência Nacional de Água (ANA), tal característica é traduzida em significativa dependência estratégica do país na disponibilidade hídrica. O potencial hidrelétrico total é de 260 GW, dos quais cerca de 22% encontram-se em operação. Mas grande parte do potencial, ou seja, 40% encontra-se na bacia Amazônica onde a demanda é pequena, ao passo que o potencial da região Sudeste, com maior densidade demográfica, está totalmente explorado.

A recente crise de energia elétrica ocorrida em 2001, enfatizou para a população em geral a importância de nossos recursos hídricos para a geração de energia no Brasil. A redução de 20% do consumo de energia foi imposta pelo governo, em todos os segmentos, a fim de reduzir o risco de um racionamento. O déficit energético brasileiro se agravou ao longo da década de 90 uma vez que a demanda avançava em média 5% ao ano e baixos investimentos foram aplicado no setor (ANA, 2001).

São necessários investimentos da ordem de R\$ 15 bilhões por ano em geração, transmissão e distribuição de energia segundo a Associação Brasileira de Infra-estrutura e Indústria de Base (Abdib). Os executivos do setor elétrico, acreditam que uma nova crise ocorrerá no máximo em 2007 se o país voltar a crescer 3% ao ano, e justificam que o excedente de energia existente hoje, no país, se deve ao fato das mudanças de hábitos dos consumidores, após o racionamento e a retração da atividade econômica.

Estima-se um crescimento drástico nas demandas de recursos hídricos e energia nas cidades. Acredita-se que o uso de energia em todo mundo cresça em 60% e que o consumo total de energia no setor de saneamento irá crescer globalmente numa previsão de 33% nos próximos 20 anos. O consumo global de água cresceu em seis vezes no último século e, estima-se que em 2025, um terço da população mundial estarão vivendo em áreas com escassez crônicas de água (ALLIANCE, 2002).

Segundo GONÇALVES (1999), a conservação e a racionalização da utilização dos recursos energéticos e hídricos são fatores decisivos no sucesso ou não da inserção e manutenção dos países na comunidade mundial como força econômica. Os recursos hídricos não podem ser tratados como recursos renováveis mas, sim como recursos limitados à sua própria capacidade de regeneração. A água tem que ser encarada como matéria-prima para as empresas de saneamento e, nesse contexto, tem que ser valorizada, pois está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento social, econômico e político de uma nação.

2.4. Saneamento no Brasil

Com o intuito de permitir uma melhor visualização da evolução do setor de saneamento básico brasileiro será feito um breve comentário sobre seu histórico de desenvolvimento no Brasil. Pode-se dizer que até meados da década de 60, o saneamento básico apresentava-se institucionalmente desorganizado, além de não existir uma política global para o setor. Entre eles, incluem-se o Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS), Departamento Nacional de Obras Contra Seca (DNOCS), a Fundação de Serviço Especial de Saúde Pública (FSESP) e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE (antiga CODENE) entre outros, que não dispunham de recursos nem poderes suficientes para tratar de forma integral o problema, ou mesmo coordenar a atuação de diversas entidades. Este fato, ocorrido justamente na época em que se acelerava o processo de urbanização no país, acarretou o progressivo agravamento do problema, aumentando com isso o déficit dos serviços de saneamento.

Foi criado, em 1968, o Sistema Financeiro do Saneamento (SFS). Em 1971, com o lançamento do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA), criaram-se mecanismos que permitiram acelerar o atendimento à população. O Banco Nacional de Habitação (BNH) captava recursos através do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço, caderneta de poupança e empréstimos externos, e repassava recursos aos Estados para as obras e programas de saneamento. Para conseguir financiamentos, os Estados tiveram que constituir companhias de saneamento, que são as concessionárias dos serviços de água e esgoto. Os financiamentos eram passados pelo BNH aos Bancos Estaduais, que participavam com 50% do valor do empreendimento. Os empréstimos eram amortizados em 15 anos, com juros variando entre 5 a 10% ao ano acrescido da correção monetária.

Em 1970, aproximadamente 45% da população urbana brasileira tinha acesso a sistemas públicos de abastecimento de água, e apenas 22% da população tinha

captação de esgoto, e nenhum tratamento era dado ao esgoto coletado. Em 1980, cerca de 80% da população urbana tinha acesso à água potável. As principais regiões metropolitanas, capitais e cidades de grande porte recebiam algum serviço de esgoto.

Segundo o Ministério do Planejamento e Orçamento, em 1995, cerca de 86% da população urbana tinha acesso ao abastecimento público de água; apenas 49% da população era atendida com serviços de coleta de esgotos e somente 10% do esgoto produzido recebia algum tipo de tratamento, significando que mais de 50 milhões de pessoas nas cidades brasileiras não estavam sendo atendidas pelos serviços de coleta de esgoto. Para garantir que toda a população urbana receba serviços de abastecimento de água e esgoto até o ano 2010, serão necessários investimentos superiores a R\$ 40 bilhões, ou seja, mais de 2 bilhões por ano.

2.4.1 Situação das Empresas Brasileiras de Saneamento

Tem sido responsabilidade do Estado garantir o abastecimento de água à população e à indústria, porém com a declarada crise dos governos dos países em desenvolvimento e a conclamada modernização do Estado, desvinculando-se da prestação de serviços diretos, os investimentos em obras de alcance social têm recebido atenção secundária. Este fato agrava, em muito, a responsabilidade das empresas de abastecimento de água em garantir, adequadamente, as necessidades mínimas a custos compatíveis com os orçamentos estaduais e municipais (SANTANA, 1999).

Nos serviços prestados pelas empresas de saneamento nas cidades brasileiras, principalmente as localizadas nos grandes centros, como as cidades de São Paulo e Recife, observa-se claramente a corrida contra o “prejuízo”, o que é facilmente explicado, não só pelo déficit de água nos serviços oferecidos, implicando em rodízio no abastecimento de água, bem como, na qualidade e confiabilidade do sistema.

A ausência de uma política de desenvolvimento urbano, com plano diretor e regras de execução nos serviços de infra-estrutura nos sistemas de abastecimento, tem agravado ainda mais esta situação. As regiões periféricas das cidades são as mais atingidas, onde pode-se observar que há deficiências no setor de abastecimento, transporte, etc., devido à falta de planejamento urbano. Nestas áreas, nota-se um intenso crescimento das demandas e as instalações e equipamentos existentes tendem rapidamente a entrar em colapso, tornando insuficientes o atendimento aos seus consumidores com padrões adequados.

Em alguns sistemas no Brasil, a falta de planejamento no setor de abastecimento, faz com que as demandas previstas sejam superadas no horizonte de projeto, impondo ao sistema uma operação ineficaz. As mudanças no perfil de consumo, no que diz respeito à magnitude de vazões e à sua variação no tempo, têm que ser devidamente consideradas na operação. Essas mudanças no perfil dos consumidores, em função do estabelecimento de centros comerciais em áreas inicialmente residenciais, a verticalização das construções e a implementação de conjuntos habitacionais geram um crescimento que dificulta a formulação de previsões de demanda.

Segundo ALEGRE e COELHO (1995), em Portugal, 77% da população estava conectada ao sistema de distribuição de água, e a previsão era que até o final do ano 2000, 95% da população sejam atendidas. Estudos realizados com base em levantamento de campo entre os usuários, mostram que 40% da população está satisfeita com os serviços prestados, 54% acreditam que o serviço é adequado e 6% julgam o sistema deficiente.

No Brasil, é alta a incidência de perdas de água durante a operação dos sistemas. Num estudo de viabilização de investimentos para a melhoria do sistema de abastecimento de água em 14 cidades, (Fortaleza - CE, Caruaru - PE, João Pessoa, Campina Grande, Santa Rita - PB; Cuiabá, Várzea Grande, Sorriso, Pontes e Lacerda, Sinop, Juara, Juina (MA); e Juazeiro e Itabuna - BA), o BANCO MUNDIAL (1998)

constatou que todas as localidades apresentavam um alto nível de perda de água, variando entre 42 e 67 %. Mas o estudo comparativo realizado pelo Ministério do Planejamento e Orçamento (1995) aponta que o índice de perdas médias das cidades brasileiras é de 45%, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Comparação entre os serviços prestados pelas empresas de saneamento

	<i>Brasil</i>	<i>Chile</i>	<i>Inglaterra</i>
Tarifa média (U\$\$/m ³)	0,66	0,36	0,82
Cobertura do Abastecimento de Água %	86	86	100
Índice de perdas (média) %	45	29	28
Despesas com pessoal – Despesas Operacionais %	60	Nd	38
Número de empregados por 1000 ligações	6,5	2,1	1,7
Renda per capita (U\$\$/ano)	2.930	3.170	18.060
Capacidade de compra de água (m ³ /ano)	4.440	8.805	22.024

Fonte: Ministério do Planejamento e Orçamento (1995 b)

Em outra análise feita pelo BANCO MUNDIAL (1998), focalizando as empresas de saneamento brasileiras, particularmente as companhias estaduais, chegou-se às seguintes conclusões:

- As empresas apresentam alto custo operacional, e o controle relativo ao custo é inexistente ou deficiente. Muitas das funções são centralizadas, e este é um dos principais motivos para o alto custo administrativo. Nos últimos anos, o custo com serviços terceirizados aumentou substancialmente, enquanto as companhias passaram a reduzir seu quadro de funcionários;
- Alto custo com pessoal e empregados idosos. Mesmo com muitas companhias reduzindo o custo dos empregados através de plano de aposentadoria voluntária, o custo com pessoal representa 50% do custo operacional, exceto nas companhias municipais. Muitas companhias

estão revendo as estruturas salariais que eram somente baseadas no tempo de serviço e não na performance do empregado;

- Embora as margens de liquidez melhoraram nos últimos anos, principalmente graças ao aumento de tarifas, a maioria das empresas apresentam dificuldades com seu fluxo de caixa. As taxas de arrecadação não são ideais e o custo com energia é bastante alto.

2.4.2. Dificuldades na Obtenção de Financiamento

A grande maioria dos estados e municípios são responsáveis pela operação dos serviços de abastecimento de água, mas estes nem sempre conseguem suportar suas obrigações financeiras. O alto custo operacional, devido sobretudo, à ineficiência operacional, acarreta déficit de atendimento à demanda, dificuldades na obtenção de financiamento e ineficiência na prestação dos serviços. Por outro lado, os fundos públicos são incapazes de atender a demanda de investimentos necessária no setor de abastecimento de água. Vale ressaltar que, a origem dos capitais disponíveis para o programa de investimentos, muitas vezes vêm de organismos externos, como por exemplo, Banco Mundial (BIRD), Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Kredistranstalt für Wienderanfbau (KfW) e o Overseas Economic Cooperation Fund (OECF).

Tais instituições exigem estudos técnicos para a liberação dos empréstimos nos quais fiquem demonstrados as reais necessidades de tais investimentos, possibilitando que a captação dos recursos necessários sejam liberados para o aprimoramento das áreas deficientes. Para a liberação do financiamento, uma equipe multidisciplinar estuda os fatores econômicos, financeiros, sociais e ambientais que podem afetar o projeto de reabilitação do sistema de abastecimento. Dentre todos os pedidos de financiamento, o Banco Mundial seleciona os possíveis candidatos ao financiamento,

sendo analisados o porte do projeto, a estimativa de custo total e per capita e as alternativas técnicas.

Segundo o BANCO MUNDIAL (1998) o setor público tem sido fonte primária de capital de investimento no setor de abastecimento. Durante os próximos dez anos, as necessidades financeiras para a irrigação, energia hidroelétrica e investimentos no setor de saneamento serão de cerca de 600 a 700 bilhões de dólares, em nível mundial. Portanto, novas fontes de capital serão necessárias, juntamente com outros órgãos internacionais e bilaterais, para satisfazer tais necessidades.

Outra instituição que financia o setor de saneamento é o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) o qual a partir de 2000, mudou os critérios de financiamentos para que as concessionárias privadas do setor de saneamento pudessem ampliar a oferta de serviços de água e esgoto no País. Para a liberação de recursos, o BNDES considera os indicadores econômico-financeiro das empresas, ou seja, a liquidez, o patrimônio líquido em relação aos ativos totais, e estuda a provável cobertura da dívida. O objetivo é garantir o retorno dos financiamentos concedidos para as empresas. Outro critério também utilizado é que serão liberados financiamentos somente para concessionárias acordadas com estados e municípios em sem demandas jurídicas.

3. Componentes dos Sistemas de Abastecimento de Água, Reabilitação e Gestão

3.1. Componentes de um Sistema de Abastecimento de Água

Os sistemas de abastecimento de água, são por definição, o conjunto de obras, equipamentos e serviços executados com o objetivo de fornecer água aos locais de consumo desejados (AZEVEDO NETTO et al., 1973). O objetivo fundamental do sistema de abastecimento, quer seja público ou privado, é fornecer água ao homem que vive nos centros urbanos, em quantidade e qualidade adequadas às suas necessidades. Ou seja, o abastecimento deve promover, proteger, e recuperar a saúde, no sentido mais amplo, do bem estar físico, mental e social e não apenas promover a ausência de doenças segundo a Organização Mundial de Saúde.

No entanto, os sistemas de abastecimento de água são extremamente variáveis, em função do porte da cidade, topografia, sua posição em relação aos mananciais, etc., conforme demonstrado na Figura 3.1.

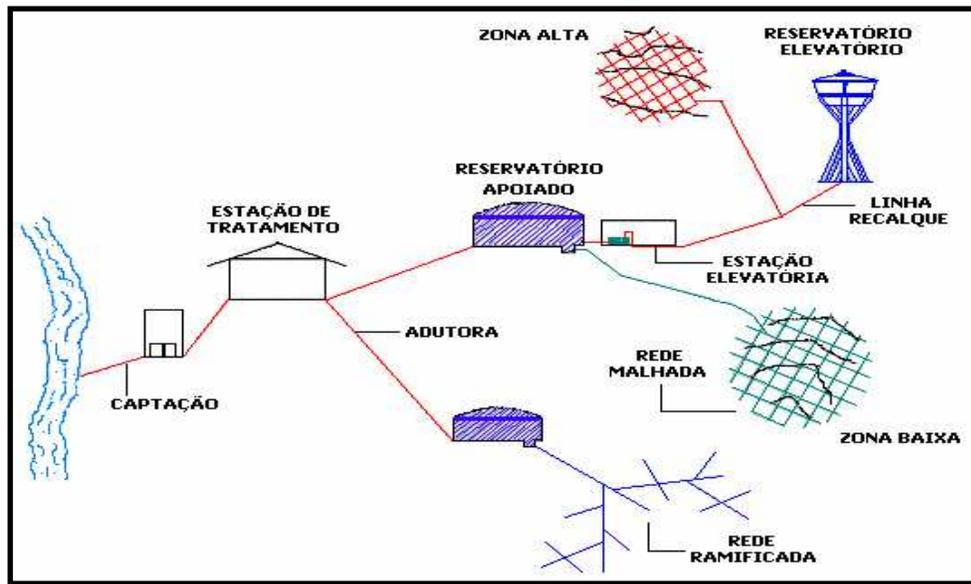


Figura 3.1: Representação dos elementos dos sistemas de abastecimento de água

A seguir são feitos breves comentários sobre cada unidade do sistema de abastecimento, de forma a padronizar a terminologia e destacar os aspectos que intervêm com o planejamento, operação e manutenção dos sistemas. Para facilitar o entendimento e a complexidade dos sistemas de abastecimento de água, é conveniente dividi-los em dois grandes grupos, o *sistema produtor* e o *sistema distribuidor*, conforme comentados a seguir.

Sistema Produtor

Captação dos mananciais: tem a finalidade de criar condições para a retirada de água do manancial, ou seja, tem a função de captar, de um meio hídrico (superficial ou subterrâneo), água em quantidade suficiente com características físicas, químicas e bacteriológicas aceitáveis para o consumo humano;

Adução de água bruta: é o transporte da água do manancial até a estação de tratamento, feito através das adutoras de água bruta;

Estação de tratamento de água (ETA): esta unidade é necessária para que a água retirada do manancial receba tratamento adequado, tornando-a potável para o consumo.

Sistema Distribuidor

Adutoras de água tratada: têm a finalidade de transportar água da estação de tratamento até os centros de reservação;

Reservatórios: têm a função de garantir o abastecimento da rede nos horários de maior consumo, atender à reserva de incêndio, e garantir o abastecimento em situações emergenciais, como por exemplo, no rompimento de adutora, manutenção na ETA, exigindo com isso a paralisação de uma ou mais unidades;

Rede de distribuição: é o conjunto de tubulações, peças e acessórios (válvulas e registros) que estão conectados a fim de transportar determinada quantidade de água, fazendo um elo de ligação entre os reservatórios e os consumidores. De modo geral, qualquer que seja o desenho da rede, esta é constituída por condutos principais, que são aqueles de maior diâmetro e têm a finalidade de abastecer os condutos secundários, enquanto os condutos secundários, de menor diâmetro, têm a função de abastecer diretamente os pontos de consumo do sistema.

3.1.1. As Deficiências dos Sistemas de Abastecimento de Água

A falta de planejamento, manutenção adequada, associada à escassez de recursos financeiros têm tornado deficientes os sistemas de abastecimento de água. Com o passar do tempo os sistemas se deterioram de maneira natural ou acelerada, dando origem a problemas operacionais, que provocam a diminuição da qualidade dos serviços prestados e aumento dos custos operacionais que recairão sobre seus consumidores na forma de tarifas. Estes efeitos podem ser sentidos:

Empresas de Saneamento:

- ✓ Altos índices de perdas de água no sistema, principalmente associado a alta pressão de trabalho, gerando um grande número de rupturas;
- ✓ Crescente aumento das despesas com manutenção do sistema;
- ✓ Aumento significativo do consumo energético, uma vez que, manobras operacionais tendem a compensar o funcionamento deficiente do sistema;
- ✓ Aumento do número de reclamações por parte dos consumidores.

Consumidores:

- ✓ Má qualidade da água fornecida que pode ser sentida através da alteração de sabor, cor ou material em suspensão;
- ✓ Frequentes interrupções das vias públicas para execução de reparos nas redes de distribuição ou redes adutoras;
- ✓ Abastecimento de água intermitente, pois o sistema não tem capacidade de suprir a demanda;

- ✓ Problemas de pressão da rede muito acima ou abaixo dos limites normalizados, causando más condições de uso pelos consumidores.

A construção do sistema de abastecimento impõe elevados custos, que serão somados com o custo de operação e manutenção dos sistemas. Segundo GOULTER (1986), o critério de custo mínimo de construção, embora importante, deve ser considerado em conjunto com a confiabilidade do sistema e o custo da manutenção da rede.

Segundo DAY (1990), a maioria das comunidades considera o crescimento uma necessidade econômica. Contudo, permitir que as instalações em uso se deterioreem pode ser tão perigoso ao desenvolvimento econômico quanto seria limitada a capacidade de alcançar a demanda de novos serviços. Portanto, decisões conscientes devem ser tomadas a fim de proteger os investimentos necessários e seria oportuno a realização de uma programação de medidas que reparem, substituam, e recuperem com eficiência os sistemas existentes, levando em consideração a relação custo-benefício.

O desempenho econômico e a confiabilidade na prestação de serviços pela empresa de saneamento estão intimamente ligados ao projeto e a operação pois, uma política operacional ótima está condicionada ao projeto ótimo, (ALPEROVITS e SHAMIR,1977). As decisões operacionais são consideradas no projeto, pois não se pode separar as chamadas decisões de projeto, das decisões operacionais. Elas são partes inseparáveis durante a formulação do problema.

Muitas são as causas que podem tornar um sistema de abastecimento deficiente. A seguir são descritas de forma resumida cada unidade do sistema de abastecimento de água, comentadas suas respectivas funções e abordados os principais problemas nelas encontrados.

3.1.1.1. Problemas na Captação

A captação é o conjunto de obras dimensionadas com o intuito de retirar água do manancial, quer seja superficial ou subterrâneo, para o abastecimento. A seleção do manancial é feita mediante estudo técnico e econômico dentre as diversas alternativas possíveis, pois nem sempre o manancial mais próximo implicará na melhor solução. Dependendo do manancial escolhido na unidade de captação será necessária a construção de caixa de areia, poço de sucção, canais abertos, tubulações, conexões, acessórios, bombas, barragem ou diques, e etc. Os problemas usuais são:

- ✓ Deterioração das obras de construção civil;
- ✓ Deterioração dos equipamentos mecânicos ou eletrônicos, como por exemplo o desgaste de grades na entrada da captação, o desgaste do conjunto moto-bomba devido ao alto teor de areia durante o processo de captação, a falta de manutenção preventiva, etc.;
- ✓ Diminuição da capacidade de captação devido ao assoreamento;
- ✓ Interrupção ou diminuição da captação devido escassez de recursos hídricos em qualidade e quantidade aceitáveis;

3.1.1.2. Problemas na Estação de Tratamento

O crescimento populacional e as normas exigidas no tratamento de água potável têm exigido que as estações de tratamento de água sejam periodicamente expandidas, atualizadas e modernizadas. Para que a água captada possa ser utilizada sem prejuízo à saúde do homem é necessário que atende aos padrões de qualidade. O processo de alteração de parâmetros de qualidade para o enquadramento da água, chamamos de tratamento de água.

Numa unidade de tratamento convencional existem decantadores, floculadores, filtros, casa de química, reservatórios para a lavagem dos filtros, reservatório de água tratada, bomba, tubulações, conexões, acessórios, casa de máquinas, e etc. Os problemas usuais decorrem:

- ✓ Deterioração dos componentes e obras de construção civil;
- ✓ Deterioração dos equipamentos mecânicos;
- ✓ Deterioração dos sistemas de automação;
- ✓ Processo de corrosão devido ao cloro.

Há duas razões básicas na proposta de reabilitação da estação de tratamento de água, ou seja, a necessidade do aumento da capacidade da unidade e a necessidade da melhoria operacional. A reabilitação pode aumentar a capacidade da estação além da capacidade do projeto original.

3.1.1.3. Problemas na Estação de Bombeamento

As estações elevatórias, casas de bombas e “boosters” são designações usadas para indicar instalações de mesma natureza destinada a abrigar conjuntos de bombas e dispositivos complementares (AZEVEDO NETO et al.,1973).

Entende-se por estação elevatória uma unidade técnica que compreende o conjunto de obra civil, máquinas, equipamentos e aparelhos necessários para a elevação da água seja bruta ou tratada, de um ponto para outro, em quantidade e pressão adequadas. Quando existe uma unidade de bombeamento diretamente conectada a um trecho qualquer da adutora, ou seja, uma unidade intermediária de reforço denomina-se “booster”.

As bombas podem estar presentes na estação de captação, aduzindo água bruta do manancial para estação de tratamento de água e no sistema de distribuição conduzindo a água tratada das estações de tratamento aos reservatórios de distribuição. Os problemas usuais incluem:

- ✓ Consumo excessivo de energia;
- ✓ Geração de regimes transitórios;
- ✓ Deterioração de equipamentos mecânicos e eletrônicos;
- ✓ Deterioração da construção civil;
- ✓ Incapacidade de manter o bombeamento da vazão inicialmente prevista;
- ✓ Incapacidade de manter a carga manométrica inicialmente prevista;
- ✓ Vibrações causadas por cavitação ou desalinhamento dos grupos moto-bomba.

3.1.1.4. Problemas com os Reservatórios

Nos grandes centros, é comum a presença de vários reservatórios, destinados a atender uma determinada área. Os reservatórios de distribuição têm várias finalidades: (a) fornecer água por ocasião de emergências, como por exemplo: rompimento da adutora, problemas de manutenção ou desinfecção da estação de tratamento exigindo a paralisação de uma ou mais unidade; (b) garantir vazão para o combate a incêndios; (c) regularizar pressões de serviço mínimas e, (d) fornecer vazão complementar quando a vazão de demanda for superior à vazão média. Ocorrem usualmente os seguintes problemas com os reservatórios:

- ✓ Perda da estanqueidade da sua estrutura, aumentando a perda física de água com o passar dos anos;
- ✓ Deterioração dos equipamentos mecânicos;
- ✓ Corrosão da armadura (reservatórios de concreto);
- ✓ Corrosão das chapas (reservatórios metálicos);

3.1.1.5. Problemas com Adutoras

Os problemas mais comuns incluem:

- ✓ Aumento da rugosidade interna da tubulação devido aos tubérculos, diminuindo a capacidade de transporte nas linhas por gravidade e/ou gerando aumento do gasto com energia elétrica nas linhas de recalque;
- ✓ Corrosão, por falta de proteção catódica, implicando na redução da espessura da parede da tubulação e em conseqüência o rompimento da adutora;
- ✓ Rupturas causadas por: excesso de pressão (regime ou de golpe), recalque do terreno, rompimento de juntas, movimentação das tubulações por insuficiência dos blocos de ancoragem, esforços ou vibrações causadas por tráfego pesado sobre a adutora, solapamento do solo devido a vazamentos;
- ✓ Deterioração da qualidade, física, química e/ou microbiológica da água distribuída devido ao índice de turbidez, sabor, ou cor ou eventualmente a degradação da água na própria rede de distribuição;
- ✓ Vazamentos contínuos, causados por deficiência em juntas ou peças especiais (medidores, válvulas, etc.).

3.1.2. Elementos de Controle nos Sistemas de Distribuição de Água

As bombas e as válvulas são elementos indispensáveis durante a operação do sistema de distribuição. As válvulas estão presentes tanto nas estações de bombeamento como na rede de distribuição de água, sem elas não seria possível efetuar controle das condições de pressão e vazão dentro do sistema. FRANCATO (1999) comenta que, encontra-se no mercado um grande número de tipos, fabricantes e

modelos diferentes de válvulas e aplicadas à diferentes finalidades (bloqueio, anti-golpe, altitude, controle, etc).

3.1.2.1. Bombas

As bombas são componentes hidráulicos usados entre outras aplicações nas adutoras e no sistema de distribuição de água, com a finalidade de manter as vazões requeridas com altura manométrica adequada, possibilitando, desse modo, a operação do sistema. Dependendo da necessidade do sistema, as bombas podem ser compostas por associações em série ou em paralelo. Existem vários tipos de bombas empregadas nos sistemas de distribuição de água, mas as bombas centrífugas são mais comuns de serem utilizadas. Recentemente, algumas empresas, preocupadas em reduzir os custos com energia elétrica, começaram a optar por bombas de rotação variável (SANASA, DAEV, DMAE – Poços de Caldas, DMAE- Porto Alegre).

A implantação dos inversores de frequência acoplados a bombas de rotação variável vem conseguindo obter benefícios adicionais ou seja: redução no consumo de energia em torno de 10 a 20%, eliminação do pico de corrente na partida e conseqüente eliminação da queda de tensão, redução de vazamentos provocados pelas altas pressões, aumento da vida útil do conjunto moto-bomba (uma vez que passa a trabalhar a maior parte do tempo abaixo da curva nominal) e a melhoria nas condições de abastecimento mantendo o sistema praticamente equilibrado VENTURINI (1997).

3.1.2.2. Válvulas de Controle Automático

As válvulas de controle automático são válvulas que possuem o acionamento comandado por uma determinada característica do escoamento, ou seja, quer seja a

pressão ou vazão. A seguir é feito um breve comentário entre as válvulas de interesse nos sistema de abastecimento de água.

As *válvulas controladoras de pressão* devem manter uma pressão específica constante, pois são projetadas para operar sob alta pressão na sua entrada, até um limite pré-estabelecido, dissipando o excesso de carga. Há dois tipos: *válvula controladora de pressão a jusante (VCJ)* ou também conhecida como válvula redutora de pressão, destinada a manter constante a carga em sua extremidade de jusante, independente do valor da pressão a montante; *válvulas controladora de pressão a montante (VCM)*, conhecida como válvula de sustentação de pressão, destinada a manter a carga em sua extremidade de montante, em um valor preestabelecido, independente da pressão de jusante.

As *válvulas de retenção (VR)* são projetadas a fim de garantir o fluxo unidirecional. Sua função é evitar o fluxo em sentido contrário ao pré-estabelecido. Geralmente são colocadas nas saídas dos reservatórios e em trechos da tubulação adjacente à bomba. Devem ser robustas pois estão sujeitas a golpes de ariete durante a operação.

Já as *válvulas controladoras de vazão (VCQ)*, são válvulas automáticas destinadas a controlar a vazão que a percorre de forma direta, impedindo que supere um valor pré-estabelecido. No momento em que a vazão atinge o valor fixado, a válvula funciona de modo ativo, provocando a perda de carga necessária para manter o valor da vazão inicialmente previsto.

Válvulas controladoras de nível (VCN) são instaladas nos reservatórios para evitar o extravasamento de água. Quando o reservatório está cheio, tais válvulas se fecham automaticamente, e só abrem quando o nível começa a baixar, garantindo o suprimento contínuo do reservatório.

Válvulas de admissão e expulsão de ar (VA), também conhecidas como ventosas, são válvulas instaladas ao longo da tubulação de adução e de redes de distribuição de água, que têm a função de permitir a saída ou a entrada de ar na tubulação durante a operação do sistema. É fato conhecido entre os engenheiros e operadores de sistema de adução, a possibilidade de “bloqueio da adutora”. Tal situação ocorre devido a paralisação total do escoamento ocasionado pelo ar preso, confinado nos pontos altos da tubulação, quer seja por adução bombeada ou por gravidade, até mesmo em ramais de distribuição, que são interpretados erroneamente pelos engenheiros de projeto e operação, como sendo devido ao bloqueio físico, admitindo a presença de material no interior da tubulação ou bloqueio topográfico, na qual cogita-se falhas no levantamento topográfico.

É importante ressaltar que, a operação de válvulas controladoras durante a operação do sistema de distribuição de água é bastante complexa. Manobras rápidas nas válvulas de controle poderiam provocar surgimento de golpes de ariete, danificando as válvulas e/ou instalações do sistema de abastecimento.

Para THODEN (1993), assim como os sistemas de distribuição, as válvulas também foram negligenciadas durante muitos anos, devido à falta de recursos dedicado a mantê-las. Comenta que, além da falta de manutenção preventiva e corretiva, foi observado durante um trabalho de auditoria que muitas delas não conseguiam isolar nenhuma área. Preocupados com a ineficiência do sistema, as Autoridades de Recursos de Água de Massachusetts (MWRA) criaram um programa para formalizar um processo de reabilitação e substituição das válvulas no sistema de distribuição. Várias visitas foram feitas às empresas de abastecimento de água, e um número considerável de dados de prática de manutenção, políticas de manutenção e detalhes de especificações foram colhidos.

Durante visitas técnicas realizada em 20 empresas de água, THODEN (1993) ouviu de algumas companhias visitadas que a reabilitação das válvulas não é vantajosa, quando comparada à substituição. Mas, nas cidades de Kansas, St. Louis e

San Diego, esta prática faz parte do cotidiano, por isso, nestas localidades as empresas mantêm um estoque de peças avulsas, tanto novas quanto usadas para permitir a reabilitação.

Para a reabilitação ou substituição das válvulas, THODEN (1993) salienta ser importante ter um almoxarifado equipado com peças e acessórios para reparo rápido. Assim, a empresa não perderá sua credibilidade no caso de dar manutenção em válvulas quebradas. Segundo RODRIGUES (2000), dependendo do reparo que a válvula necessita, a substituição pode ser uma opção, pois nos últimos anos observa-se um decréscimo no preço das válvulas tornando a prática atrativa e optando pela substituição de peças como por exemplo, anéis e a cabeça das válvulas, por apresentarem baixo custo.

O monitoramento das condições da válvula é aconselhável pois, o diafragma é um elemento muito solicitado por estar intimamente ligado ao ciclo operacional da válvula. Geralmente, fabricado em buna-n (nitrito) e reforçado em nylon, o material pode ser danificado pela fadiga. (RODRIGUES, 2002). A equipe de manutenção do setor de válvulas da SANASA – Campinas, desenvolveu um produto muito similar ao produzido pelos fabricantes de válvulas. De acordo com RIGONATO (2002) o diafragma original tem vida útil média de oito anos e, o produzido pela equipe de manutenção três anos. Como o custo do produzido é 16 vezes mais barato da peça original, a empresa adotou como medida produzir os diafragmas para a manutenção preventiva de suas válvulas visto que, a empresa possui em operação 120 válvulas controladoras de pressão do tipo diafragma, com o intuito de forçar a rede de distribuição e trabalhar com patamares mínimos de pressão manométrica, vislumbrando assim, uma minimização das perdas.

Antigamente qualquer problema que ocorria com o piloto da válvula redutora de pressão o fabricante era contatado para fazer a substituição da peça. A equipe de manutenção da SANASA, desejando reduzir custo, começou a desenvolver um piloto similar com peças encontradas no mercado e, passou a utilizá-la em manutenções de emergências. O resultado foi tão positivo que a equipe de manutenção passou a

desenvolver pilotos de vários tamanhos de válvulas. Essa medida gerou economia considerável para a empresa pois, um piloto para válvula de 2 polegadas custa no mercado 700,00 reais e o produzido dentro da empresa 25,00 reais e ambos tem praticamente o mesmo tempo de vida útil. Essa economia possibilitou a ampliação do número de peças de piloto de diversos tamanhos no estoque do setor de manutenção da empresa (RIGONATO, 2002).

Durante visita técnica à SANASA - Campinas, RODRIGUES (2000) comentou que a empresa fez algumas tentativas para reabilitação de válvulas que apresentavam “pittings”, que são pequenos buracos formados na parte interna da válvula devido ao processo erosivo provocado pela cavitação, conforme mostrado na Figura 3.2. O revestimento com epóxi foi aplicado, e através de inspeções de rotina, notou-se que esse revestimento ajudou a minimizar o desgaste.



Figura 3.2: Presença de “pittings” dentro da carcaça da válvula

Outro problema também enfrentado pela empresa e comentado por RODRIGUES (2000), com relação às válvulas, é o desgaste da mola e carcaça do atuador em virtude do atrito dos mesmos durante a operação. Na Figura 3.3 é possível observar o desgaste do corpo da válvula, devido ao alto diferencial de pressão de montante e jusante da VCA. A compra de válvulas fabricadas com o corpo mais nobre, como por exemplo, aço inox, alumínio, bronze, etc. seria uma opção para minimizar o número de reparos.



Figura 3.3: Desgaste na mola da válvula

Um estudo realizado no sistema de distribuição da SANASA – Campinas, concluiu que o posicionamento, o ciclo operacional, o diferencial de pressão, a demanda e outras características próprias de cada sistema operacional contribuem para o desgaste das VCA`s que podem ocorrer de maneira lenta ou acelerada. Neste tipo de equipamento os problemas mais freqüentes são a perda de referência (desajuste do set-point), instabilidade operacional, perda de estanqueidade e o desgaste dos componentes.

3.1.2.3. Válvulas de Bloqueio - Registros

Num sistema de abastecimento, é fundamental a presença de válvulas de bloqueio, pois quando surgem manutenções corretivas e/ou as preventivas no sistema de distribuição, torna-se necessária a interrupção do fluxo. Em geral, estão presentes no sistema em grande número, de tal forma que pequenas extensões de trechos do sistema possam ser isolados. Normalmente os registros de parada são colocados em locais estratégicos, conseguindo o bloqueio do fluxo apenas em pequenas áreas, não comprometendo o restante do sistema, principalmente durante reparos e manutenções. Entre os diferentes tipos de registro, o de gaveta é amplamente usado por apresentar emprego satisfatório, boa estanqüidade quando submetido a altas pressões, pequena perda de carga quando totalmente aberto e robustez.

As válvulas de descarga, como são conhecidos, também são registros de gaveta. São colocados nos pontos baixos da linha adutora, com o intuito de permitir o escoamento no trecho, quando se faz necessário o reparo, manutenção preventiva ou a desinfecção do sistema de adução.

3.2. Recursos e Ações de Gestão dos Sistemas de Abastecimento de Água

Os sistemas de abastecimento de água, com o passar dos anos, necessitam de ações que o tornem eficientes novamente. O estado de ineficiência ocorre quando não conseguem mais cumprir a missão para os quais foram projetados, ou seja, de satisfazer as necessidades de seus consumidores em termos de quantidade e qualidade de água aceitáveis, bem como, a qualidade e o preço dos serviços prestados.

Fica claro que a importância da reabilitação está intimamente ligada à diminuição do custo operacional, aumentando a segurança e a confiabilidade dos serviços prestados, através de medidas que retardem ao máximo os investimentos em futuras expansões e possibilitem planejamento cauteloso das futuras ampliações do sistema, uma vez que os recursos financeiros são escassos.

É importante esclarecer a terminologia a ser utilizada, já que é relativamente nova dentro do setor de abastecimento no contexto nacional. O objetivo é que o conceito traduza o sentido de melhoria dos sistemas existentes, resultante de intervenções físicas. Medidas com relação à operação e manobra dos sistemas são entendidas como controle operacional e não serão abordadas neste trabalho. Entende-se portanto, que a reabilitação física do sistema propiciará condições que permitam melhoria no controle operacional de forma integrada.

Como medida tomada para reabilitação pode ser feita a ampliação física do sistema. A ampliação é aplicada em casos onde a substituição ou troca de tubulação, válvulas, bombas, etc., não resultam na melhoria significativa do sistema. Pode-se dizer então, que a ampliação complementa o conceito de reabilitação física do sistema. Também podem ocorrer medidas restauradoras durante o processo, visto que, restauração significa restabelecer, reparar, consertar, recuperar algo que anteriormente apresentava condições satisfatórias quanto ao seu funcionamento, e que já não apresenta mais.

Com isso, entende-se que o conceito de reabilitação de sistemas de abastecimento de água poderá estar intimamente ligado ao conceito da ampliação e restauração, dependendo da condição em que se encontra o sistema a ser analisado. A intervenção física no sistema tem o intuito de alcançar o desempenho hidráulico, estrutural ou funcional nos sistemas de abastecimento existentes, e isso poderá implicar em mudanças da sua condição física e/ou especificação técnica.

3.2.1. Conhecimento do Sistema

Uma auditoria é indispensável para o conhecimento do sistema de abastecimento, possibilitando dessa maneira diagnosticar adequadamente os pontos deficientes, identificar as medidas necessárias a implementar para reabilitação do sistema e propor alternativas. Durante a análise de viabilização de recursos financeiros para ampliação do sistema de 14 empresas de saneamento no País, o BANCO MUNDIAL (1998) concluiu que algumas medidas teriam que ser tomadas para diminuir o custo operacional e aumentar a liquidez das empresas, e sugeriu as seguintes providências:

- ✓ Instalação de macromedidores e hidrômetros;
- ✓ Pitometria;

- ✓ Programas de conservação de energia;
- ✓ Exame e atualização dos cadastros técnico e de consumidores;
- ✓ Substituição de tubos e conexões fora de padrão;
- ✓ Descentralização da função gerencial e operacional;
- ✓ Atualização e revisão dos sistemas financeiro e comercial;
- ✓ Exame e retificação das perdas físicas;
- ✓ Treinamento dos profissionais.

3.2.1.1. Micro e Macromedição

A finalidade da colocação de macromedidores no sistema é a obtenção, processamento, análise e divulgação de dados operacionais relativos à vazão, pressão e níveis de água nos sistemas de abastecimento. A definição da localização dos pontos onde serão instalados os macromedidores é de suma importância, pois permitirá maior conhecimento das deficiências do sistema.

A inexistência de micromedição adequada é um dos fatores responsáveis pela ineficiência operacional e comercial dos sistemas de abastecimento de água (VENTURINI, 1997). Para SARZEDAS *et al* (1999), a utilização da micro e macromedição, a utilização de dados cadastrais e ferramentas como o “dataloggers” de pressão foram essenciais no estudo de perdas físicas aplicados em 20 setores de abastecimento considerados mais críticos, em termos de perda física, da Região Metropolitana de São Paulo.

A micromedição tem a função de assegurar a cobrança justa dos serviços, uma vez que se baseia efetivamente na quantidade consumida. Adicionalmente, a micromedição vem coibir o desperdício de água, além de atingir objetivos sociais, técnicos e financeiros, (SABESP, SEDU/PR – PMSS, 2001).

3.2.1.2. Pitometria

A implantação do serviço de pitometria permite que seja feito o exame físico do sistema de distribuição, pois a pesquisa pitométrica é usada para diagnosticar o comportamento hidráulico de partes do sistema de distribuição, do ponto de vista das características de eficiência e operação. A principal finalidade da pesquisa é coletar dados básicos de operação sobre os quais as decisões incidirão, na tentativa de eliminar o desperdício, aumentar a eficiência e evitar a manutenção precária. Vários estudos podem ser realizados através da análise pitométrica: estudo da setorização, pesquisas destinadas à redução das perdas, determinação eficiente do conjunto moto-bomba, determinação da capacidade de transporte de linhas adutoras, e outros.

3.2.1.3. Cadastro Técnico da Rede e Demais Componentes

O cadastro técnico da rede de distribuição representa uma etapa indispensável para a operação e manutenção da mesma, particularmente no controle e operação do sistema de abastecimento, além de auxiliar nas tarefas de detecção, localização e reparo das fugas ocorridas no sistema. As empresas de saneamento devem prever uma rotina técnica e administrativa destinada à elaboração e atualização do cadastro do sistema de abastecimento. A principal dificuldade encontrada é que a maioria das empresas tem somente parte da rede cadastrada.

Antigamente, encarregados da execução e até mesmo os projetistas desconheciam a sua importância do cadastro pois eles mesmos eram grandes conhecedores do sistema. Com o rápido crescimento, as empresas começaram a constatar que sem um cadastro atualizado e confiável seria impossível fazer manutenção, planejar ampliações e tratar as anomalias surgidas com maior freqüência. No Brasil, as técnicas de localização de acessórios e de tubulações enterradas são pouco utilizadas. De acordo com a ocorrência de manutenção é que as empresas estão

cadastrando as redes antigas, registrando diâmetro, material utilizado, localização física e formando um cadastro anteriormente inexistente.

As empresas têm que se conscientizar dos benefícios obtidos com a manutenção do cadastro atualizado e, dentre eles podemos citar: (a) redução do custo com a manutenção (uma vez que há maior rentabilidade na execução dos serviços pelo pessoal encarregado, devido ao menor tempo gasto na localização da tubulação no subsolo, evitando escavações desnecessárias) e, (b) disponibilização de dados confiáveis necessários para aplicação de ferramentas como por exemplo, modelos de otimização e simulação, que auxiliam no controle operacional e análise de medidas que reabilitem o sistema.

Na visão da SABESP, uma série de fatores altamente negativos podem ser evitados com a implantação de um sistema cadastral eficiente: perdas de água pela dificuldade de localização da rede em casos de vazamentos; serviços desnecessários de aberturas e fechamentos de valas, bem como a reposição de pavimentação; serviços de manutenção, execução de ampliação de redes e novas ligações baseadas em informações verbais, e portanto nem sempre confiáveis; faltas de dados cadastrais de unidades operacionais que subsidiam estudos de ampliações e melhorias além do desgaste da imagem da empresa perante a opinião pública (SEDU/PR – PMSS, 2001).

3.2.1.4. Cadastro dos Consumidores

O cadastro dos consumidores e a pitometria são considerados como ferramentas de apoio necessárias para o controle operacional. A pitometria aponta a deficiência hidráulica e o cadastro dos consumidores possibilita conhecer a demanda do sistema e entender a dinâmica de crescimento, que inevitavelmente incidirá na operação do sistema. Preocupados com a deficiência do sistema adutor metropolitano, com o crescimento da demanda, aliada ao grande número de solicitações de ligação de

água, FALCÃO *et al.* (1989), do Departamento de Operação e Controle da SABESP (responsável pela ligação de água a grandes consumidores, conjuntos habitacionais e indústrias) desenvolveram um software para cadastrar as informações de pedidos e a evolução das vazões concedidas, e desenvolveram alguns critérios de julgamento na sua liberação. Essa medida possibilitou maior conhecimento do sistema, e deu suporte a ações que buscavam a sua reabilitação, tais como, duplicação da rede, substituição do diâmetro das tubulações, colocação de “booster”, construção de reservatórios, e etc.

Segundo ZAHED FILHO (1990), o conhecimento da demanda é o fator primordial que caracteriza a possibilidade da busca da eficiência do sistema de abastecimento de água. Alguns benefícios são conseguidos com o cadastro atualizado dos consumidores tais como: permite a correta identificação e exata localização do usuário, fornece todas as informações necessárias acerca dos consumidores ativos, factíveis e potenciais; constitui elemento de apoio a outros sub-sistemas do sistema comercial, atendimento a público, etc além de assegurar maior agilidade e maior confiabilidade dos dados, (SEDU/PR – PMSS, 2001)

3.2.1.5. Recursos Humanos

A escassez de recursos humanos com a adequada formação técnica/profissional, constitui-se fator relevante que implica em prejuízo à garantia da qualidade dos serviços prestados. A insuficiência de recursos humanos é um dos principais problemas das empresas brasileiras de saneamento. Sabe-se que há uma carência de pessoal qualificado, até mesmo com formação básica, como também de profissionais especializados. É evidente a ausência de uma política de reciclagem na formação dos profissionais, treinamento e atualização de novos conceitos relativos às atividades que desenvolvem.

Segundo RIGONATO (2002) a falta de recursos humanos inviabiliza a realização de alguns serviços que deveriam ser executados pelas empresas, como por exemplo, a manutenção preventiva nas válvulas do sistema de distribuição e finalizou: “a diretoria técnica da empresa, cargo político e, nem sempre do corpo técnico, não entende a real importância da equipe de manutenção da empresa”.

3.2.2. Estudo das Perdas

Atualmente, a maioria das empresas de saneamento têm se preocupado em controlar as perdas físicas ocorridas no sistema, pois o seu controle visa melhorar a eficiência física global do sistema, que é representado pelo índice de perdas, o qual pode ser expresso pela proporção entre o volume não faturado e o volume total produzido. Dada à importância do controle de perdas, as empresas de saneamento já podem contar com as linhas de financiamento específicas para desenvolver programas visando sua redução.

O problema das perdas de água e os instrumentos que permitem seu controle nos sistemas de adução e distribuição de água têm assumido papel importante na atual tendência a privilegiar a sustentabilidade dos serviços à população e a proteção ao meio ambiente. Segundo COVAS *et.al.* (1999), a mudança das condições climáticas nas últimas décadas e o aumento generalizado da temperatura tem agravado ainda mais a restrição de disponibilidade de água em muitos países. Em simultâneo, observa-se também o aumento do consumo doméstico e industrial. O controle e a redução de fugas torna-se uma prioridade para as entidades gestoras do sistema de abastecimento de água.

Mas o controle e a redução das perdas só será conseguido mediante a implantação de um sistema integrado que inclua a identificação, a caracterização, a detecção, a localização e a eliminação das mesmas e o permanente monitoramento do

sistema de abastecimento. Entende-se por vazamento a ocorrência de problemas operacionais no sistema de abastecimento, em que a água é perdida durante o processo, constituindo-se em água tratada e não faturada. São perdas físicas que incluem os volumes de água perdida por fugas nas juntas, válvulas e conexões, rupturas da tubulação ou extravasamento dos reservatórios. Já o desperdício ocorre por responsabilidade do consumidor, em situações tais como: torneiras pingando, válvulas de descarga com defeito, lavagem de calçadas, extravasamento da caixa d'água devido a defeito da bóia, e etc. .

De acordo com HIRNER *et al.* (1999) a quantidade de água perdida é um importante indicador da eficiência de uma entidade gestora, tanto em termos absolutos num dado momento, como em termos de tendência ao longo dos anos. Volumes anuais altos e com tendência para aumentar servem como indicador de ineficiência no planejamento e construção, bem como demonstram a deficiência a nível de manutenção e de operação do sistema. A quantidade de água efetivamente perdida num sistema de adução e distribuição varia de empresa para empresa, dependendo dos fatores locais devido às características topográficas e urbanísticas (cotas e características geotécnicas do terreno, comprimento da rede, número de ramais domiciliares) e dos fatores relacionados ao nível de manutenção e de operação do sistema (idade e estado das tubulações, materiais empregados, eficiência no controle de vazões, eficiência no controle das pressões excessivas, etc.).

Segundo VENTURINI (1997) as empresas de saneamento, nos últimos anos, têm se preocupado em conhecer e controlar os níveis de perdas existentes no sistema, buscando técnicas de operação que minimizem os vazamentos, e investindo em programas de conscientização de seus consumidores.

Outro fator que justifica o controle das perdas ocorridas no sistema é a escassez de recursos hídricos e/ou água bruta de boa qualidade, criando a necessidade, com o passar dos anos, de procurar mananciais com qualidades adequadas, nem sempre próximos aos centros urbanos, devido a atitude predatória das

administrações municipais, em relação à utilização intensiva dos rios, tornando-os coletores de esgotos. As conseqüências econômicas são progressivas e agravantes, uma vez que as cidades situadas rio abaixo terão custos maiores para o tratamento da água para o abastecimento, envolvendo gastos consideráveis de energia, e requerendo ainda mais, uma operação eficiente para a redução das perdas e do custo total com o abastecimento (VENTURINI, 1997). Neste contexto, para o planejamento de recursos hídricos na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí, o trabalho realizado pela JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA LTDA (JPE, 1992) concluiu que “... é *imprescindível que o controle das perdas de água seja implantado nos sistemas existentes como parte integrante do controle de operação, dentro da maior brevidade possível...*” (JPE, 1992).

Caracteriza-se pois, a conveniência e oportunidade da implantação de um Programa de Controle de Perdas com abrangência nacional, criando uma mentalidade dirigida para o problema e estimulando ações que reduzam suas causas. Essa medida permitiria ainda uma maior justiça social na cobrança e distribuição de água, com a redução dos custos de produção e distribuição de água, e melhorando o atendimento à demanda reprimida, principalmente na região periférica das cidades que é a mais sacrificada.

3.2.2.1. O Combate às Perdas

Conforme foi dito anteriormente, algumas medidas podem ser tomadas a fim de reduzir a níveis aceitáveis as perdas físicas ocorridas no sistema de abastecimento e diminuir o custo operacional. Na maioria, são medidas simples que não implicam em altos investimentos para colocá-las em prática, com retorno bastante significativo. A redução das perdas de 45% para 25% nas empresas de saneamento brasileiras resultaria na disponibilização de recursos da ordem de R\$ 1,0 bilhão por ano, considerando que o faturamento das companhias estaduais atingiu R\$ 5,1 bilhões em

1995. Portanto, esse recurso poderia estar sendo empregado na própria empresa aumentando sua eficiência e contribuindo para a preservação dos recursos hídricos.

Em Cingapura a redução de 10,6 para 6,2% de água não faturada gerou uma economia de 26 milhões de dólares, além de reduzir o custo com investimento programático e protelar investimentos de novos projetos de fundo de capital (ALLIANCE, 2002).

De acordo com estudo realizado por MEICHES (1984) um programa eficiente de combate às perdas envolve três medidas sucessivas:

Medidas preventivas: Visa evitar que as instalações e os equipamentos operem em condições precárias, o que aumentaria o risco de defeito e poderia trazer prejuízos à empresa. São medidas que têm a finalidade de prevenir a ocorrência de perdas e outros danos, fazendo freqüentemente inspeções nos acessórios e instalações;

Medidas corretivas: são todas aquelas atividades referentes à manutenção corretiva das instalações e equipamentos que passaram a apresentar alguma anomalia afetando o abastecimento. Normalmente estas medidas são tomadas a partir da detecção de fugas no sistema, como por exemplo, reparo no vazamento da rede, reparos ou substituição de bóias controladoras de níveis nos reservatórios, defeitos em estações elevatórias, etc.

Pesquisa das perdas: são medidas que visam pesquisar as perdas ocorridas no sistema através da detecção e medição das fugas.

DEB (1991), comenta que as tubulações dos sistemas de abastecimento, principalmente no nordeste dos Estados Unidos, apresentam idade superior a 100 anos e a perda física do sistema varia de 25 a 50% da água produzida. Na cidade do

México, segundo YACH (2000), as perdas físicas giram em torno de 45%. SARZEDAS *et al.* (1999) comentaram que em 1993 um estudo realizado pela SABESP na Região Metropolitana, as perdas físicas foram quantificadas em 50% e recentemente, verificaram que nos setores Sacomã e Vila Alpina, conhecidos como setores de alta incidência de vazamentos, este percentual é de 70%.

Na grande maioria das empresas de saneamento, é freqüente a ocorrência de perdas ao longo do processo de captação até a distribuição final. Estas perdas podem chegar a valores de 40 a 70%, e o custo desse desperdício somado às fugas com ligações clandestinas é repassado ao consumidor na forma de tarifa. Além de onerar o serviço, as administrações públicas esquecem de contabilizar provimento para futura expansão do sistema. Novamente o consumidor será penalizado, pois o sistema atinge o gargalo quanto à sua capacidade, que desse modo, terá que conviver com situações de déficit no abastecimento de água.

A SABESP tem investido na melhoria das ações operacionais e no conhecimento de novos conceitos, metodologia e tecnologia para a obtenção de redução dos índices de perdas. Isto foi conseguido devido a implantação de válvulas redutoras de pressão inteligentes, a utilização de equipamentos sofisticados na detecção de vazamentos visíveis e não visíveis, o emprego de equipamentos mais acurados para medição do consumo e a implantação de uma nova sistemática de atendimento comercial (SEDU/PR – PMSS, 2001)

Com o objetivo de reduzir as perdas ocorrida no sistema, o Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE), em Porto Alegre, começou a utilizar o PEAD. Em 2000 o DMAE tratou 183 milhões de metros cúbicos de água, dez milhões a menos que em 1991, o que permitiu o abastecimento de 200 mil novos consumidores. Conforme comentado por FLORES (2003) as grandes extensões das tubulações de PEAD e o as juntas soldadas permitiram a redução de perda a zero, no setor de abastecimento de água. O percentual de perda água global diminuiu de 50% para 34%, no período de 1991 a 2000. A redução foi representativa, ou seja, 34 bilhões de litros de água tratada, antes desperdiçadas em vazamentos, puderam ser entregues à população.

Na CAGECE – Fortaleza, teve início em 1983 o Programa de Controle Operacional, no qual começou desenvolver dentro da própria empresa a conscientização sobre a necessidade do combate a perda de água, até então estimada entre 50 e 60%. O programa começou a automatizar algumas unidades do sistema. Em 2001, o índice de perda física ficou em torno de 33% e o objetivo do programa era atingir até 2002, patamares de 25% (SEDU/PR – PMSS, 2001). ARAÚJO e MONTENEGRO (2002) comentaram que na cidade de Juazeiro, no estado da Bahia, foi realizado um projeto de combate a perda da água do Plano Nacional de Combate ao Desperdício de Água, uma vez que os índices de perdas atingiram 71%. Já na Região Metropolitana de Recife o volume de água não contabilizada é da ordem de 50%.

Preocupado em conhecer e estudar ações que minimizem as perdas ocorridas nos sistemas de abastecimento MEICHES (1984) levantou as causas, e citou os principais fatores de perdas dentro de cada unidade do sistemas de abastecimento de água (Tabela 3.1) facilitando a tarefa de planejar medidas para reabilitação dos sistemas.

Tabela 3.1: Fatores de perdas nas unidades do sistema de abastecimento de água.

Unidades	Fatores de Perda	Causas
<i>Estação De Tratamento De Água</i>	• Vazamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Problemas Estruturais ➤ Corrosão ➤ Vedação Defeituosa ➤ Qualidade dos Materiais
	• Extravasamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dificuldades Operacionais ➤ Falhas de Instrumentação
	• Consumos Operacionais Excessivos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lavagem de Filtros e Decantadores
<i>Estações Elevatórias</i>	• Vazamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Problemas Estruturais ➤ Vedação defeituosa ➤ Golpes de Ariete
	• Extravasamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dificuldades Operacionais ➤ Falhas de Instrumentação
	• Consumos Operacionais Excessivos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Válvulas Anti-Golpe de Ariete ➤ Descarregando Livremente
<i>Adutoras</i>	• Vazamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transientes Hidráulicos ➤ Problemas Estruturais ➤ Vedação ➤ Corrosão ➤ Qualidade do Material
	• Consumos Operacionais Excessivos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Negligência do Material ➤ Descargas Operacionais
<i>Reservatórios</i>	• Vazamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Problemas Estruturais ➤ Vedação ➤ Corrosão
	• Extravasamento	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Deficiência Instrumental ➤ Dificuldades Operacionais
	• Consumos Operacionais Excessivos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lavagem e Desinfecção
<i>Redes De Distribuição</i>	• Vazamentos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pressão Elevada ➤ Material Inadequado ➤ Juntas ➤ Manobras Inadequadas ➤ Problemas Estruturais
	• Consumos Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Descargas Operacionais ➤ Negligência Construtiva

Fonte: MEICHES (1984)

3.2.2.2. Automação dos Sistemas

A automação dos sistemas de abastecimento se faz necessária, pois a operação de sistemas em tempo real é uma tarefa bastante complexa, e vem recebendo atenção especial, face à necessidade de garantir a confiabilidade no atendimento dos serviços, redução do custo operacional, principalmente associado a energia elétrica e manutenção do sistema, retardando investimentos para a expansão dos sistemas (ZAHED FILHO, 1990).

Segundo ERICSSON (1989), ao contrário do que acontece em países desenvolvidos, a automação das empresas de saneamento brasileiras, têm-se mostrado tímida, geralmente limitadas à automação das elevatórias. O controle operacional do sistema de distribuição de água, na maioria dos casos existentes, se faz transmitindo informações de alguns dados de locais onde os operadores julgam e emitem ordem para atuar. Esse processo só é viável em sistemas de pequeno porte, pois em sistemas de médio e grande porte essa operação se torna inviável. Operar um sistema é reunir um grande número de informações, analisá-las e tomar decisões a tempo de evitar seu desequilíbrio, que seria traduzido em deficiência no atendimento ao usuário.

Segundo ZAHED FILHO (1990), com a consciência da falta de controle automático e na tentativa de implementá-los, muitas empresas de saneamento estão buscando o Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) a fim de melhorar a operação dos sistemas. O controle automático dos sistemas demonstra, em certos casos, a redução de custos operacionais e aumenta a segurança e a confiabilidade, permitindo obter dados essenciais no planejamento da futura expansão do sistema. Mas o inconveniente desse controle SCADA, segundo ERICSSON (1989), reside no fato de exigir computadores de grande porte, cujo custo, muitas vezes, se torna inviável ao empreendimento. Já com a utilização de estações remotas inteligentes (Controladores Lógicos Programáveis - PLC), consegue-se adquirir, analisar dados e

comandar a operação do sistema, reduzindo os investimentos sem prejuízo da qualidade do produto final.

KRAVOSAC *et al.* (1999) comentam que as técnicas de otimização aliadas à automação dos procedimentos operacionais, possibilitam além do ganho na qualidade do processo, a redução dos custos com energia elétrica e custos operacionais, pois evitam perdas ou gastos com manobras desnecessárias ou impróprias na operação do sistema de abastecimento. Também ressaltam, que além da redução dos custos operacionais, contribuirão para a conservação dos mananciais e da energia elétrica.

Para ALLAN *et al.* (1998) os benefícios trazidos na utilização do sistema SCADA na operação da rede de distribuição estão intimamente ligados ao aumento da eficiência, desenvolvimento dos operadores, à velocidade de resposta das manobras, otimização do controle das operações e, principalmente, à disponibilidade de informações gerenciais atualizadas num formato que facilita sua utilização. Mas na visão de SKARDA (1994) a associação de bancos de dados eletrônicos, sistema de controle e os sistemas de informações geográficas são atualmente recursos universais indispensáveis para análise de desempenho, especialmente para a operação, manutenção, planejamento, projeto e gerenciamento de rede, tornando-se ferramentas indispensáveis no planejamento das estratégias de gerenciamento e reabilitação do sistema.

As vantagens conseguida com a automação do macrosistema de distribuição de água de Fortaleza, a partir das informações geradas individualmente pelas 27 unidades de controle remoto localizadas nas unidades operacionais, foram elencadas pela CAGECE (SEDU/PR – PMSS, 2001):

- ✓ Redução das perdas físicas e comerciais;
- ✓ Redução do consumo de energia elétrica face a otimização do conjunto moto-bomba;
- ✓ Padronização dos procedimentos operacionais;

- ✓ Obtenção de dados confiáveis;
- ✓ Agilidade nas tomadas de decisão devido a capacidade de atuar os dispositivos em tempo real.

3.2.2.3. Setorização do Sistema de Distribuição

A complexidade física e a vasta extensão das redes de distribuição, concentram as maiores dificuldades na realização da manutenção e no controle operacional. Por isso, as empresas de saneamento tem aplicado a setorização em seus sistemas. Os setores são divididos de acordo com as zonas de pressão, que são obtidas a partir dos reservatórios apoiados ou elevados ao qual estão ligados, limitando em cada subsistema as pressões dinâmicas e estáticas a valores mais adequados. Mas, existe a necessidade da interligação entre os setores, possibilitando desse modo, que manobras de emergência e outras medidas técnicas operacionais sejam realizadas.

A setorização do sistema de distribuição permite estabelecer condições mais adequadas à distribuição e ao atendimento aos consumidores, e propiciar um controle eficiente no combate às perdas. A instalação de macromedidores nas linhas alimentadoras tem o objetivo de registrar o volume fornecido ao sistema e, pela diferença entre o somatório das leituras registradas nos hidrômetros (micromedidores), pode-se calcular a perda física ocorrida na distribuição de cada setor e conhecer o índice de perdas. Deste modo é possível detectar quais são os setores prioritários nas ações de combate a perdas.

Um dos principais benefícios trazido pela setorização foi apontado por DANTAS *et. al* .(1999), num estudo feito na Asa Norte, situada no Plano Piloto em Brasília, com o intuito de reavaliar a setorização do sistema. A reavaliação da setorização evitou a construção de uma segunda adutora que estava projetada para a

referida unidade de distribuição, com diâmetro de 800 mm e extensão de 3400 m, conseguindo com essa medida economizar 2 milhões de reais em obra.

A SABESP considera um fator determinante as grandes perdas físicas ocorridas nas redes e nos ramais prediais, nas zonas de alta pressão. Por isso, sentiu a necessidade de efetuar estudos de ressetorização das redes de distribuição (SEDU/PR – PMSS, 2001).

3.2.2.4. Sistema de Informação Geográfica

O estudo e análise do comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água exige o manejo de uma grande quantidade de informações que contém as informações físicas dos elementos do sistema, econômicas e informações espaciais. Os sistemas de informações geográficas (SIG) têm o objetivo de conectar as informações contidas em um banco de dados a uma base geográfica, atuando como um sistema de gerenciamento de dados georeferenciados, integrando as funções dos diferentes subsistemas de gerenciamento no abastecimento de água. O SIG permite que sejam manejadas diferentes informações da base de dados e possibilita:

- ✓ Sistema de gerenciamento de informações que mantém, atualiza e gerencia as alterações na base de dados do SIG;
- ✓ Sistema de informações de clientes que registra os serviços de ligação, leitura , faturamento, reclamações, avarias e etc.;
- ✓ Sistema de operação e manutenção da rede, que contempla as operações diárias, manobras, pressões, demanda, análise hidráulica, e etc.;
- ✓ O planejamento de projetos e implantação de novas obras;

- ✓ Gerenciamento da infraestrutura através do inventário atualizado dos elementos que compõe o sistema favorecendo a execução da manutenção corretiva e preventiva;
- ✓ Gerenciamento operacional e controle de perdas através da busca prováveis defeitos na rede;
- ✓ Gerenciamento de informações econômicas e financeiras que são fundamentais para a garantia da eficiência dos serviços prestados;
- ✓ Planejamento de investimento em reabilitação.

O SIG é uma ferramenta de grande potencial quando utilizado corretamente. GLASBROOK (1994) comentou que, na maioria das localidades do Reino Unido que já tiveram alguma experiência com a utilização do SIG, quer seja em nível de plano piloto ou de implementações completas, as empresas não estão extraíndo todos os recursos possíveis do sistema, encontram-se ainda em estágio de aquisição e verificação de dados. Até aquele momento, foi conseguido somente o progresso no gerenciamento de informação básica como por exemplo, na atualização e produção de mapas. A expectativa de obtenção dos dados, eliminação de registro em papel e compartilhamento de dados com outros setores da empresa ainda não haviam sido concretizados. Segundo aquele autor, algumas vantagens na utilização do SIG foram: economia com relação aos gastos com registros em papéis para todos os departamentos; melhoria no gerenciamento das informações e metas, que resulta em melhoria nos programas de investimento; redução dos custos de pessoal relacionados com a atualização de registros manual; maior compreensão e por isso maior eficiência na utilização das informações espaciais, por exemplo frequência de rompimento das tubulações, número de reparos, etc.; economia nos departamentos de engenharia, planejamento e projeto resultante das informações seguras e o fácil acesso e finalizou dizendo que o SIG proporciona melhoria no gerenciamento operacional pela possibilidade fazer possíveis conexões com outros sistemas, como exemplos, banco de dados dos usuários, telemetria, arquivos de qualidade de água, etc.

RAY e MATTHEWS (1996) comentaram que a Anglian Water Services Ltd. é uma companhia que administra 10 empresas de abastecimento de água, supervisiona um complexo sistema de distribuição no Reino Unido que contempla 30000 Km em tubulações, 215 reservatórios de distribuição, 180 reservatórios elevados, 234 estações de bombeamento, fornece água a 3,5 milhões de consumidores. Devido à complexidade da operação, em meados dos anos 80 o SIG foi implantado na companhia e as seguintes habilidades foram observadas: a fácil conexão dos dados obtidos no sistema de telemetria e de outros monitoramentos com as informações das metas permite o monitoramento contínuo dos vazamentos; a facilidade de analisar a qualidade da água fornecida associada a eventuais ocorrências de rompimentos e manutenção vem ajudar a compreender o atual nível de serviço e identificar as prioridades para reabilitação e finaliza que a principal vantagem do software pode ser traduzida pela disponibilidade dos dados de todo o sistema a qualquer departamento da empresa.

RAY e MATTHEWS (1996) comentaram também que a Anglian Water tem o maior e mais abrangente sistema de telemetria da Europa e possivelmente do mundo. Aproximadamente 7000 estações monitoram os equipamentos que provêm as informações que a empresa precisa para gerenciar efetivamente seus negócios. Fornece níveis de água dos reservatórios, monitoração da vazão e da pressão na distribuição, estado operacional da bomba e o tempo de funcionamento, nível de cloro residual e alarme para responder prontamente os problemas.

3.3. Potencial de Melhoria dos Sistemas de Abastecimento

Com o passar dos anos, o processo de deterioração das estações de tratamento ou de bombeamento se torna visível em muitos sistemas. A falta de manutenção preventiva e investimentos em novos equipamentos são responsáveis pela operação deficiente, ocasionando custos altos da operação do sistema.

É aconselhável que, durante o processo de reabilitação, quer seja de estações de tratamento, bombeamento ou qualquer outra parte do sistema, seja feita uma cuidadosa avaliação a fim de identificar os problemas e encontrar as alternativas de reabilitação. Uma vez estabelecidas as alternativas devem ser examinadas, priorizadas, realizado o levantamento do custo de cada alternativa e análise do custo comparativo antes de ser tomado um plano de ação.

Quando os sistemas começam a operar com deficiência, medidas como substituição, restauração, ampliação e renovação são necessárias de modo a torná-los eficientes. No entanto, planejar as medidas que deverão ser tomadas e associar o custo-benefício proporcionado, é tarefa de razoável complexidade (HOOGSTEEN,1993).

A seguir são apresentados comentários específicos sobre o potencial de melhoria através da reabilitação dos diversos componentes do sistema de abastecimento de água. No capítulo seguinte (cap. 4) serão detalhados os aspectos específicos da reabilitação das redes de distribuição de água.

3.3.1. Estação de Tratamento

O crescimento da população e a deterioração da qualidade dos recursos hídricos têm exigido avanços no tratamento de água potável, impondo que as estações de tratamento de água sejam periodicamente expandidas, atualizadas, reabilitadas e modernizadas. A reabilitação da estação de tratamento possibilita o aumento da capacidade e a melhoria operacional. WALSKI (1987) fez comentários sobre a necessidade e as vantagens da reabilitação das ETAs e as principais argumentações são apresentadas:

✓ A necessidade do aumento da capacidade da estação de tratamento está associada principalmente à crescente demanda da água servida ou à diminuição da capacidade de operação devido ao tempo gasto com manutenção ou reparo. A reabilitação pode aumentar a capacidade da estação além da capacidade do projeto original. Esta é a alternativa mais econômica quando comparada à construção de novas estações. Em alguns casos, para se obter o aumento da capacidade, adaptações de componentes existentes podem ser usados em uma nova função.

✓ A baixa confiabilidade dos equipamentos pode contribuir para problemas de capacidade ou qualidade da água fornecida, aumentando os custos com manutenção e operação. Equipamentos de baixa confiabilidade são aqueles que apresentam interrupções freqüentes que podem ser causadas por quebra ou fadiga, sobrecarga elétrica, altas temperaturas, pressão ou vibração. Equipamentos pouco confiáveis podem contribuir para o aumento de problemas durante o processo de tratamento tais como: a dificuldade no controle principalmente quando há alteração na qualidade da água captada, problemas hidráulicos, curto circuito, inundação, controle de nível inadequado, falta de flexibilidade que não permite adaptação a todas as situações, ou problemas sazonais e a incapacidade para responder a emergências de contaminação da água natural.

✓ A redução do custo de operação e manutenção, visto que, quando se pensa em alternativas de reabilitação, essas alternativas visam a conservação de energia, redução do uso de produtos químicos, redução das necessidades de operadores, através da automação ou melhoria no processo, a troca dos produtos químicos utilizados por produtos químicos de mais baixo preço e efeito equivalentes.

✓ Quando um programa de melhoria está sendo planejado existe também a oportunidade de reduzir os riscos associados à segurança durante a operação da estação. A avaliação da estação deve incluir a verificação das condições de segurança e trabalho, conformidade da empresa com a legislação aplicável, habilidade para conter derramamento de produtos químicos e riscos de vazamento.

ISLEB (1999) descreveu medidas que foram tomadas com intuito de reabilitar o sistema de abastecimento de água em Sussex, Wisconsin. Essas medidas possibilitaram a satisfação dos usuários, incluindo até a adequação da estação de tratamento antiga às fachadas dos prédios vizinhos. A empreiteira dividiu o projeto em três partes: a estrutura da estação de tratamento recebeu reforma, pintura e substituição de toda fiação elétrica externa e interna. Foi construído um tanque pneumático para diminuir os constantes problemas com a oscilação hidráulica da rede e também, foram instaladas válvulas de controle. Por fim, foi construída uma sala de química com balanças digitais e equipamentos de cloração para garantir a melhor qualidade da água.

3.3.2. Estação de Bombeamento

Na visão de WALSKI (1987), quando existe a possibilidade de reabilitação da estação de bombeamento, deve-se considerar uma gama de objetivos que podem ser selecionados como sendo os mais importantes. Normalmente, a reabilitação de uma estação de bombeamento pode aumentar a capacidade do sistema de distribuição para além da capacidade projetada originalmente. Isto pode ser conseguido com a adição de bombas, substituição de bombas ou a simples troca de rotores. Comentou também que é aconselhável manter um inventário atualizado dos equipamentos, o que possibilita o benefício imediato na decisão de melhoria ou substituição desses, além do ganho adicional conseguido através da redução dos custos operacionais e de manutenção. Apontou vários componentes que devem ser inventariados tais como: bombas, válvulas e tubulações, os quais exigem cuidados diferenciados para uma operação contínua e confiável. Afirmou que a manutenção preventiva é considerada um elemento chave de uma estação de bombeamento. Neste contexto, comentou alguns dos benefícios conseguidos com a reabilitação, tais como:

✓ Aumento da capacidade operacional do sistema, garantindo com isso o aumento do uso de água devido ao aumento da população ou expansão da área de serviço.

✓ Melhoria da confiabilidade da estação, pois equipamentos não confiáveis podem gerar problemas de capacidade e pressão de trabalho, além de ser excessivamente caro operá-los ou mantê-los. Equipamentos não confiáveis podem incluir: equipamentos que sofram interrupções mecânicas freqüentes devido aos componentes defeituosos ou pela falta de um programa de manutenção adequado, ou causado por freqüentes desligamento dos motores devido à temperatura excessiva, pressão, vibração e etc.

✓ Redução dos custos operacionais e de manutenção pode ser conseguida através da conservação de energia, da redução do número de operadores através da automação dos sistemas, da redução da manutenção através da reabilitação ou substituição do equipamento.

✓ Manter bombas reserva e geradores são atualmente considerados equipamentos padrão para critérios de desempenho e confiabilidade. As interrupções de bombeamento devido à queda de energia podem ser muito caras, especialmente se ocorrer durante uma emergência de incêndio ou durante os picos de demanda. Em áreas onde sistemas de distribuição são pressurizados, geradores de energia devem estar à disposição.

✓ Melhorar a segurança dos funcionários através da adequação da estação com as seguintes medidas: substituição de painéis eletrônicos que estão fora de normas e redução do nível de ruídos especialmente nas salas de controle, etc.

Durante a operação da estação de bombeamento, uma situação crítica apontada por HIRATA *et al.* (1999) é ocasionada pela interrupção instantânea do fornecimento de energia aos motores de acionamento das bombas, acarretando a

diminuição da rotação da bomba e da vazão na linha de recalque adjacente à bomba, dando origem a formação de ondas de sub-pressão que se propagam rapidamente na tubulação em direção ao ponto de descarga. Dispositivos de proteção contra golpe de aríete são indicados, agindo no controle de vazões e, principalmente, de pressões. Comentou também que, a instalação de chaminé de equilíbrio, tanque alimentador hidropneumático e volante de inércia podem ser usados combinando um ou mais dispositivos, quando o intuito é proteger a linha de recalque.

3.3.3. Reservatórios

O reservatório de distribuição de água tem a função de regularizar as variações ocorridas entre as vazões de adução e de distribuição além de condicionar as pressões na rede de distribuição. TSUTIYA (1999) descreveu a importância do dimensionamento correto da saída de água dos reservatórios, pois é nela que acontece os fenômenos hidráulicos referentes à formação de vórtices. A entrada de ar através dos vórtices poderá acarretar problemas tais como: a diminuição da vazão nas adutoras, redução da capacidade de armazenamento do reservatório, diminuição da eficiência da vazão bombeada, vibração e cavitação na bomba.

Com o objetivo de aumentar a capacidade dos centros de reservação do sistema adutor metropolitano de São Paulo, PRADO *et al.* (1999) analisaram a eficiência da reservação com base nos índices de rendimento da reservação e ocupação dos reservatórios, através do estudo da influência dos limites operacionais. Concluíram que, 21% dos reservatórios estudados apresentavam situação crítica de reservação e 25% do total tinham baixo índice de aproveitamento. A possibilidade de alterar os limites operacionais dos 115 reservatórios analisados permitiu estimar um ganho de 260.000 m³, com a fixação de um novo limite baixo em 0,60 m, garantindo as condições ideais de funcionamento. Ressaltam que as alterações sugeridas permitirão obter um volume necessário para suprir as demandas de um setor e, em outros setores

irão conseguir postergar ou reduzir a ampliação da área construída (reservação), além de permitir maior flexibilidade operacional.

WALSKI (1987) cita HOFFMAN (1983) que alerta que a seleção do material correto é essencial e comenta que, a argamassa de epóxi e argamassa à base de fosfato de magnésio são caras e têm qualidades de alta adesividade, ressaltando que são boa escolha para aplicações finas, onde a alta adesividade é importante. Porém quando existe a necessidade de reparos mais profundos, a escolha melhor seria a opção de concreto com epóxi ou concreto de fosfato magnésio que têm custo menor e são mais compatíveis com o concreto já existente. Existem no mercado vários tipos de epóxi que permitem uma maior aderência na aplicação do concreto novo ao concreto velho.

Como comentado anteriormente, são encontrados vários materiais diferentes para o reparo da obra de concreto. Eles incluem polímeros, epóxi para utilização em concreto ou argamassa, concreto a base de fosfato de magnésio. RODRIGUES (2000) comentou que para recuperar os reservatórios que apresentam problemas de vazamento, na SANASA, uma resina de epóxi foi aplicada no sentido contra fluxo na trinca do reservatório, impedindo a fuga de água. Neste caso, a resina tem comportamento semelhante ao de uma junta de dilatação. A aplicação da resina nas trincas no interior do reservatório de água pode ser observada na Figura 3.4.



Figura 3.4: Aplicação de resina em trinca de reservatório

Como manutenção preventiva é realizado periodicamente uma avaliação das perdas físicas ocorridas nas juntas de dilatação da estrutura e da parte hidráulica dos reservatórios. No reservatório Taquaral, na cidade de Campinas, o vazamento ocorrido na junta de dilatação, foi contabilizado em 10 l/s, e a economia gerada com o reparo permite o abastecimento de 4.438 hab/dia (Relatório da SANASA, SEDU/PR - PMSS, 2001).

4. Reabilitação do Sistema de Distribuição

Neste capítulo o trabalho será centrado exclusivamente numa nova proposta para reabilitação de sistemas de distribuição de água. O objetivo é apresentar tecnologias capazes de intervir sobre o sistema em termos de reabilitação, que minimizem o impacto negativo da ação sobre os consumidores, no momento certo, através de tecnologias adequadas e custo aceitável. Durante a realização deste trabalho a autora realizou algumas visitas técnicas em canteiros de obras, o que possibilitou descrever com maiores detalhes e tecer comentários sobre técnicas aplicadas no Brasil.

Num sistema de abastecimento de água, a tubulação pode ser interpretada como um conjunto de tubos, conexões e acessórios, responsáveis pela condução da água sob pressão ao longo da rede de distribuição, atingindo os pontos de consumo. No entanto, as tubulações devem satisfazer algumas condições dentro do sistema de distribuição, ou seja: manter a qualidade da água; resistir aos esforços provenientes da sub-pressão ou sobre-pressão que podem acarretar o colapso da rede ou seu rompimento; resistir à corrosão interna causada pela água e externa causada pelo solo e minimizar vazamentos.

A ocorrência dos processos de sedimentação e incrustação prejudicam a operação dos sistemas. A sedimentação é o processo pelo qual partículas sólidas

decantam em águas que operam em baixa velocidade dentro da rede, acarretando a redução do diâmetro interno e, conseqüentemente, reduzindo a capacidade da rede. Freqüentemente ocorre em tubulações de água bruta, ou tubulações que conduzem água tratada de baixa qualidade que podem estar sujeitos a depósitos de areia, lama ou materiais orgânicos. Em casos extremos a sedimentação pode também contribuir para problemas hidráulicos, particularmente nos pontos mais baixos das tubulações.

As incrustações são um sub-produto da corrosão (tubérculos) misturados com depósitos minerais tais como: ferro, manganês e carbonatos. Antes dos anos 60, as tubulações eram instaladas sem o revestimento protetor nas superfícies internas. Essas tubulações não revestidas freqüentemente sofriam corrosão interna. A formação dos tubérculos pode variar de acordo com a composição química da água, apresentando comportamento diferente para as condições, desde a água muito mole até a água muito dura. A apropriação no tratamento da água não garantirá a presença do acúmulo de incrustação nas tubulações. A maior parte das incrustações pode ser removida através de processos de limpeza das tubulações que serão comentados posteriormente.

Quando as tubulações começarem a apresentar problemas no fornecimento de água, serão necessárias intervenções para que sejam solucionados os problemas. Parte do problema pode estar relacionada ao desempenho hidráulico, daí então, a necessidade de adotar medidas que minimizem o problema, ou seja, técnicas de reabilitação hidráulica. Mas quando o problema está associado à deterioração das instalações e equipamentos, faz-se necessária a reabilitação estrutural. Dependendo do grau de deterioração do sistema de abastecimento, a solução é a aplicação das duas técnicas simultaneamente.

As técnicas não estruturais são usadas quando o objetivo é: (a) melhorar ou recuperar as condições hidráulicas ou sanitárias; (b) reduzir vazamento e (c) proteger contra corrosão. As técnicas estruturais são usadas quando o objetivo é restaurar a integridade estrutural da tubulação melhorando sua resistência mecânica. O objetivo é aumentar a resistência da tubulação de maneira que ela seja capaz de suportar a

pressão à qual está sujeita, como por exemplo: cargas estáticas, cargas devido ao tráfego, condições hidráulicas estáticas, condições hidráulicas transitórias e movimentos da terra.

No Brasil, as técnicas estruturais são ainda pouco adotadas para a reabilitação das tubulações. Uma possível justificativa para a não utilização dessa técnica é a falta de mão de obra especializada para execução dos serviços, falta de conhecimento dessas técnicas ou ainda o preço. A opção adotada pela maioria das empresas de saneamento para sanar o problema é a substituição. Mas a rapidez na execução, a minimização dos transtornos causados pela remoção e substituição da tubulação, além do desconforto dos consumidores e população, não são devidamente considerados.

DYACHKOV (1994) comenta que, durante o planejamento da reabilitação dos sistemas de distribuição em Moscou, foram considerados dados dos registros de vazamentos, número de reparos e taxas de vazões. Para MICHALIK (1994), os dados estatísticos e as investigações pontuais são os melhores elementos para orientar e hierarquizar quais são os pontos principais dentro do sistema a serem reabilitados.

Preocupado com a falta de recurso financeiro e transtornos causados durante reparos na rede, O'DAY (1992) comentou que, nos anos 90, haveria necessidade de aumentar as atividades voltadas à reabilitação dos sistemas e que pesquisas seriam necessárias para melhorar as empresas de saneamento. Sugeriu algumas medidas tais como: a criação de técnicas para diagnóstico da tubulação, aperfeiçoamento de técnicas de escavação e repavimentação com o intuito de diminuir o transtorno causado nas vias públicas e, em contrapartida a melhoria na produtividade da manutenção.

Num sistema de distribuição, as tubulações são as que causam os maiores problemas. As causas mais frequentes foram citadas por HOOGSTEEN (1993):

- Altas pressões, variação de pressão aos transientes hidráulicos;

- Influências externas como tráfego e acidez do solo;
- Envelhecimento natural do material da tubulação;
- Alto índices de sedimentação nas tubulações da rede, devido a ineficiência da estação de tratamento (ferro, carvão ativado);
- Qualidade do material empregado nas tubulações.

4.1. Técnicas de Reabilitação de Tubulações

Durante a revisão bibliográfica foram apresentadas várias técnicas que podem ser utilizadas na reabilitação de tubulações dos sistemas de distribuição de água. As técnicas de reabilitação podem ser divididas em técnicas destrutivas e técnicas não-destrutivas. Neste capítulo são apresentadas as principais técnicas não destrutivas empregadas nos sistemas de distribuição do mundo.

4.1.1. Métodos de Limpeza das Tubulações

Durante o abastecimento de água é essencial que a qualidade da água seja garantida aos consumidores. Quando problemas com sedimentação e/ou corrosão ocorrem dentro das linhas de distribuição, a limpeza se faz necessária. É obrigatório o serviço de limpeza antes da execução da aplicação de qualquer tipo de revestimento, pois os detritos de corrosão devem ser removidos da superfície da tubulação.

4.1.1.1. Limpeza a Hidrojato

Para limpar tubulações com jato-hidráulico, um bico é colocado em uma mangueira que emite um jato de água a alta velocidade e alta pressão, que varia entre 300 e 400 mca. Para que a remoção ocorra, o jato d'água deve manter-se

suficientemente forte, sobre a camada de ferrugem ou depósito, a fim de rompê-lo, expulsando as partículas. Uma vez que a camada ou o material depositado é penetrado, o jato de água forma uma cunha entre o depósito e a superfície, arrancando o depósito e expondo a superfície limpa do metal. Durante a operação de jateamento as partículas expulsas são arrastadas no sentido do fluxo do jateamento, contribuindo efetivamente na remoção de outras partículas, funcionando como abrasivos. A principal vantagem deste método é a remoção de depósitos muito duros.

A SANASA empregou essa técnica durante algum tempo em suas redes de ferro fundido. Os operários relataram que nos locais onde o processo precisou ser refeito, a execução foi mais difícil pois, tinham a impressão que a incrustação estava mais dura. Além disso, o emprego dessa técnica, trouxe alguns transtornos durante a execução que foram apontados e comentados por RODRIGUES (2002), descritos a seguir:

- ✓ A necessidade de equipamentos auxiliares tais como a retro-escavadeira para abertura dos poços de acesso e o caminhão pipa para reabastecimento do sistema de hidrojato;
- ✓ Baixa produtividade, acarretando alto custo final;
- ✓ Durante a execução do serviço, há necessidade de o trecho da rede ficar fora de operação, o que provoca o desabastecimento do setor;
- ✓ Dificuldade de mobilização devido à dispersão dos serviços.

4.1.1.2. Raspadores Elétricos

São usados para limpar tubulações de grandes diâmetros. Uma variação desse método de limpeza é o uso de um raspador conduzido por um operador e alimentado eletricamente. Este raspador alimentado eletricamente incorpora escovas giratórias ou braços giratórios para limpar a tubulação. A principal vantagem desse método é a

habilidade dos operadores para avaliar a efetividade do processo de limpeza a medida que ele prossegue na tubulação.

4.1.1.3. Raspador Hidráulico

Os raspadores de arraste hidráulico são providos de lâminas de aço dispostas radialmente, hidráulicamente impulsionados através da tubulação, pelo bombeamento de água ou do uso de um sistema de pressão. Um reservatório deve estar disponível ao final da tubulação para separar e coletar os detritos de limpeza suspensos. Para cada diâmetro existe uma exigência de pressão e vazão necessária para impulsionar o raspador. Diafragmas colocados no corpo da peça controlam a passagem de água através do conjunto, enquanto uma válvula colocada a montante do trecho controla a vazão, e com isso, a velocidade do raspador. A turbidez da descarga final deve ser rigorosamente monitorada. Trechos extensos podem ser limpos em uma única operação, mas o despejo da água e dos detritos da limpeza podem ser problemáticos.

Segundo relatado por BALL (1992), à medida que o limpador se move, a tubulação se enche de água, provocando a saída dos detritos através da extremidade aberta da tubulação, segundo o esquema demonstrado na Figura 4.1. Desta forma, diminui sensivelmente a possibilidade dos detritos permanecerem presos à parede da tubulação, tendo como principal vantagem, a eliminação de possíveis queixas quanto à qualidade da água.

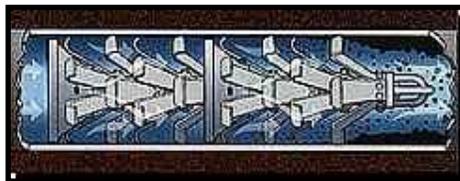


Figura 4.1: Raspador hidráulico

4.1.1.4. Método “Drag”

É um limpador provido de uma série de lâminas raspadoras de aço e rodinhos de borracha, puxado por um guincho posicionado ao nível da terra, através de um poço de acesso, distanciados entre si, no máximo 300 metros. O limpador é arrastado por um guincho, primeiro em uma direção e depois em outra até que a tubulação esteja suficientemente limpa. O conjunto de lâminas é articulado para permitir sua passagem por curvas de até 22,5 graus e traz na parte posterior rodinhos de borrachas para o arraste do material desprendido pelas lâminas.

Este processo é repetido diversas vezes até que a parede da tubulação fique completamente limpa. As vantagens desse tipo de limpeza são: o fornecimento e a pressão da água não são necessário, depósitos muito duros podem ser removidos e os detritos são facilmente coletados e despejados. Na Figura 4.2 pode-se observar o equipamento do método “Drag”.

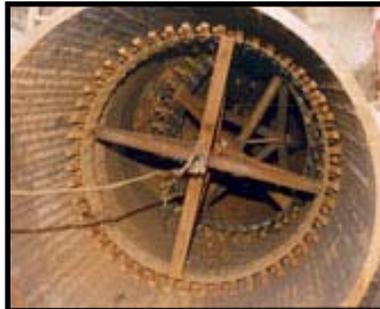


Figura 4.2: Raspador

Esse método é citado por BALL (1992) como um método eficiente de limpeza da tubulação com o intuito de permitir a aplicação de revestimento interno na tubulação a ser reabilitada.

4.1.1.5. Método ‘Scraper’

O raspador é alto propulsor, tem uma cabeça raspadora rotativa equipada por fileiras de lâminas de aço capazes de limpar os arrebitos e ao redor deles, permitindo a limpeza de todas as deformações presentes na tubulação. A passagem dessa máquina e a pressão aplicada pela cabeça raspadora à superfície da parede, permite que uma limpeza completa seja obtida em uma única passagem, como é mostrado na Figura 4.3. Os detritos deslocados são removidos por um rodo e uma escova para assegurar que a superfície fique adequadamente limpa. O método é eficientemente utilizado em tubulações de grandes diâmetros, ou seja, diâmetros superiores a 48”.



Figura 4.3: Scraper

WOODFALL (1993) comenta que esse método foi utilizado com sucesso na reabilitação de rede de distribuição de 48 polegadas de diâmetro em aço, na cidade de Boston. Depois de ter sido realizada uma inspeção com a finalidade de encontrar tubérculos, foi iniciada a limpeza da rede de distribuição. As especificações exigiam a remoção das ferrugens, dos tubérculos, detritos e sujeira antes da aplicação do revestimento com argamassa de cimento.

4.1.1.6. Power Boring

É um método de limpeza que usa qualquer dispositivo hidráulicamente propulsado de remover tubérculos e incrustação de tubulações de ferro fundido, fofo, e

aço de no mínimo 75 mm de diâmetro. Esse processo é normalmente executado em extensões acima de 120 m.

A Boring Machine é uma unidade diesel compacta que usa pressão hidráulica para enviar 31 HP ou 23,1 kW a cabeça perfuradora. A cabeça perfuradora é projetada para acomodar varetas perfuradoras de aço de 4,6 m de comprimento equipadas com conexões rápidas, para conectar as hastes permitindo a limpeza de vários trechos da tubulação. A haste perfuratriz é equipada com uma faca de aço ou outra ferramenta limpante a qual gira a 750 rpm através do tubo. Esse processo de limpeza é conduzido contra -fluxo com o intuito de descarregar os detritos da tubulação.

A máquina pode ser equipada com uma lança ajustável para acomodar várias profundidades de tubulações e, para controlar o ângulo no qual as hastes perfuradoras serão inseridas na tubulação. O número de revoluções (voltas) da lâmina raspadora é predeterminado e fixado para eliminar erros do operador, garantindo resultados consistente através de toda a operação de limpeza. Esse método deixa a superfície interior da tubulação livre de tubérculos e pode ser eficaz para curvas até 22,5° . Curvas com um raio maior podem exigir a remoção e reposição da curva.

4.1.1.7. Método “Pig”

Os “Pigs” são parecidos com uma cápsula, ou seja, é um cilindro de espuma de poliuretano com um nariz em perfil parabólico, com base côncava. A base pode ser revestida totalmente com materiais elastoméricos, contendo ou não materiais abrasivos ou outro componente que executa a limpeza da parede da tubulação. Na Figura 4.4 é possível observar os vários modelos de “pig” que podem ser empregados no sistema de abastecimento de água. Com tamanhos, densidades e revestimentos apropriados os “pigs” pode ser ferramenta extremamente eficiente para limpar, restaurar e devolver ao sistema a capacidade do fluxo (WALSKI, 1987).



Figura 4.4: Modelos de “Pigs”

Os “pigs” são inseridos no sistema e direcionados para seguir um caminho pré-determinado mantendo a direção do fluxo da água. Eles não se movem com velocidade constante, pois respondem às forças hidráulicas ou pneumáticas dispendida ao material das incrustações encontradas durante o percurso. A passagem do “pig” efetuará a remoção e subsequente descarga de todo o material estranho acumulado, aderido ou depositado.

WOODFALL (1993) relata que a empresa que prestou serviços na cidade de Boston, lançou mão de testes não destrutivos para inspecionar as condições da rede de distribuição. Inicialmente, a inspeção utilizou um equipamento conhecido como “Smart Pig”, que é um aparato de teste eco-pulsante ultra-sônico. A vantagem deste equipamento é que possibilita inspeção precisa, uma vez que faz 36 leituras a cada pé quadrado, além de estar equipado com uma câmera de vídeo que grava as condições internas da tubulação. Mas no decorrer da inspeção, este aparelho teve que ser substituído por um outro aparelho ultra-sônico manual, pois o “Smart Pig” não conseguiria mover-se dentro da tubulação, devido grandes saliências causadas pelos rebites da tubulação, que poderiam danificar seus sensores.

Segundo HOOGSTEEEN (1993), quando os métodos de limpeza não são usados corretamente há deslocamento do sedimento dentro da rede, podendo comprometer ainda mais a operação do sistema. As taxas de manutenção de limpeza das linhas seriam reduzidas se o sistema de tratamento de água fosse otimizado, diminuindo com

isso o custo com limpezas das linhas. Na cidade de Moscou, aproximadamente 100 km de redes são limpas anualmente. São utilizados dois critérios para a realização da limpeza, um de acordo com escala de manutenção pré-estabelecida e o outro, através dos resultados de inspeção do estado da rede, segundo DYACHKOV (1994).

A utilização de qualquer processo de limpeza descritos anteriormente permitirá aumento do coeficiente de Hazen Willians. Conforme comentado por DUTTING (1968), depois da utilização de pigs ou limpador hidráulico verificou-se que, em um curto período de tempo, o valor do coeficiente “C” torna-se praticamente idêntico ao verificado antes da aplicação da limpeza e após a primeira aplicação, as próximas são realizadas em intervalos de tempo cada vez menores. O mesmo não foi verificado nas tubulações que receberam limpeza e aplicação do revestimento de argamassa de cimento, que mantiveram praticamente a mesma rugosidade ao longo dos anos. Para maior entendimento são apresentados os resultados na Figura 4.5.

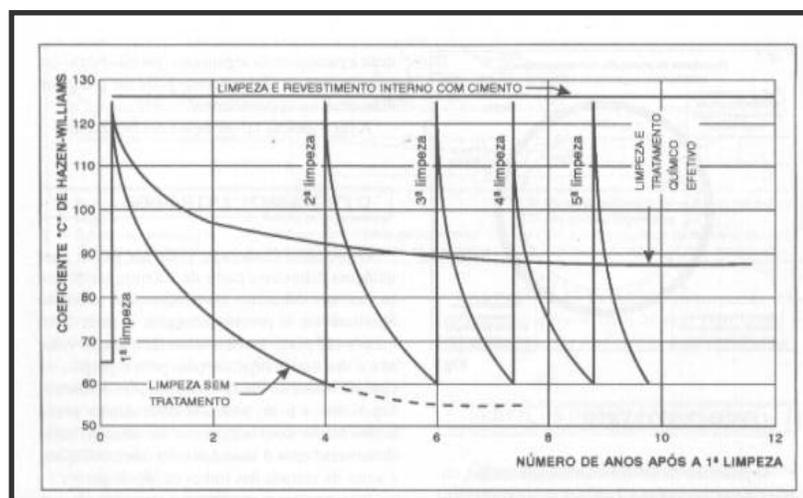


Figura 4.5:Variação do Coeficiente de Hazen Willians - Fonte:DUTTING (1968)

TSUTIYA (2001) defende a utilização de “pigs” e do limpador hidráulico, tendo comentado como vantagem a recuperação da rugosidade da tubulação, o custo reduzido quando comparado às técnicas de revestimento interno pois não necessita de mão de obra especializada para execução, exigindo curto tempo para execução do serviço e com pouco prejuízo para o abastecimento à população. A seguir são

apresentados na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 os resultados obtidos nos sistemas da SABESP na execução de limpeza das tubulações.

Tabela 4.1: Limpeza através de pigs

Adutora de Água Bruta de São José dos Campos			
Diâmetro: 600 mm - Ferro Fundido - Extensão: 3,1 Km - 1973			
Data	Evento	Coeficiente C	Variação (%)
Jan/78		70	
set/84		59	-15,7
set/84	1ª limpeza	119	101,7
mar/85		82	-31,1
mar/85	2ª limpeza	95	15,9
abr/87		75	-31,1
abr/87	3ª limpeza	98	30,7

Fonte: TSUTIYA (2001)

Tabela 4.2: Limpeza através de limpador hidráulico

Sub-adutora de Água Tratada da Bela Vista			
Diâmetro: 375 mm - Ferro Fundido - Extensão: 3,1 Km - 1960			
Data	Evento	Coeficiente C	Variação (%)
mai/77		65	
dez/77	1ª limpeza	84	29,2
mar/78	2ª limpeza	109	29,8
jul/78		98	-10,1
set/78		94	-4,1
fev/80		94	0

Fonte: TSUTIYA (2001).

Segundo PARK *et al.* (1998), a utilização de “pig” mecânico pode determinar as condições internas e externas das tubulações de água, baseado no princípio de vazamentos, tanto ultra-sônicos como os magnéticos. Outras abordagens para avaliação das condições da tubulação são a utilização de câmeras de vídeo em miniatura, radar de penetração subterrâneo, radiografia, termografia e fibras óticas. As avaliações físicas podem tipicamente ser usadas em poucos tubos, suspeitos de deterioração crítica, pois usá-la em todo sistema ou grande parte do sistema de distribuição pode ser custoso demais, o que a torna uma avaliação inviável.

4.1.2. Métodos Não Destrutivos

No processo não destrutivo é necessário somente a abertura do poço de inspeção, e com isso, uma pequena área de pavimento e terra é removida, eliminando os transtornos causados pela abertura de vala e reduzindo o tempo de execução do serviço. Esta tem sido prática comum em alguns países, destacando-se a Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha.

As tecnologias que permitem a reabilitação das tubulações sem a abertura de vala, são ferramentas muito valiosas na minimização da interrupção da superfície. Apesar das pretensas vantagens, KRAMER (1993) assinala que tais tecnologias têm sido pouco implementadas. Os engenheiros deveriam considerá-la como uma real alternativa e não como uma mera opção teórica. MICHALIK (1994) comenta que a utilização dessa técnica de reabilitação sem abertura permite uma economia total quando comparada a serviços tradicionais em torno de 49% para tubulações de 220 mm de diâmetro e 55% para tubulações de 100mm, KRAMER (1993) acredita que irá ocorrer um decréscimo no custo de execução dos métodos não destrutivos e que eles se tornarão competitivos quando comparados a técnicas convencionais. Justifica que isso será possível, com aumento da competitividade na prestação de serviço, utilização de equipamentos mais modernos e a crescente experiência dos empreiteiros na prestação dos serviços.

4.1.2.1. Revestimento de Argamassa de Cimento.

Durante a revisão bibliográfica ficou evidenciado o emprego do revestimento de argamassa de cimento, como a técnica mais utilizada na reabilitação das tubulações. Para ilustrar seu desenvolvimento, será feita uma breve revisão histórica citada por EBNER (1993).

O uso do revestimento com argamassa de cimento em tubulações foi reportado pela primeira vez, em 1836, pela Academia Francesa de Ciência. Por volta de 1950, um tubo revestido com cimento e coberto com uma película metálica foi introduzido nos Estados Unidos. Porém, falhas ocorridas nestas tubulações foram atribuídas à quebra do revestimento e à corrosão da película metálica e subsequente falha. Em 1922, na Carolina do Sul, o revestimento foi aplicado em tubos de ferro fundido, incentivados pelos gerentes das empresas de água, que estavam insatisfeitos com o alto custo de manter as linhas livres dos tubérculos. Em 1936, foi estabelecida pela American Standard Association a espessura mínima do revestimento de argamassa de cimento e, em 1939 foi revisada esta especificação tornando-se a norma C 104 – AWWA.

a) Aplicação de argamassa de cimento em tubulações de pequenos diâmetros

Um caminhão ou uma instalação de concreto é colocada próximo do poço de acesso onde é preparada a mistura da argamassa de cimento, constituída de uma parte de areia silicosa e uma parte de cimento Portland tipo II. Então, a argamassa misturada é remetida para a máquina revestidora e o método de aplicação dependerá do diâmetro da tubulação a ser revestida.

Nas tubulações de diâmetros menores a argamassa de cimento é bombeada diretamente da cabeça rotatória da qual é atirada através da força centrífuga na parede da tubulação. Um caminhão guincho puxa a máquina de revestimento através da tubulação. A velocidade do guincho e a descarga da bomba são cuidadosamente controladas para assegurar a espessura especificada. Uma pá de arrasto, cuidadosamente ajustada, acoplada à máquina de revestimento proporciona um acabamento liso. A aplicação do revestimento de argamassa de cimento para pequenos diâmetros é ilustrada na Figura 4.6.

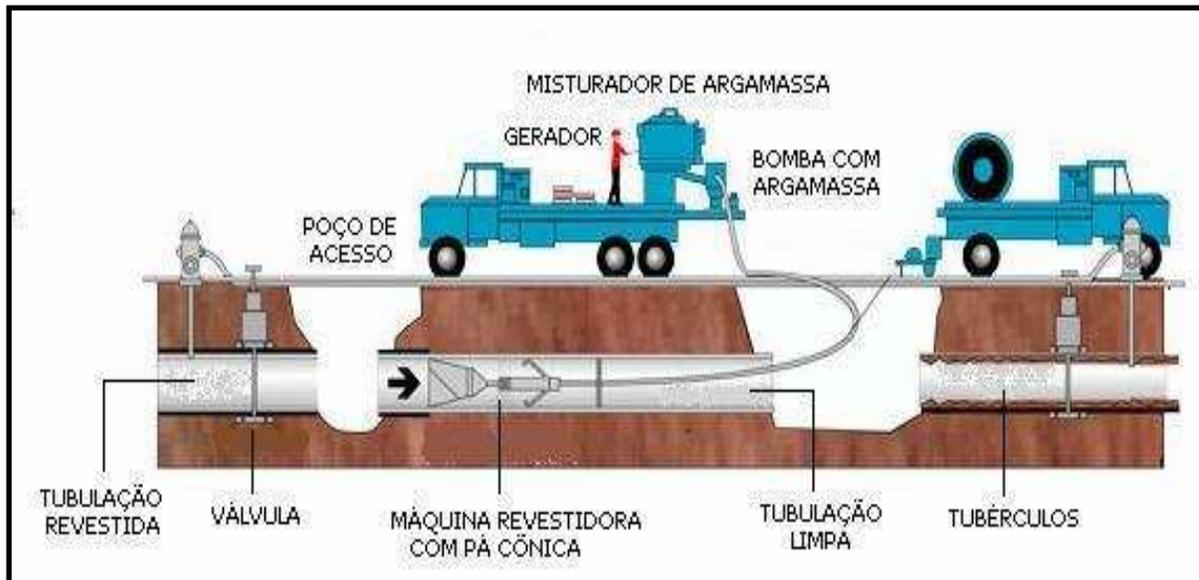


Figura 4.6: Aplicação de argamassa de cimento em tubulações de pequenos diâmetros

Em tubulações de 100 a 600 mm de diâmetro, a argamassa é bombeada por meio de mangueiras de alta pressão para a máquina revestidora. Guinchos especialmente projetados puxam a máquina revestidora através da tubulação a uma velocidade constante, assegurando uma espessura uniforme de revestimento. Pás rotativas alisam a argamassa aplicada até que o acabamento fique hidraulicamente eficiente. A descarga de argamassa e a velocidade da máquina de revestimento são variáveis, sendo calculadas para assegurar que a espessura especificada do revestimento seja aplicada tão rapidamente quanto seja compatível como uma boa mão de obra. A Figura 4.7 mostra uma vista do equipamento aplicando o revestimento.

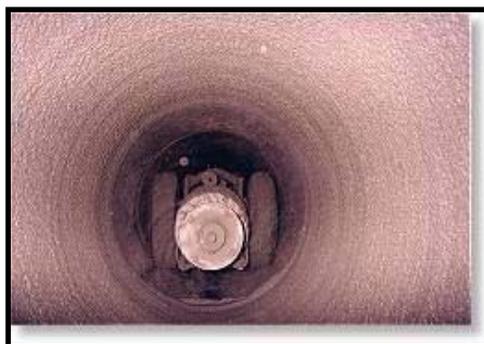


Figura 4.7: Alisamento da argamassa com pás rotativas

Ramais de entrada e bifurcações com diâmetros inferiores a 50 mm devem ser desimpedidos após a aplicação do revestimento. Isso é realizado cerca de uma hora depois de ter completado o revestimento, e antes do fim da pega, sendo usado ar comprimido, contra corrente. Tomadas laterais com diâmetros superior a 50 mm não são obstruídas pelo revestimento centrífugo e não exigem escavações ou jato de ar. É recomendado remover as válvulas de pequenos diâmetros durante a aplicação do revestimento. Válvulas borboletas são removidas e reinstaladas após os serviços de revestimento.

b) Aplicação de argamassa de cimento em tubulações de grandes diâmetros

Para a aplicação do revestimento em tubulações de grandes diâmetros, um equipamento foi desenvolvido para alcançar grandes distâncias, e com isso eliminou-se a necessidade de freqüentes e caros poços de acesso. A argamassa é aplicada centrifugamente como no revestimento de pequenos diâmetros mas, o equipamento supridor é muito diferente, como é mostrado na Figura 4.8.

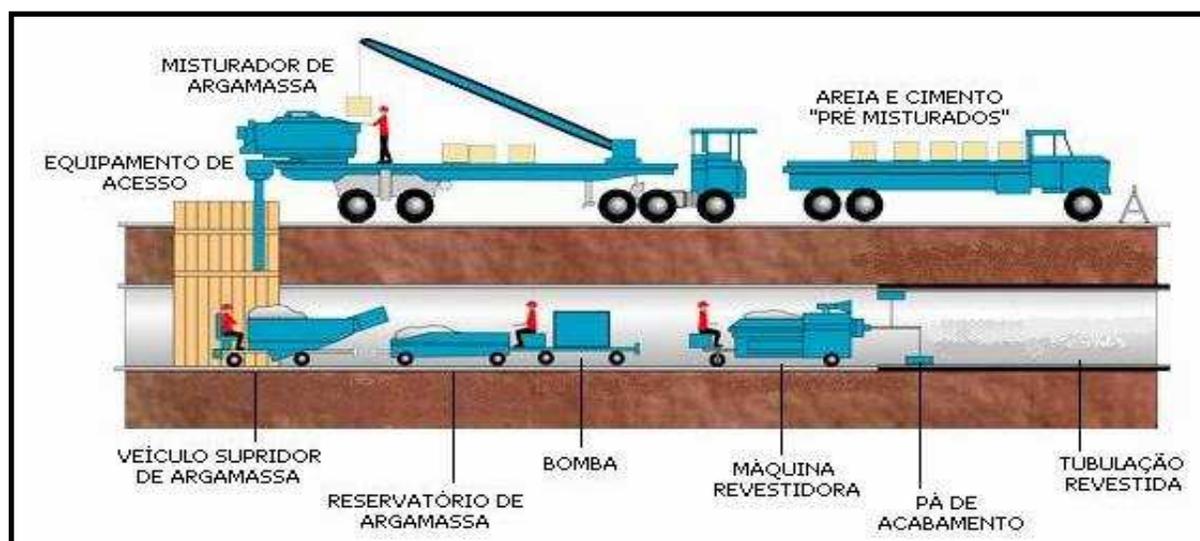


Figura 4.8: Aplicação de argamassa de cimento em tubulações de grandes diâmetros.

A argamassa misturada é despejada dentro de um carrinho que se posiciona para frente e para trás do buraco de acesso ao carregador intermediário. O carregador intermediário é um reservatório para a máquina de revestimento, o qual possibilita uma operação de revestimento contínua. A argamassa é bombeada por uma pequena distância do carregador intermediário para a máquina revestidora e lançada pela força centrífuga sobre a parede da tubulação.

Para a cura do revestimento de argamassa de cimento, o trecho revestido deve ser mantido em atmosfera úmida, sem corrente de ar, por um período de 48 horas, minimizando desta forma, o surgimento de trincas. Nos casos de tubulações expostas, o interior das mesmas deverá ser mantido úmido, no período que antecede a sua colocação em carga.

Embora o revestimento com argamassa de cimento não tenha função estrutural, o emprego do revestimento reforçado de argamassa de cimento pode provocar a melhoria estrutural da tubulação, desde que seguidas as modificações seguintes. Inicialmente o revestimento de 13 mm de espessura é aplicado sobre a parede da tubulação de maneira convencional sem desempenar. Em seguida, malhas de arame sobrepostas são colocadas contra o revestimento, o qual é então coberto com um outro revestimento de argamassa de cimento desempenada de 13 mm. Esse processo é utilizado em tubulações de aço em péssimas condições devido a extensas corrosões e em tubulações suficientemente grandes que permitem a entrada de uma pessoa para realização do serviço. Ainda que esse processo não previna o rompimento das tubulações, estenderá a vida útil da mesma (MANUAL – M28, 2001).

Para aplicação dessa técnica e demais técnicas que serão descritas posteriormente é recomendado que as seguintes etapas sejam cumpridas:

1. Instalação de by-pass;
2. Construção dos poços de acesso;
3. Limpeza das tubulações;

4. Aplicação da argamassa de cimento;
5. Cura do revestimento;
6. Teste de pressão;
7. Desinfecção da tubulação;
8. Reabilitação do sistema existente;
9. Remoção do by-pass e conexão dos serviços.

Para melhor entendimento dos métodos não destrutivos, foram feitos comentários sobre as etapas construtivas, afim de elucidar a execução dessa tecnologia. A seguir são descritas as principais etapas presentes na maioria dos métodos.

Instalação de by-pass: Por recomendação da American Water Works Association (AWWA), durante a reabilitação de sistema, é necessária a instalação do by-pass para manter os serviços de abastecimento aos usuários. Usualmente, os by-pass são de tubulações de PEAD, com diâmetro variando de 2 a 4 polegadas. Os by-pass são alimentados com água dos hidrantes, que deverão ser instalados, testados contra vazamentos e clorados para garantir a segurança dos usuários, podendo ser utilizados durante algumas semanas, segundo BALL (1992).

Construção do poço de acesso: Devem ser escavados, removendo uma secção da tubulação para permitir a entrada dos equipamentos. É comum que esses poços 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. A Figura 4.9, ilustra esse procedimento.



Figura 4.9: Poço de acesso

Limpeza da tubulação: É freqüente o crescimento de depósitos ou incrustações, que devem ser removidos para garantir a manutenção da capacidade hidráulica da tubulação. Tal remoção pode constituir apenas na lavagem da rede utilizando pigs, jatos de água ou ainda os métodos mais sofisticados tais como método drag , método scrapers ou o método de limpeza hidráulica. Mas GRAY (1992), conclui que os métodos que poderão ser aplicados serão definidos depois de uma inspeção monitorada ou visual das condições estruturais da tubulação.

Aplicação do revestimento: Dependendo do estado da tubulação a ser reabilitada, um processo específico de aplicação de revestimento deverá ser utilizado, seguindo as normas da AWWA.

Aplicação do vedante: Depois da aplicação do revestimento apropriado, é utilizado um produto vedante para conectar a secção revestida a outros acessórios, com o intuito de eliminar futuros vazamentos nas conexões da rede.

Teste de pressão: Terminada a vedação das conexões, a secção reabilitada é preenchida com água é realizado teste de pressão de trabalho. Existe por norma, uma taxa de vazamento que é permitida pela

AWWA, mas normalmente a empresa local tem sua taxa padrão de vazamento.

Desinfecção da Tubulação: A rede reabilitada deve ser clorada para garantir um ambiente limpo por onde passará a água potável. A cloração pode ser feita através de inúmeros métodos incluindo tabletes de cloro, gás etc. A linha deverá ser lavada e tampada para permitir a ação do cloro durante um determinado período.

Religação do sistema: Depois de ter sido aprovada a rede pelo teste de pressão e desinfecção, a seção reabilitada será reconectada.

Remoção do By-pass e conexão dos serviços: Os serviços são conectados à rede reabilitada que será colocada em funcionamento e o by-pass será removido.

Segundo os autores WALSKI (1986), DEB (1991) e O`DAY (1992), EBNER (1993), essa técnica apresenta as seguintes vantagens: não é necessária a abertura de valas; as tubulações antigas são utilizadas; há uma redução na interrupção do fornecimento de água, minimiza os transtornos causados na manutenção uma vez que é um processo mais rápido, diminuindo o estresse da população; aumenta a credibilidade e a confiança da empresa de abastecimento. Mas tem como desvantagem a redução do diâmetro útil, pela aplicação da argamassa, conforme mostrado na Tabela 4.3. No entanto, segundo tais autores isso é compensado pela redução da rugosidade da tubulação. Apontam também a necessidade de equipamentos específicos e mão de obra especializada para execução dos serviços. Na Figura 4.10 é possível notar a eficiência do método pelos dos resultados obtidos.



Figura 4.10: Tubulação reabilitada com argamassa de cimento

Tabela 4.3: Espessura do revestimento com argamassa de cimento

Espessura Recomendada AWWA - 602/95				
Material da Tubulação	Diâmetros (mm)			
	100 – 250	280 - 580	600 - 900	> 900
Aço Velho	8.0	10.0	11.1	14.3
Aço Novo	6.3	8.0	10.0	13.0
Fofo Novo/Velho	4.8	6.4	8.0	8.0

A aplicação do revestimento de argamassa de cimento é um dos métodos mais utilizados e citados na literatura, segundo aos autores BALL(1992), GRAY (1992), EBNER (1993), KRAMER (1993), HIRNER (1994) que destacam as seguintes vantagens:

- Economia de 30 a 90% sobre o custo total da reposição;
- Aumento da vida útil da tubulação nova ou antiga;
- Aumento da capacidade hidráulica que é conservada ao longo do tempo;
- Redução dos custos de bombeamento e manutenção;
- Eliminação dos vazamentos;
- Preserva a tubulação para um desempenho hidráulico ótimo;
- Garantia da manutenção da potabilidade da água conseguida pela eliminação da água vermelha causada pela formação de ferrugem;
- Eleva a pressão de distribuição;

- Proteção eficaz da parede do tubo eliminando a recorrência de corrosão nas tubulações de aço e ferro fundido;
- Redução da deterioração da qualidade da água distribuída, incluindo a redução da demanda de cloro na distribuição.

Além das vantagens citadas na literatura, MICHALIK (1994) ressalta vantagens adicionais sentidas durante a realização da reabilitação no sistema de distribuição da cidade de Dresden, tais como:

- Economia de 10% do total da restauração visto que não há custo com planejamento da obra;
- Redução do custo de material que é explicado pelo reaproveitamento da tubulação existente;
- Redução no tempo de execução, pois não há necessidade de abertura de vala, manuseio com tubulações, remoção da terra e repavimentação do local da obra.

DYACHKOV (1994) relata que nos últimos 14 anos o uso de revestimento com argamassa de cimento tem se tornado popular na Alemanha, e que 46 Km de linhas de 1200 e 1400 mm diâmetro foram reabilitadas por esse método. Mas para GRAY (1992), embora o revestimento com argamassa seja sem dúvida o mais popular e o mais eficiente dos métodos de reabilitação, comenta que existem algumas desvantagens que levam as empresas a optarem por outro método, mas não faz nenhum comentário sobre elas. Para HIRNER (1994) a única desvantagem encontrada foi a baixa resistência da argamassa de cimento.

Na cidade de Louisville, no Kentucky, a companhia de água aplicou a limpeza e o revestimento com argamassa de cimento em 35 milhas de tubos de ferro fundido com diâmetros variando de 4 a 8 polegadas. BALL (1992) afirmou que, quando monitoradas as tubulações, verificou-se que menos de 1% da tubulação apresentava algum defeito

EBNER (1993) apresentou na Tabela 4.4 várias empresas que reabilitaram sua rede de tubulação pelo método de revestimento com argamassa de cimento e quantificou o aumento da capacidade hidráulica conseguido através do aumento do coeficiente de Hazen Willians.

Tabela 4.4: Aplicações do método de revestimento com argamassa de cimento.

Localidade	Descrição da tubulação		Coeficiente de Hazen Willians	
	<i>D (mm)</i>	<i>Material</i>	<i>Antes</i>	<i>Depois</i>
Atlanta, Geórgia	400	Ferro fundido	80	141
Groton, Connecticut	200	Ferro fundido	75	130
	150	Ferro fundido	60	128
Herrin, Illinois	300	Ferro fundido	57	131
Keene, New Hampshire	250	Ferro fundido	65	125
Fort Leavenworth, Kansas	300	Ferro fundido	90	135
	200	Ferro fundido	50	132
	100	Ferro fundido	65	115
Dep. Water & Power	1600	Aço	90	135
Los Angeles, California	750	Aço	129	140
March Air Force Base, California	500	Aço	100	130
Pittsburg, Califórnia	200	Aço	63	115
Richmond, Virginia	600	Ferro fundido	61	130
Washington Suburban Sanitary Commission, Maryland	300	Ferro fundido	50	135
	250	Ferro fundido	55	130
	200	Ferro fundido	50	135
Winchester, Massachusetts	400	Ferro fundido	63	125
	200	Ferro fundido	70	130
	150	Ferro fundido	68	128

Fonte: EBNER (1993)

No Brasil, a ERCON é a empresa brasileira voltada especialmente para serviços de recuperação de tubulações já assentadas, através da limpeza e revestimento da argamassa de cimento. Em sistemas de água a empresa executa a limpeza e revestimento de tubulações a partir de 75 mm de diâmetro até 1200 mm. Segundo ZINGEREVITZ (2002) a empresa também trabalha com o revestimento de tubulações em outros segmentos. A empresa esteve envolvida com o primeiro serviço de reabilitação de tubulações, feito em tubulações de aço, com diâmetros 1000 e 1200 mm, na Usina Intendente Câmara, da Usiminas, em Minas Gerais. Na Tabela 4.5, são

apresentados alguns locais onde foram realizados serviços de reabilitação com revestimento de argamassa de cimento.

Tabela 4.5: Obras executadas com revestimento de argamassa de cimento

Revestimento com Argamassa de Cimento			
<i>Cidade</i>	<i>Empresa</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Descrição</i>
São Paulo	SABESP	400 - 700	adutora
São Paulo	SABESP	150 - 400	rede de distribuição
Santos	SABESP	500	adutora
Santo André	SEMASA	200 - 400	rede de distribuição
Belém do Pará	COSANPA	1500	adutora
Juiz de Fora	CESAMA	600	adutora
Juiz de Fora	CESAMA	400	Sub-adutora

Fonte: Ercon Engenharia Ltda (2002)

4.1.2.2. Revestimento com Argamassa Acrílica

Muito semelhante ao processo de revestimento com argamassa de cimento é o revestimento com a argamassa acrílica. No Brasil, a única empresa especializada na aplicação dessa técnica é a Niedung do Brasil, filial da Niedung alemã, com sede em Hannover, e desde 1901 realiza essa técnica na Europa.

A autora observou durante as visitas técnicas que, dependendo da empresa prestadora de serviço a aplicação da limpeza na tubulação é diferenciada. Os métodos apresentados na revisão bibliográfica não fazem parte do cotidiano das empresas brasileiras, merecendo maiores comentários.

Para a reabilitação de tubulações com argamassa acrílica é norma da Niedung do Brasil adotar o seguinte procedimento na execução da limpeza da tubulação. Inicialmente é utilizado o equipamento de hidro-jateamento de alta pressão para remover parte das incrustações presentes no interior da tubulação e em seguida é

utilizada ferramenta especial de raspagem, arraste os detritos a fim de finalizar a limpeza da tubulação.

As ferramentas de raspagem interna da tubulação podem ser do tipo helicoidal ou estratificador de superfície e foram desenvolvidas pela própria empresa. Para a limpeza é utilizado um raspador cilíndrico de superfície formado por anéis de borrachas com a dimensão interna da tubulação. Estas ferramentas são utilizadas alternadamente durante o processo de limpeza, ou seja, raspando e limpando as paredes internas da tubulação até não transportarem mais nenhum resíduo. Na Figura 4.11 são mostradas peças da ferramenta que raspam as incrustações formando o estratificador. Na Figura 4.12 é possível observar os anéis de borrachas que são utilizados para remover os detritos das incrustações.



Figura 4.11: Estratificador



Figura 4.12: Anéis de borrachas

A limpeza mecânica tem a finalidade de retirar toda a incrustação existente pelo processo de arraste e tração. Durante o processo de limpeza é necessária a utilização de dois equipamentos para o lançamento dos cabos: um caminhão tracionador de cabos UNIMOG (Figura 4.13) com capacidade de tração de até 10 toneladas, e uma central de controle BAGELA, que é operada por controle remoto e tem a finalidade de informar a todo instante a distância percorrida pelas ferramentas de raspagem e limpeza durante a realização do processo de limpeza. Os detritos retirados durante a limpeza do interior da tubulação têm característica de “massa” podendo ser visualizada na Figura 4.14.



Figura 4.13: Caminhão tracionador



Figura 4.14: Os detritos retirados

Após a limpeza inicia-se o revestimento com argamassa acrílica. A argamassa é obtida pela mistura de dois componentes, sendo uma parte líquida composta pela resina sintética e, uma parte sólida de uma mistura controlada de cimento especial e areia de granulometria controlada. Essa mistura é agitada e filtrada de modo a garantir sua homogeneidade.

Preparada a argamassa acrílica, a mistura é succionada através de uma bomba de pistão que tem a função de injetar para a mangueira a argamassa acrílica a uma vazão constante, até cabeça rotativa do aplicador. Na Figura 4.15 é mostrada a peça da cabeça rotativa. Como pode ser visto, a cabeça rotativa tem duas mangueiras acopladas onde em uma é bombeado ar comprimido e em outra a argamassa acrílica. O produto final do revestimento com argamassa acrílica pode ser observado na Figura 4.16.



Figura 4.15: Cabeça do aplicador



Figura 4.16: Tubulação revestida

Com o intuito de reduzir o tempo de cura do revestimento de argamassa acrílica é insuflado ar quente, a uma temperatura de aproximadamente 120^o C, através de um gerador de calor, nas extremidades do trecho rehabilitado. O tempo médio de cura é de três horas, mas pode ser ampliado em função da umidade do ar, temperatura ambiente, extensão do trecho e diâmetro da tubulação. Passado o período de secagem é feita a conexão entre os trechos da tubulação e por um período de 30 minutos a rede é lavada para posterior liberação do abastecimento aos consumidores. Essa técnica permite que sejam rehabilitados 200 metros de rede por dia.

Durante a execução do serviço de limpeza e revestimento do trecho da rede a ser rehabilitado, é montada uma unidade hidráulica no trecho adjacente que tem a finalidade de permitir o bloqueio do trecho onde está sendo executado o serviço e garantir o atendimento aos consumidores das áreas adjacentes.

Uma vez interrompido o abastecimento no trecho, duas equipes trabalham simultaneamente. Enquanto uma equipe executa a limpeza no trecho da rede a ser rehabilitada outra equipe desconecta os hidrômetros prediais e são colocados engates rápidos nos caveletes permitindo a conexão da mangueira de ar comprimido. Procedese à limpeza do ramal com ar comprimido e posteriormente a limpeza da rede, ou seja, os detritos existentes no ramal são empurrados para a rede e são removidos através da limpeza por arraste.

Um problema que pode ocorrer durante a realização do serviço de reabilitação é o rompimento da tubulação no pé do cavalete devido à pressão utilizada na limpeza dos ramais, pois, as tubulações são de aço galvanizado e dependendo do tempo de utilização alguns podem apresentar sinais de corrosão. Quando isso ocorre a equipe de manutenção providencia a substituição do mesmo.

Antes de colocar o trecho da rede de distribuição rehabilitada em operação é realizada a limpeza dos ramais prediais com o intuito de efetuar a remoção de eventuais resíduos deixados durante o processo de revestimento da tubulação

causando entupimento nos ramais. Na Figura 4.17 é mostrado o resíduo escuro que foi removido durante a limpeza dos ramais prediais. Esse resíduo pode ter sua coloração variada, pois está intimamente ligada à qualidade de água servida.



Figura 4.17: Resíduo da limpeza do ramal

Embora a argamassa acrílica é atóxica conforme comprovado por diversos laudos laboratoriais, não necessitando da cloração ao final do serviço, é norma da SABESP fazer a desinfecção da rede antes de colocá-la em carga. Esse processo demora cerca de duas horas. Mas observou-se que nem sempre há sincronismo dos trabalhos da equipe de desinfecção com a equipe da empresa prestadora de serviço, o que retarda a entrada da rede em operação.

A SABESP preocupada com a imagem da empresa com relação aos serviços executados solicitou que os moradores e comerciantes respondessem um questionário onde se pergunta qual a nota que melhor representa o serviço prestado. Das pessoas entrevistadas 98% responderam que recomendaria as autoridades à utilização desta técnica em outros locais. Em relação ao benefício recebido após a realização do serviço 51% das pessoas atribuíram nota 10, 15% atribuíram nota 9 e 18% atribuíram nota 8. A nota mínima atribuída foi 5, representando 3,5% das pessoas entrevistadas.

Essa técnica vem sendo bastante utilizada no Brasil na área de abastecimento de água e entre as empresas de saneamento a SABESP é a pioneira em contratação, ou seja, já executou aproximadamente 74.000 metros de tubulações de redes de distribuição como mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Obras executadas pelo processo de revestimento com argamassa acrílica

<i>Revestimento com Argamassa Acrílica</i>				
<i>Localidade</i>	<i>Empresa</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Descrição</i>
Casa Verde	SABESP	2.900	75 – 125 - 150	rede de distribuição
Butantã	SABESP	4.200	75 - 100	rede de distribuição
Vila Mariana	SABESP	1.700	75	rede de distribuição
Mooca	SABESP	2.300	75 - 100	rede de distribuição
Mooca	SABESP	21.000	75 - 100 - 125 - 150	rede de distribuição
Vila Mazzei	SABESP	479	75	rede de distribuição
Vila Mariana	SABESP	43.000	75 – 100 - 150	rede de distribuição
Itu – SP	SAAE	2.400	100 - 150 - 200 - 300	rede – adutora
Sobradinho - DF	CAESB	2.900	75	rede de distribuição

Fonte: Niedung do Brasil Ltda (2002)

4.1.2.3.1. Revestimento de Resina Epóxi

O processo do revestimento de resina epóxi 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, portanto não corrigindo nenhuma deterioração da tubulação. Entretanto, uma vez aplicado esse revestimento, não haverá contato entre a água potável e a tubulação antiga, sendo que dessa maneira reduzirá futura deterioração no interior das tubulações.

Essa técnica foi primeiramente usada no Reino Unido em 1989. Naquela época somente um tipo de resina epóxi era encontrada no mercado. Desde então, cinco outros produtos foram testados e experimentados no Reino Unido. Dos cinco produtos aprovados, quatro deles também receberam aprovação norte americana na utilização em redes de abastecimento de água.

Durante a execução desse tipo de revestimento, observou-se que o diâmetro mínimo da tubulação a ser revestida com sucesso é de 3 polegadas, utilizando os

materiais e equipamentos aprovados. Usando o equipamento de jateamento de epóxi através de uma máquina centrífuga, pode ser aplicado este tipo de revestimento em tubulações de 24 polegadas de diâmetros. Para a aplicação do revestimento, o equipamento deverá estar centrado enquanto avança pela secção da tubulação. Desta forma, um revestimento com uma espessura uniforme de 1 mm, no mínimo, é aplicada. O comprimento máximo da tubulação que pode ser revestida depende da mangueira da centrífuga que são montadas no equipamento. Na prática o máximo de comprimento que pode ser revestido de uma vez, é de aproximadamente 200 metros. Os poços de acesso serão escavados em locais estratégicos para coincidir com as válvulas e outros acessórios. Os tipos de material que podem ser jateados com sucesso são: o ferro fundido, ferro fundido dúctil, cimento amianto e as tubulações de aço. Na Figura 4.18 pode-se observar o desenho esquemático da aplicação desta técnica.

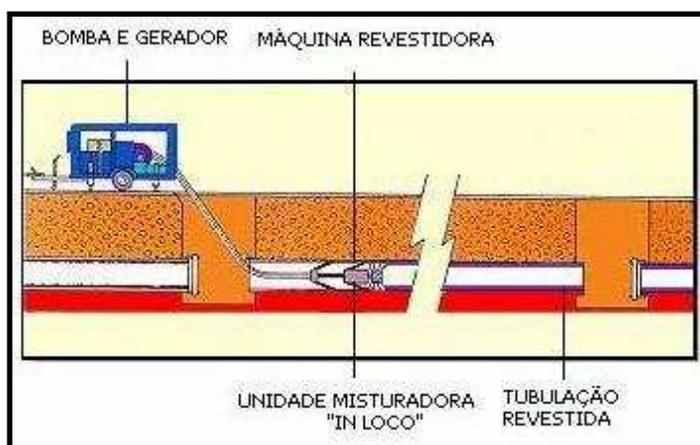


Figura 4.18: Máquina de revestimento de resina epóxi

Como vimos a técnica de revestimento com resina epóxica nasceu na Europa. No entanto, conforme será comentado adiante algumas mudanças foram feitas com relação à forma de aplicação no Brasil. Duas empresas desenvolveram processos de limpeza e revestimento um pouco diferenciado para o mesmo tipo de revestimento. A SANIT Engenharia de Serviços Ltda e a SANEAR Engenharia e Construção Ltda, são duas empresas prestadora de serviço na área de revestimento com resina epóxi, e têm em comum a maneira de executar a limpeza e a aplicação da resina de epóxi.

A SANIT utiliza a granalha de ferro e ar comprimido para remover a incrustação presente no interior da tubulação. O processo de limpeza é executado quantas vezes forem necessárias para que toda a incrustação possa ser removida. Com o intuito de dar polimento na tubulação é feito o jateamento com areia permitindo uma maior aderência da resina epóxica.

O processo de cura da resina epóxica empregado pela SANIT se dá em 12 horas da aplicação, o que não prejudica o abastecimento e nem o transito local como pode ser observado na Figura 4.19, pois os consumidores da área locais têm seu abastecimento garantido com a instalação de tubulações de PEAD. As tubulações de PEAD são conectadas nos hidrômetros possibilitando o by-pass. Em detalhe é mostrado na Figura 4.20 onde se mostra o engate feito na rede de distribuição permitindo a instalação do by-pass.



Figura 4.19: Tubulação de PEAD



Figura 4.20: Detalhe de engate na rede

Durante a execução desse tipo de revestimento, observou-se que o diâmetro mínimo da tubulação a ser revestida com sucesso é de 3 polegadas, utilizando os materiais e equipamentos aprovados, não sendo recomendado para diâmetros menores. São calculados a massa de epóxi e a pressão necessária para o revestimento do trecho a ser reabilitado, o qual atinge um comprimento máximo de 200 metros.

A título informativo são listados na Tabela 4.7 as obras executadas pela SANIT utilizando a técnica de revestimento com epóxi. Como se pode observar essa técnica tem discreta utilização no Brasil, tendo sido executados apenas 7.190 metros de redes empregando essa técnica.

Tabela 4.7: Obras executadas pelo processo de revestimento de epóxi

<i>Revestimento com Epóxi</i>				
<i>Cidade</i>	<i>Empresa</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Descrição</i>
B. Itaquera	SABESP	780	75 - 100	rede de distribuição
B. Itaquera	SABESP	400	125 - 150	rede de distribuição
B. Itaim	SABESP	2.150	75 - 100	rede de distribuição
B. Pinheiros	SABESP	100	100 - 125	rede de distribuição
B. Pinheiros	SABESP	100	125 - 150	rede de distribuição
B. Itaquera	SABESP	1.480	75	rede de distribuição
Cotia – SP	SABESP	2.180	150	rede de distribuição

Fonte: SANIT – Engenharia de Serviços Ltda (2002).

Segundo GRAY (1992), a aplicação de epóxi como revestimento é o mais procurado dos métodos e, possivelmente, seja um dos melhores, mas, para ser aplicado a tubulação não pode apresentar grandes manchas de corrosão e a tubulação deve estar livre de corrosão externa.

4.1.2.3.2. Processo A. S.

Este método foi desenvolvido no Japão e patentado em vários países, inclusive no Brasil. Constitui importante solução alternativa que possibilita a restauração da redes existentes de forma rápida usando uma tecnologia não destrutiva. Além do restabelecimento do dimensionamento original das tubulações, promover o revestimento das paredes internas com resina de epóxi prolongando a sobrevida útil.

Esse método difere do revestimento de epóxi no que tange à limpeza das tubulações. A recuperação das tubulações é executada através da remoção da rugosidade proveniente da oxidação e das incrustações existentes na paredes internas através da introdução de abrasivos especificamente dimensionados, por via pneumática, em vórtice de alta velocidade. O esquema do método do Processo A. S. é mostrado na Figura 4.21.

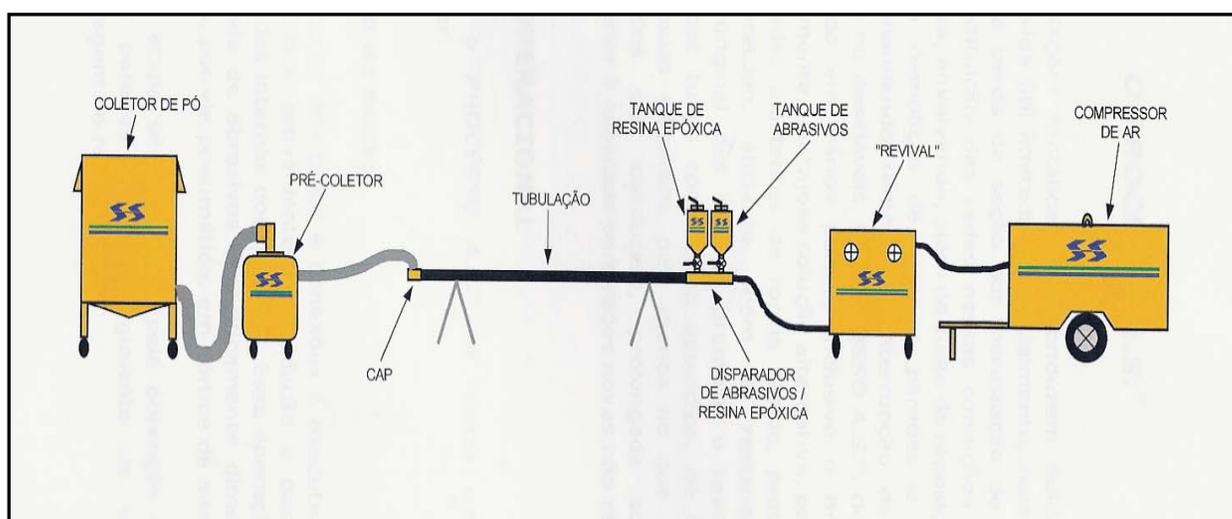


Figura 4.21: Esquema do Processo A. S.

Para facilitar o entendimento da aplicação desse método serão descritas a seguir as principais etapas:

1. O trecho a ser restaurado é isolado por um corte em suas extremidades, para permitir a instalação dos equipamentos;
2. É efetuada a secagem da rede com a utilização de ar comprimido. Em alguns casos, a tubulação a ser reabilitada pode apresentar um alto grau de incrustação conforme mostrado na Figura 4.22 comprometendo a seção a ser reabilitada. Neste caso é oportuna a passagem de um vareteador que tem a finalidade de reduzir a área incrustada

possibilitando a entrada do abrasivo. O vareteador é apresentado na Figura 4.23;



Figura 4.22: Tubulação incrustada



Figura 4.23: Peça do vareteador

3. Procede-se o jateamento com abrasivos, os quais se movimentam helicoidalmente provocando a remoção de qualquer tipo de incrustação. O movimento helicoidal é propiciado por equipamento específico e exclusivo do Processo A.S. Na Figura 4.24 pode-se observar os abrasivos utilizados no jateamento durante o processo de limpeza. Na Figura 4.25 é mostrada a montagem do aparelho onde são inseridos os abrasivos por jateamento utilizando ar comprimido;



Figura 4.24: Abrasivos



Figura 4.25: Equipamento de Limpeza

4. O resíduo proveniente do material de jateamento é coletado na extremidade posterior do trecho com equipamento coletor de pó dotado de filtros. Depois da limpeza da superfície, inicia-se o revestimento com

resina procedendo à aplicação da resina epoxídica por impulsão pneumática em movimento helicoidal, em espessura uniforme, da ordem de 0,15 mm por camada aplicada.

O tempo de endurecimento e a cura da resina depende da temperatura empregada. Para a temperatura de 40°C a cura ocorre em 10 horas e a 25° C a 20 horas. Durante esse período é feita a recomposição física, com a recolocação de acessórios eventualmente removidos, bem como a preparação dos trechos subseqüentes.

A vantagem na aplicação desse método segundo YAMADA (2002), empresa prestadora de serviço, reside no fato de ser aplicável em tubulações que variam de 15 mm a 150 mm de diâmetro, e cada etapa pode compreender até 200 metros de redes, independentemente da existência de curvas, cotovelos e outras conexões. 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, registros, ferrules, etc.; preenchimento de vazios existentes nos pontos de conexões entre as tubulações e a melhoria das condições de pressão de serviço e de escoamento, por resultarem paredes com revestimento liso e aumentando o coeficiente de rugosidade (Hazen Willian) para cerca de 120.

Na cidade de Campinas, a empresa SANASA contratou esse serviço para a reabilitação de um trecho da rede de 1300 metros de tubulação de ferro fundido e 50 mm de diâmetro. RODRIGUES (2000) comentou que, de fato, a execução do serviço foi rápida, não trouxe transtorno aos transeuntes, os usuários não ficaram sem água durante a realização do trabalho mas, concluiu que, a aplicação dessa técnica é cara, e que neste caso em particular, seria mais econômico a substituição da rede, considerando somente o custo direto. Até o momento, no Brasil foram executados

42.676 metros de redes empregando essa técnica. Na Tabela 4.8 são listados os serviços executados pelo Processo A. S.

Tabela 4.8: Obras executadas com revestimento de epóxi

<i>Processo A.S. - Revestimento com Epóxi</i>				
<i>Cidade</i>	<i>Empresa</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>Descrição</i>
Santo Amaro	SABESP	6.069	75 – 100	rede de distribuição
Santos	SABESP	2.960	50 – 75	rede de distribuição
Suzano	SABESP	1.256	100 – 200	rede de distribuição
Butantã	SABESP	26.702	75 - 100 - 150	rede de distribuição
Campinas	SANASA	5.689	50	rede de distribuição

Fonte: SANEAR – Engenharia e Construção Ltda (2002).

4.1.2.4. Método “Pipebursting”

O “Pipebursting” é uma tecnologia nascida na Europa que consagrou-se posteriormente nos Estados Unidos por apresentar custos competitivos e vantagens ambientais. Esse método começou a ser utilizado no Brasil em 1997, e a SANIT Engenharia de Serviços Ltda é a única empresa que tem o equipamento e presta esse serviço e já executou 20000 metros de redes utilizando essa tecnologia.

A técnica consiste na inserção de um fragmentador em um poço de acesso que é tracionado por um cabo guia. O fragmentador possui um martelo pneumático na sua cabeça combinado com expansor que tem a função de comprimir por meio da força radial os pedaços da tubulação que foi fragmentado na direção do solo. Essa ação não apenas rompe a tubulação como também cria um vazio para o qual a cabeça fragmentadora é puxada ou empurrada permitindo avançar. A medida que a cabeça fragmentadora avança através da tubulação existente, a tubulação de reposição avança para preencher o vazio criado. Neste método a condição estrutural da tubulação existente não é muito importante, desde que um cabo de tração possa ser inserido e puxado do local de tração até o local de inserção. Para melhor entendimento é apresentado o método de maneira esquemática na Figura 4.26.

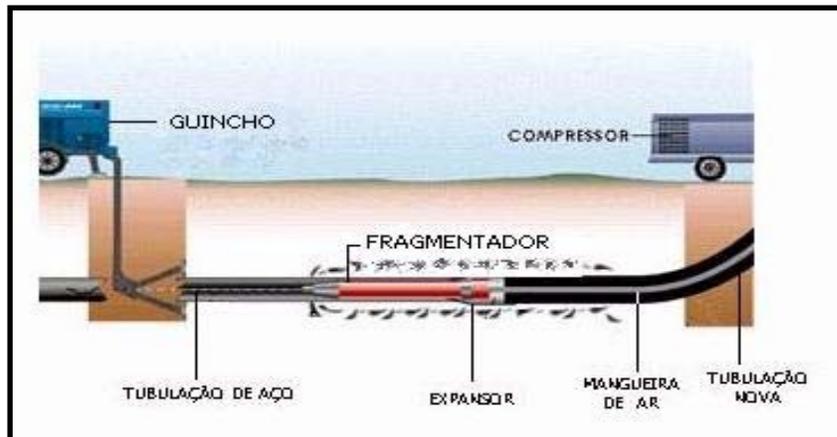


Figura 4.26: Esquema do método de “Pipebursting”

Existem três tipos de equipamentos fragmentadores a saber: hidráulico, pneumático e auto-propulsor . 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 de fragmentação encontrou aplicação na área municipal, na substituição de redes de água e esgoto. Originalmente, a nova tubulação era do mesmo tamanho da tubulação existente. À medida em que o processo foi sendo desenvolvido, a tubulação instalada pode ser maior que a tubulação existente pois dependendo do diâmetro da tubulação que se deseja instalar são acoplados expansores de tamanho adequado.

Deve-se tomar um cuidado especial durante a aplicação da força de tração empregada na realização desse método, ou seja, a força de tração deve ser mantida a um valor menor do que a capacidade de tensão da tubulação de reposição para evitar o estresse do material novo. Na Figura 4.27 é possível observar o cabo guia sendo tracionado, o fragmentador e o expansor, no início do procedimento. Pode-se também observar no detalhe na Figura 4.28 a tubulação de PEAD sendo puxada pelo cabo guia no poço de acesso, durante a realização do procedimento da substituição da tubulação pelo método “Pipebursting”. Na Figura 4.29 é possível observar a eficiência da técnica na fragmentação da tubulação de cimento amianto.



Figura 4.27: Detalhe inicial



Figura 4.28: Inserção do PEAD

O método “Pipebursting” é a única técnica não destrutiva que permite a substituição da tubulação por outra de mesmo diâmetro ou diâmetros superiores ao assentados anteriormente, sendo esta sua principal vantagem. O diâmetro mínimo recomendado para a aplicação dessa técnica é 3 polegadas e não foi identificado o máximo. Atualmente, os fabricantes de equipamentos de fragmentação de tubulação estão se preparando para fabricar um aparelho de fragmentação extra grande. Isto permitirá instalações de tubulações com diâmetros maiores do que 30 polegadas. À medida em que os métodos de fragmentação de tubulação são desenvolvidos, uma quantidade maior de materiais de tubulações podem ser fragmentados.

Historicamente, as tubulações cerâmicas foram as mais fragmentadas em relação a outros materiais. Atualmente, os seguintes materiais podem ser fragmentados: cimento amianto, tubulação de concreto simples e armado e também os de ferro fundido. As tubulações de PVC e ferro fundido dúctil podem ser fragmentadas se um aparelho de rachar/cortar for conectado à frente do corpo de fragmentação, embora o processo é difícil para a tubulação de ferro fundido dúctil. Este método pode ser aplicado em tubulações existentes cujo diâmetro varia de 102 mm a 1219 mm (MANUAL- M28, 2001).

Uma vez terminado o processo de passagem da tubulação de PEAD inicia-se a realização de emendas das tubulações de PEAD pelo processo de eletro-fusão. Esse processo reduz a zero o risco de vazamento nas emendas das tubulações e ramais prediais. A realização do processo pode ser observada na Figura 4.30.



Figura 4.29: Pedacos de tubulação



Figura 4.30: Processo de eletro-fusão

A SABESP executou esse método em aproximadamente 13.000 de rede de distribuição na Região Metropolitana de São Paulo com sucesso em vários localidades. A título de conhecimento na Tabela 4.9 são apontados os locais, a extensão e o diâmetro da tubulação de PEAD.

Tabela 4.9: Obras executadas através do método “Pipebrusting”

Método Pipebrusting				
<i>Localidade</i>	<i>Empresa</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>D (mm) Antes</i>	<i>D(mm) Depois</i>
Itaquera	SABESP	180	75	160
Embu	SABESP	8.524	50 – 75	90
B. Chácara Flora	SABESP	1.400	50 – 75	110
Zona Norte	SABESP	890	75 – 100	110 - 160
Itaquera	SABESP	200	75	160
Santo Amaro	SABESP	1.020	75	160
Jaguariúna	SMSB	480	50	90

Fonte: Sanit Engenharia e Serviços Ltda (2002)

Como pode ser observado, nos locais acima citados, a técnica foi empregada com o objetivo principal de aumentar a capacidade da rede de distribuição e melhorar a qualidade de água servida eliminando definitivamente a ocorrência de água vermelha. Mas em três locais a técnica foi utilizada como a única opção para sanar o problema no abastecimento.

Conforme descrito por SANTOS (2002), as redes de distribuição do bairro de Itaquera, em Santo Amaro (Região Metropolitana de São Paulo) estavam mal

dimensionadas dificultando a operação do sistema. Para a melhoria do sistema seria necessário aumentar o diâmetro hidráulico da rede. Mas, o departamento de tráfego da prefeitura não autorizou a abertura de valas, pois as redes localizavam-se em corredores de grande fluxo de veículos e ônibus, e a realização de uma obra neste local, iria acarretar grandes transtornos ao trânsito. Então, o único método aceito pela prefeitura foi o método de Pipebrusting.

Muitas vezes uma medida implementada resolve apenas parte do problema. Foi o que aconteceu na Zona Norte de São Paulo. A SABESP instalou válvulas redutoras de pressão (VRP) visando reduzir a pressão estática e com isso minimizar as perdas no sistema. Mas essa medida comprometeu o abastecimento de água em alguns trechos da rede que apresentavam alto grau de incrustação. Um estudo realizado pela SABESP apontava que seria necessário substituir 5 trechos distintos perfazendo um total de 890 m de rede distribuição. A substituição da rede acarretaria grande transtorno na região pois, como os trechos comprometidos localizavam-se numa região com tráfego intenso, a abertura de valas contínuas neste local implicaria na interdição do tráfego, criação de rotas alternativas durante um tempo considerável para a execução do serviço. Então, optou-se pelo método “Pipebrusting” na execução do serviço que foi realizado em 60 dias, considerando o tempo gasto com a mobilização e desmobilização, preparação dos trechos e alvará de licença da Prefeitura. Neste período os trechos que foram substituídos receberam by-pass garantindo o atendimento da população. A opção da SABESP por esta técnica resultou em uma economia da ordem de 40%, (SANTOS,2002).

As principais vantagens citadas com relação ao emprego da técnica de Pipebrusting são capacidade de aumentar o diâmetro hidráulico, a rapidez na execução do serviço, eliminação definitiva da água vermelha, mínimo transtorno para os motoristas e transeuntes, mínima agressão ao meio ambiente. O transtorno causado para os moradores, transeuntes, e motorista é mínimo como pode ser observado na Figura 4.31 uma rua onde estava sendo aplicado o método “Pipebrusting”.



Figura 4.31: Transtorno mínimo

O emprego dessa tecnologia permite a substituição da tubulação usando a rota existente. Esse método é extensivamente usado pelas empresas de água não só nos Estados Unidos como em outras partes do mundo. O centro de pesquisa de água da Inglaterra tem sido o líder no desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia segundo KRAMER (1993).

YACH (2000) informa que uma grande parte das tubulações da cidade do México apresentava altos níveis de perda de água, que foram justificados em razão da manutenção deficiente, aliada à baixa qualidade dos materiais empregados. O tempo de execução foi fator preponderante para a escolha do método Pipebursting, além da preocupação em minimizar a obstrução nas áreas comerciais e residenciais, minimizar o custo de reabilitação do sistema uma vez que não havia a necessidade de remover grandes volumes de solo, aterrar, asfaltar, etc e ressaltou que, a rapidez na aplicação do método dependerá da organização e do planejamento durante o processo.

4.1.2.5. Método da Perfuratriz Direcional

É um método não-destrutivo que utiliza um equipamento montado sobre esteira que permite o posicionamento da perfuratriz, permitindo desse modo, a perfuração a partir da superfície. Toda a perfuração é monitorada através de rastreadores eletrônicos

onde é possível direcionar a perfuração e desviar de obstáculos e interferências existentes ou ainda, atender às curvas e declividades especificadas em projeto.

O princípio de funcionamento dos sistemas de perfuração direcional consiste em uma perfuração piloto onde se executa os desvios necessários. Após executado o furo piloto, é realizado um ou mais alargamentos deste furo até atingir o diâmetro desejado, seguido pela instalação do tubo de polietileno (PE). É de suma importância o conhecimento de todas as tubulações e cabos existentes no solo localizado no trajeto de perfuração antes da execução do furo piloto.

Hoje estão disponíveis brocas de perfuração de 60 e 80 mm de diâmetro para todos os sistemas de rastreadores existentes no mercado. Uma vez realizado o furo piloto a broca é retirada e instalado o alargador no seu lugar. Com este método é possível instalar tubulações de até 355 mm de diâmetro e de até 300 metros distância.

Outra vantagem de utilizar esse equipamento 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, e que outros métodos simplesmente não conseguem perfurar. Dependendo das características do equipamento utilizado, o martelo impõe uma força de impacto que varia de 4 a 20 toneladas. Um modelo do equipamento é mostrado na Figura 4.32.



Figura 4.32: Foto da perfuratriz direcional

O método da perfuratriz direcional é indicado para: travessias sob rios e córregos, execução de linhas paralelas sob rodovias, perfurações sob ferrovias, parques, vias públicas ou mesmo sob construções existentes. Este método é indicado para instalação de tubulações de água, gás, telecomunicações, etc., e pode ser inserido tubulações de PEAD ou aço. No Brasil, principalmente nos últimos anos, observa-se crescente aumento da utilização dessa técnica em projetos de redes de gás natural fazendo a interligando os postos de combustíveis e na implantação da malha de fibra ótica.

Baseado sempre no mesmo princípio, vários são os equipamentos disponíveis no mercado, que permitem a instalação de tubulações de pequenos diâmetros até grande pelo método da perfuratriz direcional. O Moling é um equipamento que permite a instalação de ramais prediais colocando diretamente a tubulação de PVC, polietileno ou aço, como boa precisão, em locais de baixa profundidade.

A autora considera com a principal vantagem da aplicação dessa tecnologia em relação às demais apresentadas, a possibilidade de substituir tubulações ou inserir novas tubulações, em uma nova rota, sem ficar limitado às rotas antigas, o que permite mudanças no layout da rede, passando a ser mais adequado para a operação do sistema de distribuição de água.

4.1.2.6.1. Método da Cura no Local (Cured in Place: CIPP)

Técnicas de encamisamento com tubulação curada no local, envolve a inserção de uma tubulação de uma manga de feltro de fibras de poliéster impregnada ou revestida por um filme impermeável de resina termo-estável. A resina é então curada, seja sob condições do ambiente ou pela aplicação de calor usando vapor ou água. Técnicas desse tipo tem sido extensamente usadas para a reabilitação de águas servidas municipais e industriais e gasodutos. Aplicações para tubulações de água

potável tem sido limitada pela necessidade de obter a aprovação apropriada das autoridades de saúde relevantes.

Está técnica foi desenvolvida no Reino Unido em 1971 e foi introduzida nos Estados Unidos em 1977, destacando-se imediatamente, pela inovação e facilidade de aplicação e constitui no principal método de recuperação de tubulação até os dias de hoje. O método apresenta grande sucesso na indústria de recuperação de tubulações, tanto nas aplicações em redes de saneamento urbano, como industriais, ganhando a aprovação dos seus clientes devido a sua versatilidade, rapidez de aplicação, resistência física e mecânica, assim como a singular capacidade de ocasionar mínima perturbação na área de trabalho. O método permite dois sistemas de instalação. No processo original a manga de feltro é instalada por inversão no qual manga impregnada é simultaneamente alimentado através da pressão da água e invertida durante o processo de inserção. Neste processo a manga é introduzida por um poço de visita, caixa ou qualquer outro acesso existente na rede. Uma coluna de água formada por um tubo de inversão, impulsionará a manga ao longo da tubulação, invertendo-a e pressionando-a fortemente contra as paredes da tubulação existente, como pode ser visualizado nas Figuras 4.33 e 4.34. A água utilizada na inversão da manga é circulada através de uma caldeira. A água aquecida promove a cura da resina, criando efetivamente uma nova tubulação dentro da existente. Até o momento da efetiva polimerização da resina, o conjunto resina manga de feltro têm grande flexibilidade, razão pela qual, permite o avanço do revestimento pela tubulação durante a inversão e ajusta-se aos contornos existentes, selando juntas, trincas e partes danificadas.

No outro processo, a manga de feltro é puxada através de um cabo de aço, com o auxílio de um guincho, para dentro da tubulação e então inflando com uso de pressão de ar ou água. O encamisamento manga de feltro – tubulação é então curado por 6 a 9 horas.



Figura 4.33: Coluna de inversão

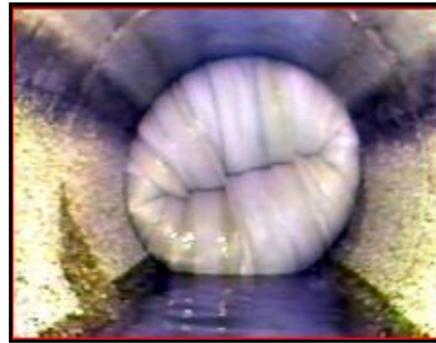


Figura 4.34: Processo de inversão

A manga de feltro é manufaturada de acordo com as dimensões específicas da tubulação hospedeira e impregnado com a resina apropriada e tem sido utilizado em tubulações abrangendo diâmetros de 102 mm a 2743 mm, com a vantagem de acomodar-se a perfis não circulares e em curvas com sucesso. A resina usada é selecionada para satisfazer as exigências de desempenho químico e mecânico, o que é garantido pelas resinas de poliéster-vinil éster e epóxi.

Pode-se dizer que a confecção da manga de feltro baseia-se em dois sistemas distintos. Sistema de manga lanosa consiste de uma manga circular lanosa de fibra de poliéster, sem costura revestida em uma das faces com uma camada de elastômero. A construção da mangueira é feita sob medida de acordo com as exigências de pressão interna e, a camada de resina curada servirá meramente como um adesivo à tubulação hospedeira. No sistemas de membrana, a manga de feltro consiste de uma membrana elastomérica muito fina projetada apenas para a proteção contra corrosão interna que preencherá furos muito pequenos e brechas de emendas. A camada de resina curada serve novamente apenas como uma adesivo para à tubulação hospedeira.

A espessura da manga de feltro para tubulações de esgoto é determinada principalmente pela necessidade de resistir a dobra ou achatamento devido a pressão de água externa. Para tubulações de água potável, a resistência à pressão interna é o parâmetro chave para o projeto. Os sistemas freqüentemente encontrados oferecem capacidade semi-estrutural classe III à pressão normal de operação de sistemas de água. Os sistemas podem também ser projetados para oferecer resistência significativa

à pressão externa de forma que seu uso pode ser indicado em condições com risco conhecido de pressão de água externa, e onde a interrupção de fornecimento, despressurização da tubulação ou condições de vácuo/transiente tem possibilidade de ocorrer subseqüentemente.

Cabe lembrar que o processo permite a aplicação do revestimento em trechos sucessivos de redes, não sendo portanto obrigatório à aplicação entre dois poços de acesso. Nos Estados Unidos foi realizado em uma única inversão, a aplicação de 700 metros de manga de feltro. A tubulação contínua formada pela manga de feltro, além de restaurar e reforçar a capacidade estrutural da tubulação existente, possibilita também a obtenção de um grande incremento na capacidade de condução. Outra característica importante é a alta resistência aos efeitos de corrosão e abrasão.

4.1.2.6.2. Método da Cura no Local - Sliplining Seccionado

Um outro método viável de reabilitação de tubulações de água é a inserção “camisas termoplásticas flexíveis” dentro das tubulações existente. Conhecido comumente como método Sliplining, tem sido amplamente usado por companhias de esgoto e gás desde o início dos anos 80. No entanto, seu uso em sistema de transporte e distribuição de água não tem sido tão difundido como as outras técnicas de revestimento de tubulação.

Este é um processo de renovação que envolve a inserção de um tubo de polietileno dentro da tubulação existente, sendo o tubo de polietileno de alta densidade, com comprimentos limitados aos das barras da tubulação. É necessário a abertura de um poço maior que aquele dos demais métodos. É removido metade da circunferência do tubo (meio cana) afim de permitir a inserção da nova tubulação, através de máquina que tem a função de um macaco hidráulico. Não obstante, está técnica apresenta duas desvantagens principais: necessidade de quantidade maior de poços de acesso;

dificuldade na execução em locais onde a rede possui deflexões e acessórios, por se tratar de um tubo rígido. A Figura 4.35 ilustra a execução dessa técnica.

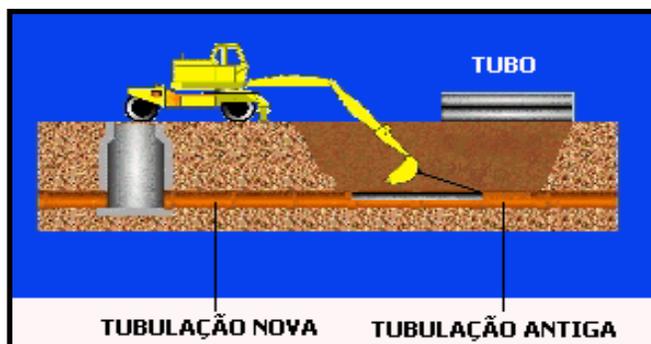


Figura 4.35: Esquema do método "Sliplining Seccionado"

Uma vertente do método é a fusão térmica de várias extensões consecutivas de 12 metros, unidas em local conveniente, de modo a formar uma única extensão de tubo. Uma ponta dessa tubulação é puxada com um cabo para dentro do poço de acesso e através da tubulação antiga. A tubulação nova é então conectada a rede existente.

A maioria das tubulações existentes podem ser encamisadas mas o encamisamento é ideal em alguns casos tais como: (a) tubulações que apresentam pouca integridade estrutural, o que torna desaconselhável outros métodos de revestimento tais como a argamassa de cimento, argamassa acrílica, revestimento com epóxi, etc; (b) locais onde as tubulações encontram-se abaixo ou cruzam ferrovias, pontes, rios ou outros obstáculos, tornando os revestimentos alternativos impraticáveis ou (c) ainda em locais onde há construções.

A desvantagem apontada por GRAY (1992) na utilização desse método é que os tubos são em barras de 6 metros, para união das tubulações de polietileno é utilizada uma cola corrosiva, que através de uma reação química cola as peças. Nos locais de emendas são formadas protuberâncias que, dependendo da altura, dificultará a passagem do "pig" durante a limpeza de manutenção da linha. Para WOODFALL (1993) esse método não é muito aplicado devido à baixa qualidade de mão de obra na

sua execução, dificuldade de trabalhar nas deflexões da rede e a necessidade de abrir buracos de acesso a cada 50 metros.

4.1.2.6.3. Método da Cura no Local - Sliplining

O processo foi especificamente desenvolvido para a renovação de redes de abastecimento no Reino Unido, em 1993. Tem sido amplamente usado para esse fim no Reino Unido e mais recentemente usado na Alemanha e nos Estados Unidos. Esse método pode ser aplicado em tubulações de aço e ferro fundido com diâmetro que varia de 3 a 8 polegadas. Esse tipo de revestimento pode ser utilizado em redes com corrosão interna e/ou externa que estão ou podem ficar em más condições estruturais. O revestimento também prevenirá problemas com vazamentos e com a qualidade da água, que estão relacionados à corrosão interna. O método “Sliplining” também conhecido por “Sliplining Modificado” envolve a inserção de um tubo termoplástico na tubulação hospedeira, o qual é temporariamente deformado para permitir espaçamento suficiente para inserção. Neste processo, o tubo de polietileno tem outras propriedades químicas e físicas, que permitem uma maior aplicabilidade. 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, conforme mostrado na Figura 4.36.

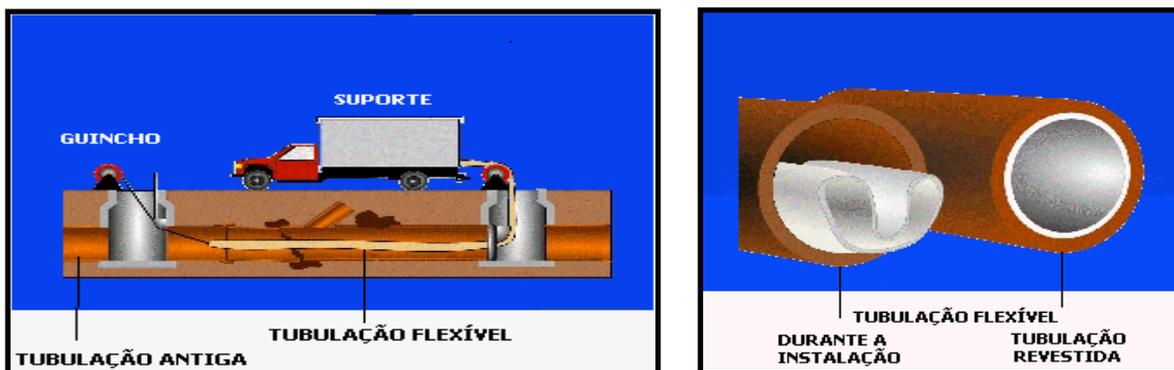


Figura 4.36: Esquema do método “Sliplining”

A grande vantagem neste caso, é que esse processo é capaz de contornar as diversas curvas horizontais e verticais de até 45 graus, (90 graus no caso de curvas de raio longo para o ferro fundido), e diminui sensivelmente a necessidade de aberturas de poços de acesso, diminuindo o custo na execução. Pode ocorrer aparecimento de alguma rugosidade nestes locais, mas isso não irá afetar significativamente a capacidade de fluxo.

O método “Sliplining” de reabilitação oferece muitas vantagens que são citadas na literatura, tais como: restauração do fluxo, redução do custo de bombeamento e a correspondente melhoria quanto à conservação de fontes de energia, eliminação de corrosão interna e dos tubérculos, proteção contra futuras corrosões, redução de manutenção, eliminação da água descolorada, proteção do investimento, tempo de construção reduzido, e a continuidade dos serviços enquanto o trabalho está sendo realizado.

Segundo O`DAY (1992), esse método é utilizado em casos de adutoras de diâmetros grandes e a redução do diâmetro útil da linha adutora não implicará em maiores danos à população e à empresa. Tem a vantagem de não ser necessária a abertura de valas, permite a rápida execução, diminuir o tempo de interrupção no fornecimento de água, mas tem como desvantagem o custo da execução e mão de obra especializada. MICHALIK (1994) aponta o método de inserção de polietileno como um ótima alternativa em redes onde a capacidade hidráulica é suficiente.

KRAMER (1993) comentou que esse método de renovação é amplamente usado em sistemas de esgoto e gás e que milhares de milhas de tubulação foram renovadas usando esse processo, desde os anos 70. Alerta que o trabalho do engenheiro ou gerente da empresa está em decidir o uso das técnicas e tecnologias disponíveis que podem ser aplicadas, e selecionar a opção mais adequada para cada problema. Segundo GRAY (1992) esse método traz grandes benefícios, é recomendado em áreas relativamente curtas, quando comparadas ao comprimento global da rede, tais como:

- Áreas com construções existentes;
- Grandes áreas pavimentadas;
- Regiões comerciais e residenciais;
- Travessias de rios ou lagos;
- Travessias de rodovias interestaduais e leitos rodoviários.

4.1.2.7. Método de “Woven Hose”

Esse processo permite a renovação das redes de água, embora o método seja semi estrutural. Pode ser usado para dar proteção interna contra a corrosão, união dos tubos, estancar pequenos buracos e juntas com vazamentos nas redes de distribuição. O processo envolve a instalação de tecido que adere à parede da tubulação através do aquecimento de uma resina de epóxi.

O desempenho estrutural do revestimento é principalmente determinado pelas propriedades do tecido. O processo foi originalmente desenvolvido no Japão para renovação de redes de gás. Também foi muito usado na Europa para esse mesmo fim, sendo posteriormente adaptado para a renovação de redes de abastecimento de água.

Essa técnica é principalmente adequada a tubulações com corrosão interna e vazamentos devido a juntas defeituosas e/ou buracos de corrosão, pois o revestimento aplicado não é capaz de suportar a longo prazo, pressão de operações normais e as cargas de pressão interna sem a ajuda da tubulação antiga. Esse método é atualmente aplicado em tubulações de ferro fundido e aço com diâmetros que variam de 6 a 39 polegadas.

4.1.2.8. Sistemas de Roletes

O processo com roletes desenvolvido no reino Unido em paralelo com o processo de matriz tem sido extensamente usado para a renovação de redes de gás e subseqüentemente de água em ferro fundido, com diâmetro de 102 mm a 457mm. O processo envolve puxar uma extensão de polietileno através de uma série de roletes redutores. Em contraste com os sistemas de matriz estática e os outros sistemas de roletes, uma grande parte da redução de diâmetro é conservada por um período que vai de horas a dias, dependendo da temperatura ambiente. A completa reversão para as dimensões finais exige a aplicação de alta pressão interna de água por 12 a 24 horas. Esse tempo permite a inserção do encamisamento reduzido na tubulação hospedeira seja diretamente, como os outros processos ou a diferentes tempos e locais.

Os sistemas de encamisamento modificado podem ser classificados em dois grupos principais:

Sistemas de redução simétrica: Estes sistemas envolvem o uso de uma tubulação termoplástica redonda com um diâmetro externo igual ou ligeiramente maior que o diâmetro interno da tubulação hospedeira. O tubo é passado por uma matriz estática ou uma seqüência de roletes compressores os quais reduzem temporariamente o seu diâmetro para permitir espaçamento suficiente para a inserção na tubulação hospedeira. Após ser inserido com guincho, a tubulação retoma a suas dimensões originais; em alguns casos essa reversão é acelerada com aplicação de pressão interna. Essas técnicas geralmente usam tubulação de polietileno para tirar vantagem da memória molecular do material das dimensões formadas por ocasião da extrusão.

Sistemas dobrados e formatados: Esse sistemas de encamisamento envolvem a deformação de um tubo termoplástico dobrado em forma de C ou U, seja na fábrica ou no campo. Após a inserção por meio de guincho na tubulação hospedeira o tubo é devolvido ao seu diâmetro e formato original, usando-se calor e/ou pressão. Estas técnicas podem ser aplicadas ao polietileno e polietileno reforçado com fibra.

Embora exista uma gama de tecnologias que possam ser empregadas na reabilitação de sistema de distribuição de água, escolhê-las, não é tarefa fácil, como alertam BOYD *et.al.* (2001). Tais autores sugerem que primeiramente sejam examinadas e identificadas as tecnologias de reabilitação e substituição que se ajustem ao local em particular e, que durante o processo, a seleção da tecnologia deve ser baseada nos fatores controláveis e não controláveis conforme comentados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10: Resumo dos fatores controláveis na reabilitação de sistemas de água

<i>Questões da Instalação</i>	<i>Preocupação com os Consumidores</i>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo gasto para a preparação do local ▪ Tempo gasto na instalação do material de reabilitação ou substituição de tubulação ▪ Tempo de cura do material de revestimento ▪ Tempo gasto para reconectar o serviço de água ▪ Conexões especiais para manter o serviço de água funcionando ▪ Questões operacionais 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tempo de interrupção do abastecimento de água ▪ Velocidade geral da operação ▪ Interrupção ao tráfego de automóveis e pedestres ▪ Danos Ambientais tais como ruído e geração de entulhos ▪ Efeitos adversos na qualidade da água ▪ Interrupção dos serviços de outras companhias

Fonte:BOYD *et.al* (2001)

Tabela 4.11: Resumo dos fatores não controláveis na reabilitação de sistemas de água

<i>Condição do Local Abaixo do Greide</i>	<i>Condição do Local Acima do Greide</i>	<i>Condição da Tubulação</i>
<p><i>Tubulação de Água</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Localização ▪ Profundidade ▪ Material ▪ Idade ▪ Condição 	<p><i>Acesso ao Local</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Proximidade de edifícios ▪ Veículos estacionados e outros objetos não removíveis 	<p><i>Rupturas e vazamentos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Extensão ▪ Diâmetro e espessura ▪ Localização e profundidade do soterramento ▪ Serviços em comum (tubulação que serve mais de um consumidor)
<p><i>Geotécnico</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Características do solo ▪ Profundidade da tubulação ▪ Profundidade das fundações da rodovia 	<p><i>Tráfego</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Volume de veículos ▪ Volume de pedestre 	
<p><i>Outras Tubulações</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipos de serviços (esgoto, galerias de drenagem) ▪ Cabos (energia, gás, telefone) 	<p><i>Pavimentação e Paisagem</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Obstruções ▪ Condições Ambientais 	

Fonte:BOYD *et.al* (2001)

4.1.3. Métodos Destrutivos

No processo destrutivo a rede é substituída, ou seja, a rede antiga é retirada e uma nova tubulação de diâmetro igual ou superior é instalada. Durante a execução é necessário remover a superfície pavimentada, abrir a vala, deslocar a terra para outro local, remover a tubulação antiga, refazer o berço, assentar a tubulação, fazer o recobrimento da tubulação e, por fim, a repavimentação da superfície.

4.1.3.1. Substituição

No Brasil, quando as redes começam a apresentar problemas de altos índices de rompimento, altas taxas de incrustações e corrosão, é prática comum efetuar a sua substituição. A substituição deveria ser encarada como opção e não como alternativa única, pois, além de onerosa, exige a remoção de grande área pavimentada, movimento de terra, corte no abastecimento aos usuários além dos transtornos causados pela obstrução das vias públicas dificultando o acesso residencial (EBNER,1993).

Mas, em alguns casos, a substituição tem que ser encarada como medida necessária. MICHALIK (1994) comenta 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. Baseado em experiências operacionais da rede, HOOGSTEEN (1993) usa o número de interrupções, baseado nas taxas de manutenção, para opinar sobre a substituição da rede. Segundo DEB (1991) na análise sobre o rompimento e vazamentos ocorridos nas tubulações, a idade das tubulações é considerada como primeiro critério, para a substituição ou não, e comenta que existem outros critérios (secundários), mas não faz nenhum comentário sobre eles.

Em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, a cada ano, estima-se que 100 km de tubulações de ferro, cimento – amianto e PVC são substituídos por tubulações de PEAD. Na capital gaúcha, 1200 Km dos 2,7 mil km de redes de distribuição de água existentes são de PEAD segundo FLORES (2002). Em Cingapura, as companhias públicas de água implementaram um programa de substituição de tubulações e pretendem, até 2004, substituir um total de 280 Km de tubulações de ferro fundido, com mais de 50 anos de existência (ALLIANCE, 2002).

4.1.3.2. Instalação de Redes Paralelas

A colocação de uma rede paralela é utilizada quando o sistema de distribuição torna-se deficiente, principalmente no atendimento da demanda. As tubulações existentes geralmente estão em boas condições, não sendo necessária a aplicação de nenhum método de limpeza nem de renovação. Quando o crescimento da demanda supera em curto prazo a demanda prevista, a colocação de uma linha paralela à rede existente é uma ótima opção para a reabilitação do sistema (WALSKI,1985).

Outro estudo realizado por WALSKI (1982) verificou duas alternativas de reabilitação do sistema de distribuição, a colocação de uma rede paralela ou a limpeza e reabilitação das tubulações existente. Neste estudo concluiu-se que, a instalação de tubulações paralelas são consideradas mais econômicas para tubulações de pequenos diâmetros. Para as tubulações de grandes diâmetros, é mais econômica a limpeza e o revestimento. Mas o autor alertou que antes de comparar os custos, é necessário determinar quanto de tubulação deve ser limpa e revestida, e qual o diâmetro e a extensão da tubulação a ser duplicada.

4.1.4. Métodos Alternativos

Para a reabilitação do sistema de distribuição da cidade de Boston, foram estudados diversos cenários, variando desde a substituição total da tubulação até a aplicação de revestimento de argamassa de cimento, com o intuito de adequar o sistema. WOODFALL (1993) comenta que, depois de minuciosa investigação para determinar o estado da rede de distribuição, observou-se que a rede apresentava diferentes níveis de corrosão em sua extensão. Nos trechos da linha onde existiam altos índices de corrosão foi feita a limpeza e aplicado o revestimento com argamassa de cimento. Para os trechos que apresentavam pequenos pontos de corrosão, foi soldada uma placa de aço e aplicada uma demão do revestimento de argamassa. Nos trechos da rede que apresentavam problemas estruturais, optou-se pelo encamisamento da tubulação com outro tubo de aço de 42 polegadas.

Um programa piloto foi desenvolvido por BALL (1992), para comparar dois tipos de revestimento. Nesse projeto a utilização da câmera de vídeo foi fundamental. Em 1986, um processo de revestimento com carbonato de cálcio foi aplicado em parte da rede de distribuição e inspecionada em 1989. Através da câmera de vídeo verificou-se que o revestimento não havia sofrido nenhum ataque. Em 1990, numa outra parte da rede foi aplicado o revestimento de argamassa de cimento-sílica, que apresenta processo de cura mais rápida que o convencional. Em ambos os testes, o revestimento foi satisfatório.

Devido a grandes flutuações da operação na estação de tratamento, observou-se grande formação de incrustações nas paredes das tubulações principalmente pela formação de óxido de cálcio e óxido de ferro, na cidade de Moscou. De acordo com DYACHKOV (1994), um processo prático foi adotado para solucionar o problema. Foram utilizados raspadores plásticos movidos pela pressão da água foi aplicado nas tubulações, com o intuito de homogeneizar e remover parte das incrustações, criando uma camada fina, que funcionou como uma camada protetora para a parede da

tubulação. Esse processo somente pode ser aplicado em redes onde as incrustações tem de 5 a 8 cm de espessura e a camada protetora remanescente de 1 a 2 cm de espessura.

4.2. A Corrosão e as Necessidades de Proteção e Reabilitação

Neste item, é abordado o problema da corrosão dentro do sistema de distribuição de água e, apresentadas de forma resumida, técnicas que inibem a corrosão interna e externa das tubulações.

É de suma importância o controle e conhecimento da corrosão no sistema de abastecimento que permitirá a escolha de medidas adequadas para reabilitar o sistema através da aplicação de técnicas de combate à corrosão. Os processos corrosivos são extremamente complexos devido à grande variabilidade de condições dos sistemas de distribuição de água, ou seja, um fato particular pode ser crítico em um dado sistema e, irrelevante em outro sistema. Além do mais, a corrosão em si, tem diversas manifestações diferentes e pode ser avaliada de muitas maneiras.

Dentro do sistema de distribuição, as tubulações são as que mais sofrem os efeitos dos processos corrosivos, principalmente as tubulações de aço e ferro enterradas. Podem ser causados por: contatos elétricos entre dois metais diferentes, heterogeneidades do aço ou do ferro, heterogeneidade do solo, eletrólise causada por correntes elétricas de força eletromotriz ou ainda pela combinação de alguns ou de todos esses fatores atuando ao mesmo tempo.

Como comentado anteriormente, a deterioração e o desempenho estrutural de uma rede de água pode ocorrer devido a vários fatores. Tubulações de ferro fundido, ferro dúctil e aço podem estar sujeitas à corrosão interna e ou externa, resultando na formação de furos e redução da espessura da parede da tubulação, que pode levar a

vazamentos e eventuais rupturas. Tubulações a base de cimento tais como cimento amianto e concreto também podem estar sujeitas à deterioração devida a corrosão do cimento e ou da estrutura de aço. Adicionalmente todos os tipos de tubulações, incluindo os termoplásticos, podem estar sujeitos a falhas, nas juntas entre os trechos de tubulações e portanto, vazamentos excessivos que podem lavar o greide de assentamento e subsequente levar a falhas estruturais.

O levantamento dos elementos que provocam a corrosão permitirá medidas mais eficazes no combate a futuras corrosões, proporcionando maior vida útil da tubulação, minimizando o custo com reparos e aumentando a eficiência. É tarefa árdua elencar os prováveis elementos que provocam a corrosão, pois MCNEILL e EDWARDS (2001) apresentaram conclusões e teorias de diferentes estudos sobre a corrosão em tubulações de ferro fundido nos sistemas de distribuição de água, sendo entre eles discutidos: a influência do pH da água servida, alcalinidade, taxa de desinfetantes residuais, taxa de oxigênio dissolvido, velocidade da água, inibidores a base de fosfato, e atividade biológica dos microorganismos.

Segundo SKARDA (1994), a corrosão externa das tubulações de Zurique pode ser atribuída aos efeitos combinados de correntes erráticas, correntes corrosivas das linhas de bondes, estruturas de concreto reforçadas e macro-elementos. Esses efeitos são acelerados pelo solos agressivos e heterogêneos saturados de água e compostos galvânicos principalmente nas instalações de aterramento. Justificou que as reações de corrosão são aceleradas pelo aterramento de instalações elétricas, pelos condutores de para-raio em tubulações de água (contatos galvânicos), bem como por solos heterogeneamente agressivos intensificados pela água subterrânea. Num estudo realizado, análises quantitativas e qualitativas mostraram crescimento exponencial das intensidades das correntes erráticas nos últimos 70 anos na cidade de Zurique.

MARTINS *et al.* (1999) relatou que após alguns anos de funcionamento, a adutora de ferro fundido do sistema de abastecimento de água da cidade de Deodópolis – MS começou a apresentar uma série de furos num determinado trecho da adutora. No

estudo das prováveis causas da incidência, observou-se que a adutora estava o tempo todo sujeita às tensões induzidas pela linha de transmissão que cruzavam a tubulação e constataram a presença de correntes elétricas circulantes no solo causada pelo aterramento de uma torre de alta tensão instalada próxima a adutora. Foi descartado pelo fabricante qualquer problema técnico na fabricação da tubulação e observou-se que o processo corrosivo iniciava-se na parede interna brotando até a parede externa da tubulação. A solução encontrada para solucionar o problema foi a substituição do trecho da adutora de ferro fundido por tubulação de PVC.

Durante a fase de estudos de alguns cenários para a reabilitação do sistema de Boston, WOODFALL (1993) investigou a corrosão e identificou a presença de corrente parasita transmitida ao longo da rede de distribuição. Como medida preventiva foram instaladas conexões isolantes nas válvulas para prevenir a transferência de corrente. Segundo DYACHKOV (1994) a corrosão química e a corrosão devido a correntes elétricas têm deteriorado grandes extensões de redes de distribuição nas últimas décadas.

SKARDA (1994) comentou que durante o Congresso da IWSA realizado em Copenhague em 1991, estudos mostraram que a corrosão externa ocorrida nas tubulações enterradas nos sistemas de distribuição de água, representava 60% dos prejuízos na Noruega, 51% nos Estados Unidos e 30% na África do Sul. Em Zurique, onde 90% das tubulações utilizadas são de ferro fundido e o restante de PVC, aço e cimento amianto a corrosão externa está presente em 90% das tubulações enterradas. Comentou que o solo onde estão assentadas as tubulações são muito agressivos, justificando os altos índices de corrosão, e alertou que o uso de proteção externa apropriada possibilitaria uma economia de 1,5% dos investimentos necessários para substituição da rede de tubulações.

4.2.1. Reabilitação Química

As empresas de saneamento vêm enfrentando problemas no que diz respeito à qualidade da água servida, devido ao elevado número de reclamações quanto à qualidade estética da água. A presença de metais no sistema de abastecimento de água potável, tal como ferro, manganês e o cálcio comprometem o aspecto estético e conferem coloração à água, variando da cor marrom, quando combinada com o manganês, à cor avermelha quando combinada com ferro. Vale lembrar que a presença desses elementos na água não causam problemas a saúde da população servida, mas pode vir a comprometer a imagem da empresa.

Nos últimos anos, produtos a base de ortopolifosfato vêm sendo utilizados com o intuito de inibir a formação de compostos que conferem à água essas colorações. A adição do ortopolifosfato na água, protege a parede interna da tubulação de ataques posteriores devido à formação de uma fina película. Esses produtos são utilizados há vários anos nos Estados Unidos e em diversos países europeus.

Segundo os fabricantes, as misturas de polifosfato têm sido usadas como agente no combate a formação de incrustações, nas tubulações metálicas, causadas pela alcalinidade da água de abastecimento.

Em particular, um setor de abastecimento da cidade de Jundiaí começou a apresentar problemas, os consumidores de um bairro reclamando da baixa pressão e da qualidade da água fornecida. Verificou-se que a rede estava bastante comprometida com incrustações. Este bairro possuía 6000 metros de rede de distribuição em ferro fundido e fazia o atendimento a 500 residências. Segundo eng^o LIMA (2002) a empresa testou somente neste setor a utilização do ortopolifosfato. A concentração do produto na rede foi mínima, visando a garantia quanto à segurança, pois, segundo laudos técnicos apresentados pelas empresas participantes da licitação para fornecimento do ortopolifosfato, este produto apresenta um certo grau de toxicidade. Dessa forma procurou-se aplicar junto à rede de distribuição uma concentração muito

inferior àquela que se apresenta como tóxica com o intuito de não apresentar perigo à saúde pública. Dois trechos de tubulações foram seccionados e foram nomeados de “testemunhas”, para o estudo da eficiência da medida adotada. A seção da rede foi fotografada conforme mostrado na Figura 4.37 e pesada.



Figura 4.37: Testemunha utilizada

As "testemunhas" foram verificadas mensalmente, não apresentando alterações no peso das mesmas, assim sendo, a aplicação de ortopolifosfato não apresentou resultado satisfatório. Na Figura 4.38 é mostrado o interior da tubulação no início da medida implantada e depois de dois anos da adoção da medida.



Figura 4.38: Interior da testemunha antes e depois da aplicação do ortopolifosfato

Segundo LIMA (2002) verificou-se que houve uma alteração característica na incrustação, ou seja, selagem da incrustação inibindo seu crescimento, mas a medida adotada não foi eficiente para remover ou eliminar a incrustação. Por conta disso, foi reduzida ainda mais a dosagem do produto na rede em estudo. Hoje o produto é

aplicado nas saídas das ETAs e tem como principal função eliminar a ocorrência de cor e turbidez da água servida.

Um estudo semelhante à aplicação do ortopolifosfato foi realizado em Brasília, no efluente final da ETA – Brasília, que abastece uma região nobre da cidade, onde se concentram as redes mais antigas. A discreta tendência de remoção de tubérculos foi observada por COIMBRA *et.al.* (1999) mas, para os pesquisadores, essa redução não foi relevante. Não obstante, relataram as seguintes vantagens na adição do ortopolifosfato na redes de distribuição: redução do volume de água perdida com descargas efetuadas na rede; redução do número de descargas médias/mês na área em estudo; melhora significativa da qualidade de água distribuída nos parâmetros de cor, turbidez e ferro total quando comparado a outros dados obtidos antes da aplicação do produto; ganho significativo quanto à imagem pública da empresa, contribuindo para o índice de aprovação da ordem de 92%.

É importante destacar que quanto maior a incrustação de origem ferrosa, maior a concentração de hidróxido de ferro, o que resultará em maior consumo de cloro para neutralizá-lo, implicando em uma maior dosagem nas ETAs de modo a garantir o percentual de cloro livre na ponta da rede estabelecido pelo Ministério de Saúde. CANTOR *et.al.* (2000) comentaram que dada à natureza imprevisível das misturas a base de fosfato, as empresas de saneamento deveriam usar com cautela esses produtos químicos nos sistemas de distribuição de água e, outros inibidores de corrosão além dos compostos de fosfatos deveriam ser investigados.

Para MCNEILL e EDWARDS (2001) a prevenção da corrosão e o controle da água vermelha são dois fenômenos diferentes, mas esta distinção foi negligenciada em muitos estudos e, resultados equivocados foram apresentados sob a alegação do controle da corrosão devido à estabilização das partículas de ferro, em decorrência da diminuição visual da água vermelha. Mas, em verdade foi mascarada a concentração de ferro dissolvido na água e portanto o processo corrosivo continua.

Cabe lembrar que, a execução do revestimento interno da tubulação cessa o processo de incrustação que causa a obstrução da tubulação, melhorando consideravelmente o coeficiente de rugosidade e com isso, reduzindo as perdas de carga e o consumo de energia elétrica, necessário para o transporte durante o abastecimento de água. Além disso, elimina as reclamações a despeito da água suja e salvaguarda os recursos hídricos e de capitais uma vez que não será necessário desperdiçar água tratada durante operações de descargas na rede, na tentativa de melhorar a qualidade da água fornecida.

4.2.2. Revestimento Interno

As tubulações são, dentre os elementos do sistema de distribuição de água, as que mais sofrem deterioração. Antigamente as tubulações de ferro fundido sofriam corrosões, acarretando a formação de tubérculos em seu interior, os quais a longo prazo, diminuíam a seção útil da canalização e aumentavam a perda de carga. Para eliminar a corrosão sofrida pelas tubulações e a formação de tubérculos, no caso particular do ferro fundido, podemos lançar mão de várias técnicas de revestimento interno, citadas anteriormente, que podem ser aplicadas nas tubulações que estão em operação, com o intuito de eliminar a corrosão. Na Figura 4.39, são visíveis os tubérculos numa tubulação de ferro fundido.



Figura 4.39: Tubulação com presença de tubérculos

Na tubulação de ferro fundido a corrosão forma tubérculos. Para as tubulações de aço, observa-se mancha na forma de funil, ou seja, apresentam em uma de suas extremidades, área de grande corrosão que vai decrescendo até se tornar um ponto. WOODFALL (1993) comenta sua surpresa ao encontrar durante uma inspeção interna às redes de distribuição, a aplicação de betume e concluiu que o revestimento interno serviu como uma barreira à tuberculação excessiva.

Preocupada com altos índices de corrosão no interior das válvulas, uma empresa de Los Angeles fez um estudo extensivo com diferentes tipos de revestimentos internos apropriados para as válvulas. Segundo THODEN (1993), foi feita aplicação de um revestimento epóxi em válvulas de grande diâmetro que estão em funcionamento. As válvulas foram examinadas e um baixo nível de corrosão foi observado.

4.2.3. Revestimento Externo

Em casos de corrosividade elevada dos solos ou da existência de correntes parasitas, uma manta de polietileno pode ser usada como revestimento complementar à pintura betuminosa ou revestimento de zinco metálico. O mecanismo de proteção consiste em isolar as tubulações do contato direto com o solo corrosivo e evitar as entradas e saídas de correntes parasitas.

Os revestimentos externos são empregados com a finalidade específica de formar uma barreira isolante entre a tubulação de metal e solo a fim de combater a corrosão. Um bom revestimento deve ter as seguintes características: ter boa resistência à água, resistência elétrica, adesão ao material metálico, resistência a produtos químicos, resistência aos impactos, resistência às ações mecânicas do solo, ductibilidade, durabilidade e ser de fácil aplicação. Existem no mercado 4 tipos de revestimentos que são empregados com o intuito de minimizar o ataque corrosivo da

parede externa nas tubulações. Eles variam em qualidade, resistência, durabilidade e custo. Durante a escolha do revestimento é de suma importância considerar as características do local onde serão empregados.

Revestimento à base de esmalte de piche de carvão mais conhecido como “coal tar”, é sem dúvida o mais empregado por apresentar maior desempenho para as tubulações enterradas, principalmente em locais de solo agressivos, ou em trechos onde as tubulações estão sujeitas a fortes correntes de interferência. Para a aplicação de uma demão de “coal tar” a eficiência final é de 90%, e em locais mais críticos adotam-se duas demãos e a eficiência final conseguida é de 94%.

Revestimento à base de esmalte de asfalto de petróleo é utilizado em menor escala que o anterior. Quando comparado ao “coal tar” o revestimento de piche de carvão possui as mesmas características quando comparados enquanto novo, entretanto esse tipo de revestimento, envelhece mais rapidamente com o passar do tempo, perdendo sua eficiência.

Revestimento com fitas plásticas (normalmente são usadas de polietileno, de PVC e outras) apresentam a vantagem de ser aplicado a frio e de ser de fácil manuseio na aplicação. Mas, observa-se uma perda substancial dos valores de eficiência, ou seja, para aplicação de uma camada de fita a eficiência final é de 30% e para duas camadas, 40%.

Revestimentos com tintas betuminosas (geralmente as mais utilizadas são de epóxi piche de carvão ou alcatrão epóxi) têm a vantagem de serem aplicados a frio e serem de fácil manuseio, mas apresentam duas desvantagens: baixa resistência mecânica e a fina espessura do revestimento aplicado, o que acarreta baixa eficiência, ficando em torno de 50%.

A aplicação do revestimento betuminoso em tubulações de aço foi eficaz na presença de corrente parasita, segundo o relato de WOODFALL (1993). Depois da

inspeção na rede, descobriram a presença de corrente parasitária e preocupados, resolveram realizar furos de inspeção ao longo da tubulação. O revestimento betuminoso foi removido e o aço inspecionado. Nenhuma corrosão ou deterioração excessiva foi encontrada.

4.2.4. Proteção Catódica

A proteção catódica vem sendo utilizada há muitos anos nos países desenvolvidos depois de ter sido experimentada pela primeira vez na Inglaterra em 1824. No Brasil sua utilização se deu por volta de 1964, com a construção do oleoduto Rio-Belo Horizonte, da Petrobrás. A proteção catódica, pode ser descrita numa forma simples, como sendo o uso direto da eletricidade de uma fonte externa, em oposição à corrente de descarga da corrosão de áreas anódicas que estão presentes no solo. Um sistema de proteção catódica é eficaz quando todas as correntes coletadas na estrutura protegida do eletrólito circunvizinho se tornam uma única área catódica.

Devido a aplicação eficiente das técnicas de proteção catódica as empresas de abastecimento, de energia elétrica, petroquímicas, de distribuição de gás e indústrias de um modo geral têm empregando essa técnica. Os métodos por corrente impressa utilizam retificadores ou equipamentos simples que são alimentados por intermédio de um circuito de corrente alternada que fornecem a quantidade de corrente contínua necessária para a eliminação das pilhas de corrosão existentes na superfície que se deseja proteger. Pode-se citar como vantagens da aplicação desse método a boa eficiência na utilização de instalações metálicas de grande porte, fornecimento grande quantidades de corrente às estruturas, etc. Porém, tem como principal desvantagem a manutenção periódica e o custo com energia elétrica.

4.2.5. Proteção Anódica

Método galvânico ou por anodos de sacrifício são normalmente empregados em tubulações que apresentam revestimento de boa qualidade e solos que possuem baixa resistência elétrica. As principais vantagens da utilização desse método são: (a) baixo custo de instalação; (b) não necessitam do suprimento de corrente alternada no local; (c) os custos com manutenção após a instalação são mínimos e (d) raramente causam problemas de interferência em outras instalações metálicas enterradas.

A instalação de conexões de isolamento tem a finalidade de cessar as correntes erráticas que atacam as tubulações de aço. A corrente errática procura um meio receptivo e contínuo para transitar. Pesquisas identificaram que as conexões de isolamento não funcionam como se pensava, mas sua ausência aumentaria as chances de corrosão externas. Anodos tem sido usados para absorver corrente errática, entretanto, essa opção não é a melhor quando se faz a comparação em termos de custos, WOODFALL (1993).

4.2.6. O Emprego de Técnicas de Reabilitação no Combate à Corrosão

A ERCON (2001), empresa prestadora de serviços de recuperação de tubulações comentou que, a corrosão nas tubulações de aço difere significativamente da corrosão nas tubulações de ferro fundido ou ferro fundido dúctil. Nas tubulações de aço ocorre o aparecimento de “pits”, que furam o aço de dentro para fora, causando os vazamentos, com a localização dos “pits” não sendo uniforme. Observa-se um aumento da umidade do solo ao redor dos “pits”, criando desse modo, uma pilha eletrolítica. Ao revestir internamente a tubulação com argamassa de cimento há vedação dos “pits” e conseqüentemente, o desarmamento da pilha eletrolítica, uma vez que não há mais vazamento de água pelos “pits”, minimizando também o combate à

corrosão externa. No caso das tubulações de ferro fundido, ocorre uma reação química entre o metal e o oxigênio dissolvido na água transportada, formando o óxido de ferro que é o responsável pela formação dos tubérculos ou incrustações no interior das tubulações. O revestimento de argamassa de cimento evita a corrosão interna da tubulação mas, neste caso, não tem nenhuma ação sobre a corrosão externa causada por solos agressivos, e etc.

A argamassa de cimento é um revestimento que garante o efeito ativo e passivo segundo DYACHKOV (1994), pois participa quimicamente da proteção do ferro pelo fenômeno da passivação. No momento do enchimento, a água encharca pouco a pouco a argamassa de cimento e se enriquece de elementos alcalinos. Nesse processo da hidratação, os poros tornam-se saturados pela solução de hidróxido de cálcio, sendo formada uma micro-camada de óxido de ferro. Pequenas fissuras são observadas no revestimento interno de argamassa de cimento, porém, quando as tubulações são colocadas em uso, essas fissuras desaparecem sob o efeito do inchamento rápido da argamassa e da hidratação lenta dos elementos constituintes do cimento, principalmente o cálcio.

4.3. Investimentos em Reabilitação dos Sistemas

Conforme já foi discutido previamente, a deterioração dos sistemas constituem uma preocupação importante para os serviços públicos. Um dos principais papéis dos serviços públicos é fornecer água em quantidade e qualidade suficientes para a população. De acordo com PARK *et al.* (1998), da empresa de saneamento está condicionado a uma série de fatores técnicos e humanos, bem como o nível do fluxo de investimento de capital e manutenção dos sistemas.

Para DAY (1990), toda a empresa de abastecimento deve considerar o custo real de remover/substituir as instalações antigas contra o custo da reabilitação sistemática para prolongar a vida útil das instalações. A menos que a infra-estrutura

tenha sido negligenciada durante anos, a recuperação deverá ser menos custosa. A reabilitação pode incluir uma grande variedade de medidas, entre elas a inspeção dos motores das bombas, a substituição do sistema clorador, substituição das tubulações, revestimento interno das tubulações e a modernização das instalações.

Existem muitas maneiras de manter a integridade da infra-estrutura dos sistemas de abastecimento. Entre elas, pode-se citar: substituição programada, restauração durante os serviços de expansão das instalações, reformulação dos projetos e a modernização. Mas todas estas medidas necessitam de provisão de fundos, que infelizmente a maioria das empresas não possuem. Há necessidade de um programa de manutenção preventiva, a implantação de um avançado programa de recuperação e reposição. Estudar e discutir o problema da infra-estrutura deteriorada não resolverá o problema, mas sem a adequação de fundos para a manutenção e reposição de instalações e equipamentos antigos, torna-se crítica a segurança e a confiabilidade operacional de uma empresa pública de abastecimento (DAY,1990).

Mas uma das principais dificuldades encontradas pelas empresas, é a falta de recursos para investir em manutenção periódica. Segundo DAY (1990), a criação de um fundo para a manutenção das instalações e equipamentos seria ideal. A arrecadação de 1 ou 2% do custo original, deveria ser incluída anualmente no orçamento para a manutenção e reabilitação dos sistemas.

4.3.1. A Importância da Manutenção Adequada

Conforme comentado por DEB (1991), o controle efetivo da deterioração dos sistemas de abastecimento será eficiente quando as empresas desenvolverem dois planos independentes, um de manutenção e outro de reabilitação do sistema. Mas, é de fundamental importância para o sucesso do controle efetivo da deterioração que os decisores conheçam: a extensão, severidade e a natureza da deterioração; avaliem

alternativas que reduzam a taxa de deterioração e a substituição da seção deteriorada; realizem o desenvolvimento cuidadoso de um plano de reabilitação sistemático e, tomem ciência das prováveis tendências de deterioração do sistema.

Preocupado com a deterioração dos sistemas de abastecimento e com a manutenção de serviços de boa qualidade, HOOGSTEEN (1993) comenta que é surpreendente que ainda as empresas de água não se conscientizaram da importância de manter um completo sistema de manutenção e controle por parte das empresas. Medidas como: a manutenção da aplicação de revestimentos internos, limpeza da tubulação, substituição e reparos, substituição de válvulas e acessórios aumentariam a eficiência operacional do sistema e a liquidez das empresas.

A manutenção adequada dos sistemas de distribuição de água é um dos principais elementos para obtenção de uma infra-estrutura confiável, o que também está intimamente ligado ao crescimento econômico e à prosperidade da nação (PARK et. al.,1998). O`DAY (1992) comentou que durante a realização da manutenção, as empresas esquecem de contabilizar o tempo que permaneceram fora de serviço. Alertou sobre a necessidade de desenvolver novas técnicas que reduzam o tempo gasto com a manutenção, para diminuir o custo do serviço temporário e o custo global da reabilitação.

O crescimento da demanda dita a necessidade de construir instalações adicionais, as quais são dimensionadas para satisfazer o aumento da demanda. Contudo, em alguns casos, nota-se extrema deterioração das instalações existentes devido à idade ou, na grande maioria dos casos, à falta de manutenção adequada. Nestes casos, a falta da manutenção está intrinsecamente ligada ao aumento do custo com novas instalações, uma vez que terá que ser maior para suprir a deficiência das antigas, já que o custo com a reabilitação da instalação se torna impraticável (DAY,1990).

HOOGSTEEEN (1993) se mostra inconformado com o tratamento dado a manutenção dos sistemas pois é incorreto esperar que o sistema não funcione adequadamente para realizar a manutenção. O autor questiona o tratamento dado à manutenção corretiva dentro dos sistemas de abastecimento de água e ressalta os benefícios trazidos pela manutenção preventiva.

ISLEB e GRZYS (1999) citam que o maior problema enfrentado durante a reabilitação da estação de tratamento Wisconsin, Milwaukee, foi convencer as autoridades locais que a estação necessitava de investimento e que seria necessário construir uma sala de química separada dos componentes elétricos e mecânicos; atualizar antigos componentes, tais como válvulas, aquecedores, balança, filtros, etc.; e mudar a aparência do prédio para integrá-lo com as residências vizinhas. Depois de todos os transtornos, o projeto de reabilitação da antiga estação foi reconhecido, dando origem à uma foto na capa da revista da AWWA.

Nos últimos anos, a intensa concorrência entre indústrias, o prazo de entrega, e o número de reparos passaram a ser considerados relevantes para todos os segmentos das indústrias brasileiras, inclusive para as indústrias das águas. A motivação em prevenir contra as prováveis falhas nos sistemas deu origem à manutenção preditiva. Vários são os objetivos da manutenção preditiva:

- Determinar antecipadamente a necessidade de serviços de manutenção numa peça;
- Eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos;
- Reduzir o trabalho de emergência não planejado;
- Impedir o aumento dos danos e aproveitar a vida útil total dos componentes e equipamentos.

Entende-se que a manutenção preditiva é um tipo de ação preventiva pois está baseada no conhecimento das condições de cada um dos componentes das máquinas

e equipamentos. A premissa da manutenção preditiva é o monitoramento regular das condições mecânicas reais das máquinas e do rendimento operativo dos sistemas do processo. A coleta dos dados é efetuada periodicamente por um técnico que utiliza sistemas portáteis de monitoramento. As informações recolhidas são registradas numa ficha, possibilitando ao responsável da manutenção preditiva tê-las em mãos para as providências cabíveis. As técnicas de monitoramento podem incluir: análise de vibração, ultra-som, ferrografia, tribologia, inspeção visual entre outras técnicas de análise não destrutiva.

Com a medição e análise das vibrações de uma máquina em operação pode-se detectar, com antecipação, a presença de falhas que devem ser corrigidas, como exemplo: rolamento deteriorados, engrenagens defeituosas, rotores desbalanceados, eixos deformados, lubrificação deficiente, folga excessiva em buchas, problemas hidráulicos e cavitação. Preocupada em aumentar a vida útil do equipamento, diminuir o custos com reparos, melhorar a produtividade da empresa, limitar a quantidade de peças de reposição, a SANASA - Campinas, contratou uma empresa especializada para medir as vibrações de suas máquinas hidráulicas, conseguindo com isso minimizar o número e o custo das paradas não programadas devido a falhas mecânicas (ARTIMI, 2003).

4.4. Tubulações de Pequenos Diâmetros - Ramais de Entrada

São tubulações de pequenos diâmetros que têm a função de fazer a conexão entre o sistema distribuidor e as unidades de consumo. São consideradas como unidades de consumo as residências, indústrias, comércio, etc. Preocupado com a alocação de verbas limitadas no setor de abastecimento, SARZEDAS *et al.* (1999) comentou que durante a realização do estudo de controle de perdas, a SABESP pesquisou 20 setores de abastecimento considerados os mais críticos, em termos de perdas físicas, da Região Metropolitana de São Paulo, visando a priorização de seus

recursos financeiros e concluiu que os vazamentos não-visíveis representavam 85% das perdas físicas, os quais ocorriam em ramais prediais.

Em Dresden, na Alemanha, o resultado não foi muito diferentes, com 50% dos prejuízos ocorrendo nos ramais de entrada. Adicionado a este fato, 28% dos ramais são de chumbo ou chumbo revestido de estanho. Na visão de MICHALIK (1994) a substituição dessas tubulações deve ter prioridade durante o processo de reabilitação do sistema. Em Nürnberg, na Alemanha, há estimativa que 70% das fugas de água ocorrem nos ramais de entrada e devido a este fato, 7000 conexões domésticas foram substituídas e 39000 conexões foram renovadas (HIRNER,1994).

As tubulações de chumbo foram utilizadas nos Estados Unidos até a década de 80, e na Europa houve uma redução de seu uso na década de 40, devido à falta de material causada principalmente pela 2ª Guerra Mundial. KIRMEYER *et al.* (2000) estimam que existam em operação 3 milhões de linhas entre redes de distribuição e ramais de entrada em todos os Estados Unidos. A preocupação com os riscos à saúde da população levou as empresas de abastecimento de água a buscar novas tecnologias para sanar o problema, visto que, seria inviável a substituição da mesma. As técnicas e os procedimento para reabilitação dos ramais de entrada são semelhantes aos da reabilitação de adutoras. Dados e informações referentes a experiências de empresas com técnicas de reabilitação e substituição tubulações de chumbo foram coletados com base de levantamentos das empresas, estudos de casos e testes de campo. Foi pedido às empresas de abastecimento nos Estados Unidos, Canadá, Europa e Japão que respondessem a uma pesquisa referente a suas experiências com as técnicas de reabilitação e substituição de chumbo. Foi distribuído um total de 41 questionários e somente 23 responderam.

A pesquisa feita por KIRMEYER *et al.* (2000) mostrou que os Estados Unidos usam rotineiramente as tecnologias de substituição com abertura de valas, substituição numa nova rota e a substituição numa rota já existente com a mesma freqüência. No Canadá, predominou a tecnologia de uma nova rota tais como método perfuratriz

direcional, ou método sliplining. Na Europa, as empresas que responderam eram favoráveis às tecnologias de substituição com abertura de vala e substituição numa nova rota. Para surpresa, no Japão, as empresas que responderam indicaram que o método preferido era a tecnologia de substituição com abertura de valas, ou seja, o método tradicional. Foi pedido também que as empresas comentassem as maiores vantagens e desvantagens de cada tecnologia. Em geral, as respostas indicaram que, as alternativas sem aberturas de valas poderiam causar menos congestionamento de trânsito e custar menos que a substituição com abertura de valas, mas que essas tecnologias tem seu uso limitado pelas condições de solo e da tubulação. Quando questionada sobre os impactos das condições do local e facilidades de instalação de cada tecnologia, de maneira geral, indicaram que o desempenho das tecnologias provavelmente seria afetado pelas restrições do local ou condições das tubulações de chumbo já existente. Afirmaram que a substituição com abertura de valas teve maior impacto junto aos consumidores. Na Tabela 4.12 são apresentadas as técnicas que foram utilizadas na reabilitação dos ramais, apontando de forma resumida suas vantagens e desvantagens.

No Brasil, quando se detecta a necessidade de reabilitação dos ramais de entrada, a técnica empregada é a substituição da tubulação tradicional. As empresas visitadas comentaram que o maior problema não está relacionado com o estado da tubulação, mas está intimamente ligado à execução do serviço, ou seja, baixa qualidade.

Tabela 4.12: Comentários das técnicas empregadas na reabilitação dos ramais.

<i>Técnicas</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Método Tradicional</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Os procedimentos são simples, não necessitando de mão de obra especializada. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Altos custos associados à restauração da pavimentação e paisagem; ➤ Interrupção do trânsito.
<i>Revestimento de epóxi</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baixos riscos de danos à outros serviços enterrados; ➤ Menos interrupções de tráfego; ➤ Pode ser usado em qualquer tipo de solo; ➤ Mínimo impacto ao meio ambiente e aos consumidores. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ O ramal só poderá entrar em operação, após 24 horas da aplicação do epóxi.
<i>Método de Brusting ou CIPP – seccionado</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Possibilita a troca do ramal a custo inferior comparado ao método tradicional; ➤ Mínimo impacto ao meio ambiente e aos consumidores. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Alto custo, quando comparado com o revestimento de epóxi
<i>Sliplining</i>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baixos riscos de danos a outros serviços enterrados; ➤ Menos interrupções de tráfego; ➤ Pode ser usado em qualquer tipo de solo; ➤ Mínimo impacto ao meio ambiente e aos consumidores. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uso limitado em tubulações com muitas conexões

Fonte: KIRMEYER, G. J., *et.al* (2000).

4.5. Materiais das Tubulações

Breves comentários foram feitos por HOOGSTEEEN (1993) a respeito dos principais materiais utilizados na fabricação das tubulações para abastecimento de água, quando se destacou uma pesquisa sobre a relação entre capacidade e resistência, considerando a idade dos diferentes materiais, o que seria de grande importância para prever a vida útil da tubulação e planejar medidas de reabilitação. Alguns comentários são apresentados a seguir:

Ferro fundido: é um bom material, tendo sido muito utilizado no passado e ainda o é hoje. O revestimento interno pode separar da parede devido à idade e à qualidade da água transportada. A capacidade de transporte pode ser reduzida, havendo necessidade de limpeza e aplicação de um novo revestimento;

Cimento amianto: é muito usado nas redes de distribuição. Se for de boa qualidade terá maior durabilidade. Quando a qualidade for insuficiente surgem os primeiros problemas depois de 30 a 40 anos de uso. Atualmente as tubulações de cimento amianto não são aceitas pelo governo brasileiro, americano e europeu, devido ao risco potencial à saúde, sendo seu uso somente permitido nos reparos das redes antigas;

PVC: é um material mais recente aplicado nas redes de distribuição e apresenta a vantagem de ocorrer uma interação mínima com a água transportada (material inerte). A intensidade de manutenção é baixa. Talvez tenha efeito adverso, especialmente em combinação com as condições de assentamento e variação da pressão na rede;

Concreto e aço galvanizado: são utilizados em partes especiais do sistema de distribuição;

Chumbo: eram utilizados principalmente em ligações de ramais de entrada e redes domésticas. Há alguns anos a utilização das tubulações de chumbo foi abolida devido à sua toxicidade. A substituição gradual dessas tubulações é prática usual nas empresas de abastecimento.

PEAD: muito utilizado nas áreas de telefonia e gás natural, as tubulações de PEAD no Brasil ainda tem discreta utilização na área de saneamento, devido ao seu alto custo. As tubulações de PEAD trazem muitas vantagens para a instalação/substituição de adutoras, redes de água e outros fins, devido a facilidade no transporte e manuseio, flexibilidade, durabilidade e trabalhabilidade, quando comparado a outros materiais tradicionais.

A maioria das reabilitações realizadas nos sistemas de distribuição empregavam tubulações de aço e/ou ferro fundido, segundo os autores DYACHKOV (1994), WOODFALL (1993), THODEN (1993), ISLEB (1999), KRAMER (1993), GRAY (1992), BALL (1992) e HOOGSTEEEN (1993).

Vários são os materiais empregados para fabricação das tubulações usadas no abastecimento de água. A Tabela 4.13 apresenta os materiais normalmente utilizados nos sistemas de abastecimento descritos na revisão bibliográfica. A autora faz um breve comentário sobre a vantagem e desvantagem de usá-las, assim como, as unidades onde geralmente são empregadas.

Tabela 4.13: Os principais tipos de tubulações empregadas no abastecimento de água.

Tubulação	Utilização	Vantagens	Desvantagens
<i>Ferro Fundido</i>	Adutoras Estação de tratamento Reservatórios Redes de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> • Grande resistência à ação de carga externa • Grande resistência à corrosão • Fácil instalação Custo = fibrocimento	✓ Baixa resistência à ação de choque devido a cristalização do carbono ✓ Resistência ao escoamento aumenta com o tempo
<i>Aço</i>	Adutoras Sub-adutoras Linhas tronco Travessias Estação de Recalque Sifões	<ul style="list-style-type: none"> • Grande resistência à pressão interna • Relativa resistência à pressão externa • Fácil instalação 	✓ Baixa resistência à ação de choque ✓ Resistência ao escoamento aumenta com o tempo ✓ Pequena resistência à corrosão ✓ Alto custo
<i>Concreto Simples e Armado</i>	Captação Adutoras ETA (descargas e drenos)	<ul style="list-style-type: none"> • Boa resistência a corrosão • Relativa resistência à pressões internas e externas • Menor preço 	✓ Baixa resistência à ação de choque ✓ Resistência ao escoamento ✓ Díficil reparo ✓ Díficil instalação
<i>Ferro Dúctil</i>	Adutoras Estação de tratamento Reservatórios Redes de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> • Grande resistência à pressão interna – 3 vezes maior ferro fundido • Grande resistência á carga externa • Boa resistência à corrosão • Fácil instalação 	✓ Resistência ao escoamento aumenta com o tempo ✓ Deve-se evitar seu uso em linhas de recalque
<i>PEAD</i>	Adutoras Captação Redes de distribuição Estação de bombeamento	<ul style="list-style-type: none"> • Boa resistência a pressão externa e interna • Fácil instalação • Não apresentam aderência 	✓ Alto custo
<i>Fibrocimento</i>	Captação Redes de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> • Relativa resistência à pressão externa • Fácil instalação 	✓ Baixa resistência estrutural ✓ Pequena resistência à corrosão

5. O Uso de Modelos Matemáticos no Planejamento da Reabilitação

Nas últimas décadas, as técnicas de otimização e simulação têm papel de destaque na análise dos Sistemas de Recursos Hídricos, pois possibilitam uma modelagem mais realista dos problemas e a viabilidade de análise em microcomputadores. As técnicas de otimização são poderosas ferramentas, principalmente para solucionar problemas de alocação de recursos na indústria, agricultura, comércio e no gerenciamento dos recursos hídricos (VENTURINI,1997).

É necessário entretanto, um cuidado especial na formulação dos problemas, sendo necessário estabelecer:

- a) **função objetivo:** é uma função analítica das variáveis de decisão e parâmetros que expressam o objetivo que deseja ser alcançado;
- b) **variáveis de decisão:** são variáveis que representam os aspectos dos problemas que podem ser controlados;
- c) **restrições:** são o conjunto de equações ou inequações que devem ser satisfeitas, representando as limitações dos recursos disponíveis ou exigências que devem ser controladas.

Segundo BARBOSA (1991), deve-se tomar um cuidado especial na formulação do problema, na análise e interpretação dos resultados, sendo necessário reavaliar as hipóteses assumidas em confronto com os resultados obtidos, testar outras hipóteses e sobretudo entender o modelo matemático.

Para LOESCH e HEIN (1999), a qualidade do modelo está associada à exatidão com que ele representa a realidade. Nem sempre todos os aspectos intervenientes podem ser controlados. Surge então a necessidade de saber seleccionar o que é relevante para o problema e justificar a importância da formação de uma equipe multidisciplinar para a modelagem de problemas complexos.

5.1. Técnicas de Otimização

De acordo com a natureza do relacionamento matemático usado entre os termos que compõem a função objetivo e as restrições, podemos fazer a seguinte classificação das técnicas analíticas de solução:

Programação Linear (PL): pode ser usada para problemas onde a função objetivo e o conjunto de restrições mantêm relações lineares. Uma das vantagens de utilizar a *PL* é o tratamento de problemas de grandes dimensões. Como desvantagem são citadas as necessidades de algumas simplificações no equacionamento do problema.

Programação Não Linear (PNL): pode ser aplicada a problemas onde a função objetivo e o conjunto de restrições não tem natureza linear. Como desvantagem podemos citar que mesmo que a *PNL* considere todas as variáveis como contínuas, apresenta alguns aspectos negativos, ou seja o conceito de gradiente o qual indica a direção da pesquisa, para a nova solução é baseado na solução existente. Então as

soluções obtidas estão intimamente ligadas à solução inicial, respeitando o cumprimento dos critérios de convergência, o que não impede que, partindo de uma mesma solução inicial, se obtenha soluções diferentes.

Programação Dinâmica (PD): é utilizada quando a tomada de decisão está relacionada a uma seqüência de decisões inter-relacionadas. O problema é dividido em estágios, em cada qual é estabelecida uma decisão. Cada estágio tem um conjunto de estados associados a ele, a decisão, dado o estado atual, encontrar uma política ótima para os estágios restantes independentes da política adotada nos estágios anteriores (Princípio da otimalidade de Bellman). A vantagem da utilização da *PD* é exigência de poucas simplificações, e a possibilidade de resolver problemas lineares e não lineares, bem como a formulação de decisão na forma de comandos discretos ou contínuos. Como desvantagem pode-se citar, o problema da dimensionalidade que decorre do grande número de combinações entre discretizações de cada estado.

Programação Inteira e Mista: tem a mesma estrutura da *PL*. É conhecida como Programação Inteira quando é caracterizada pela presença de restrições de integridade, ou seja, estas restrições se impõem as variáveis e fazem exigências em que deverão ser assumidos somente números inteiros para as variáveis. Mas, quando somente algumas restrições de integridade são impostas, dando uma maior flexibilidade ao modelo, temos a Programação Inteira Mista.

Rede de Fluxos: a otimização de rede de fluxos é um caso particular da *PL*. Pode ser aplicada quando as restrições impostas no problema podem ser colocadas em termos de fluxos entre os nós da rede. Os fluxos são quantidades que circulam nas redes através dos arcos, que são

conexões entre os nós, levando em consideração o custo unitário durante circulação.

Simulação: é uma técnica que se faz um trabalho com analogias, conservando características físicas ou lógicas dos sistemas, tentando tirar conclusões do modelo formulado. O objetivo da simulação é reproduzir a essência de um sistema sem reproduzir o sistema em si. A simulação difere da otimização por não apresentar natureza otimizante, O interesse em se utilizar a simulação não está no encontro da solução ótima mas sim, conseguir observar o comportamento do sistema sob diferentes condições.

A tomada de decisão é parte integrante na vida cotidiana e consiste, de forma geral, na identificação do problema e na busca da melhor solução possível. Antigamente, as decisões tomadas pelos diversos setores da sociedade fundamentavam-se, principalmente, em dois critérios, o econômico e o financeiro.

A mudança na forma de pensar e agir dos decisores foi descrita por ZELENY (1982), a idéia de maximização começou a perder terreno. Nos processos de decisão, alertando que o “mais” não é necessariamente o “melhor”. Na visão de ROY (1985), os decisores ou atores, baseiam-se em seus valores, desejos, interesses e preferências intervindo de alguma forma na decisão e salienta que existem diferentes tipos de decisores e atores. A distinção está nas funções que estes irão desempenhar durante o processo decisório, ou seja, o grau de intervenção de cada decisor associado ao poder de influenciar a tomada de decisão. E ressalta que, os decisores são atores que têm o poder e a responsabilidade de ratificar a decisão e assumir as conseqüências da mesma, sejam elas positivas ou negativas

Para BANA e COSTA (1992), num processo de decisão estão presentes elementos subjetivos, associados aos valores dos decisores, traduzidos em objetivos. Não somente os aspectos lógicos ou racionais são levados em consideração durante o

processo de decisão, mas também os desejos e sentimentos, uma vez que o sistema de valores dos decisores influenciam na formação de seus objetivos, o que implica dizer que o objetivo tem natureza intrinsecamente subjetiva e finaliza dizendo, “*a procura da objetividade é uma preocupação importante e, crucial seria esquecer que a tomada de decisão é antes de tudo uma atividade humana, sustentada na noção de valores, e que a subjetividade está onipresente e é o motor da decisão.*”

Por isso, a estrutura do problema deve ser vista como um processo de aprendizagem, isto é, passível de mudanças ao longo da realização do estudo, possibilitando desse modo a reestruturação do problema, à medida em que os decisores formulam melhor o problema em questão. Mas cabe lembrar que o amplo ato de decidir requer um cuidado especial, principalmente, em torno da estrutura decisória adotada e poderá conduzir a conclusões errôneas ou inadequadas para o problema.

Na visão de GOMES e MOREIRA (1998) a utilização de métodos analíticos no apoio multicritério à tomada de decisão, constitui uma nova e dinâmica área de pesquisa para suporte à decisão, especialmente em decisões grupais e à negociação particular. Comenta que os métodos multicritérios para a tomada de decisão agregam um valor substancial à informação, na medida em que não apenas permitem a abordagem de problemas considerados complexos, mas auferem ao processo de tomada de decisão uma clareza e transparência quando esses métodos são empregados.

5.2. O Emprego da Otimização e Simulação

Durante a revisão bibliográfica, observou-se que até meados dos anos setenta, a maioria dos trabalhos apresentados estavam voltados ao dimensionamento de rede, utilizando otimização e simulação, com a minimização do custo de projeto sendo o principal objetivo (SHAMIR e HOWARD, 1968; JACOBY, 1968).

Na década de oitenta, devido à preocupação com o custo da energia elétrica, foram desenvolvidos vários algoritmos com o intuito de minimizar o custo operacional dos sistemas, associado ao custo da energia elétrica. ORMSBEE e LANSEY (1994) usaram diferentes modelos de simulação para análise sobre o controle ótimo. LANSEY e MAYS (1989) apresentaram uma comparação entre diversas modelagem para a simulação, e discutiram as vantagens principalmente associadas à facilidade de operação. JOWITT e GERMANOPOULOS (1992) desenvolveram um método usando a programação linear, aplicando a linearização nas equações e restrições, para otimizar a operação de bombeamento num período de 24 horas.

Em meados da década de noventa, torna-se visível que as redes existentes nem sempre operam em níveis satisfatórios, e que medidas em nível estrutural são necessárias. Mas a escassez de recursos financeiros, a falta de planejamento e manutenção agravam a deterioração dos sistemas existentes. A dificuldade em tomar decisão, considerando a escolha sobre a melhor alternativa para reabilitar os sistemas, vem incentivando o uso da otimização multiobjetivo (ou multicritério) e da simulação. E neste caso em particular, o atendimento aos usuários do sistema só terá bons resultados quando as empresas de saneamento conseguirem minimizar o déficit de água, maximizar a segurança e a confiabilidade do sistema, maximizar a qualidade do serviço prestado, empregar tarifas adequadas na cobrança dos serviços, etc.

Portanto, modelos que auxiliam na tomada de decisão, prevendo a reabilitação da rede são de grande valia no equacionamento do problema. A melhoria na performance do sistema pode ser conseguida através da substituição, duplicação de alguns trechos das tubulações e ou outros componentes, tais como: válvulas, bombas, construção de reservatórios, etc., na rede existente, ou ainda, a adição de novos componentes. Estas medidas podem ser tomadas de forma conjunta ou separadamente, dependendo da deficiência de cada sistema analisado. O problema na tomada de decisão é eleger quais componentes adicionar ou utilizar, com o objetivo de maximizar os benefícios resultantes dessas alterações impostas ao sistema, dado que

os recursos são insuficientes para propiciar a melhoria exigida no sistema como um todo.

Nos últimos anos, esforços consideráveis têm sido dispendidos de modo a se obter métodos eficientes na análise de redes, com o auxílio de sofisticados programas de computadores para avaliar as variações no sistema de abastecimento de água e simular o escoamento na rede. Com a disponibilidade do computador, é possível ter uma abordagem sistêmica, a fim de se obter o menor custo de projeto e conseguir a automação dos procedimentos repetitivos.

BRAGA (1997) comenta que os modelos multiobjetivos têm sido usados no projeto, na modelagem e no planejamento de muitos sistemas complexos de alocação de recursos, nas áreas de transporte urbano, na agricultura, pecuária, administração de saúde, no planejamento de novas cidades, na geração de energia, etc. Na área de abastecimento de água, FRANCATO (2002) aplica um modelo de otimização multiobjetivo que implementa o método dos pesos para o planejamento de operação de redes hidráulicas de distribuição de água com horizonte estendido de 24 horas.

Assim, uma análise multiobjetivo será extremamente útil e flexível para abranger a maioria dos aspectos decisórios necessários, permitindo que avaliações e futuros aperfeiçoamentos no atendimento das empresas de abastecimento sejam feitos. Numa formulação multiobjetivo, a reabilitação do sistema deverá considerar também objetivos tais como: maximização do custo-benefício, minimização com investimentos, maximização da confiabilidade, etc.

5.2.1. Modelos Matemáticos Aplicados aos Sistemas de Abastecimento

Os modelos matemáticos hidráulicos são de grande valia no diagnóstico dos problemas nos sistemas de abastecimento de água, por facilitar a análise da situação

atual, permitirem prever futuros gargalos do sistema, possibilitam encontrar várias alternativas de soluções para sanar o problema e garantem a confiabilidade das ações propostas. O levantamento das várias alternativas e a verificação do comportamento da implantação de uma ou mais alternativas conjuntamente no restante do sistema é facilmente visualizado nos modelos matemáticos.

5.2.1.1. Combate à Redução das Perdas

Na visão de ALLAN (1998) a modelagem auxilia na política de gerenciamento, controle de perdas e reabilitação, mas um ganho secundário da modelagem é realçar e resolver anomalias nos registros de dados, identificando previamente fontes de consumos desconhecidas e alguns grandes vazamentos.

Preocupado com as perdas ocorridas nos sistemas, GERMANOPOULOS (1995) utilizou o Método da Teoria Linear, linearizando as equações não lineares da rede, para obter as aberturas das válvulas redutoras de pressão (PRV) com o intuito de minimizar as pressões na rede e reduzir as perdas por vazamentos, visto a ocorrência dos altos valores observados pelas empresas de saneamento na Grã Bretanha, ou seja, 50% do abastecimento total.

A redução dos vazamentos mediante o controle de pressão é um método bastante simples e direto, que pode ser aplicado com outros métodos que incluem a detecção e o reparo nas redes de distribuição, conforme GERMANOPOULOS e JOWITT (1989) e JOWITT e XU (1990).

REIS *et al.* (1997) aplicaram a técnica de algoritmo genético para reduzir as perdas físicas, através da localização das válvulas controladoras de pressão. A grande vantagem na utilização do algoritmo genético é o sucesso apresentado na busca de regras operacionais com a interface de um simulador hidráulico.

VAIRAVAMOORTHY e LUMBERS (1998), preocupados em minimizar as perdas ocorridas no sistema de distribuição de água, desenvolveram um modelo de otimização usando a técnica de programação não linear, sendo empregado o método de redução quadrática para reduzir o esforço computacional. Os autores indicam a colocação de válvulas redutoras de pressão nos sistema de distribuição, possibilitando uma redução das perdas físicas, e alertam que, sua inclusão não pode ser de maneira indiscriminada, com a técnica de otimização permite estabelecer o melhor cenário. Afirmando que a implantação das válvulas redutoras de pressão em locais adequados pode produzir uma redução de 20 a 30% das perdas físicas.

5.2.1.2. Minimização do Custo Operacional

Dentro de um sistema de abastecimento de água, os sistemas de bombeamento e tratamento de água gastam entre 2 a 3 % da energia consumida no mundo (BANCO MUNDIAL, 1998). A autora acredita que ocorrerá o acréscimo da demanda de energia, uma vez que, está se tornando prática usual ter que captar águas de boa qualidade provenientes de locais mais distantes, ou mais profundos.

O custo operacional de um sistema de bombeamento pode ser dividido em dois componentes associados ao consumo de energia elétrica: (a) o custo de energia elétrica efetivamente consumida pelo sistema; (b) o custo de demanda de pico, o qual exige do fornecedor de energia elétrica uma maior capacidade instalada. A maioria dos modelos considera apenas a minimização do consumo de energia, a qual deverá ser conseguida através de uma ou mais medidas: redução de vazão bombeada, redução da carga total fornecida ao sistema, aumento da eficiência do sistema de bombeamento e o uso adequado dos reservatórios (VENTURINI, 1997).

LUVIZOTTO JR. (1995) aponta como objetivo da operação de sistemas de abastecimento de água o atendimento das necessidades de consumo, com baixo risco,

com a minimização dos custos operacionais e, de maneira implícita, com o melhor aproveitamento do sistema a fim de retardar investimentos com futuras ampliações. Pode-se dizer de maneira simplificada que a operação de um sistema consiste em definir uma seqüência temporal de manobras a serem exercidas sobre os elementos ativos do sistema, tais como válvulas e bombas.

No Brasil não existem estudos que forneçam uma indicação das possíveis economias que se podem obter com a melhoria na operação dos sistemas de abastecimento. TARQUIM e DOWDY (1989), estimam que a energia consumida anualmente nos Estados Unidos é da ordem de $9,7 \times 10^9$ kWh em sistemas de bombeamento público de água. Baseado em dados da prática operativa na França, JARRIGE (1993) assinala que reduções na conta de energia elétrica devido à minimização variam entre 5 a 20% dos custos associados ao bombeamento.

Na Columbus Water Works (CWW) em Columbus, Georgia, o custo com energia representa a maior despesa da empresa de saneamento. Por isso, foram feitos investimentos significativos na modernização de equipamentos e instalação de inversores de frequência. Essa medida, proporcionou uma redução de 20% do custo de energia e o retorno do investimento empregado no período de um ano. A instalação de capacitores pode reduzir a energia necessária para ativar certos equipamentos, pois são dispositivos que tem a função de armazenar (ALLIANCE, 2002).

Dependendo da constituição do sistema, uma ou mais medidas podem ser tomadas para miminizar o custo de energia, conforme listado a seguir:

- ✓ Atualização de equipamentos;
- ✓ Redução de vazamentos e outras perdas;
- ✓ Operar tubulações com baixo atrito;
- ✓ Bombas acopladas com inversores de frequência
- ✓ Instalação de capacitores e transformadores.

5.2.1.3. Reabilitação dos Sistemas

De acordo com PARK *et al.* (1998), uma estrutura de tomada de decisões é útil para ajudar a identificar a melhor política de manutenção e recuperação, considerando objetivos não comensuráveis de minimização de custos com manutenção, reparos e reposição e a maximização da confiabilidade e desempenho da rede. Uma otimização multiobjetivo pode ajudar a alocar os recursos limitados para alcançar com maior eficiência os objetivos. WALSKI (1986) fez uma análise entre o custo com a duplicação e o custo com a manutenção da rede apresentando uma estrutura para o auxílio na tomada de decisões, na reabilitação do sistema de abastecimento de água e sugeriu algumas alternativas para problemas específicos.

WOODBURM *et al.* (1987) propuseram uma técnica que utiliza a programação não linear acoplada a um simulador. Esta técnica, sem dúvida, possibilita uma maior aplicabilidade em relação à otimização isolada. A metodologia é baseada na interface do modelo de programação não linear com um modelo hidráulico de simulação, com o intuito de resolver implicitamente as equações de continuidade e de carga que são descritas durante o escoamento hidráulico no modelo de otimização. O comprimento e o diâmetro foram tomados como variáveis de decisão na substituição ou expansão do sistema. O modelo busca o mínimo custo com reabilitação, considerando o custo com substituição, revestimento, manutenção e custo com energia elétrica. Mas verificaram que o modelo forneceu soluções não realistas.

Um modelo semelhante foi proposto por KIM e MAYS (1990), que fizeram uso da programação não linear acoplado a um simulador hidráulico, utilizando variáveis inteiras para representar a decisão de substituição/reabilitação, ao invés de utilizar o comprimento da tubulação. Comentam também que a garantia de encontrar o ótimo global não é assegurada.

Vários artigos foram escritos baseados no histórico da manutenção. Entre eles, SHAMIR e HOWARD (1979) propuseram um modelo para tomada de decisão baseado no histórico dos rompimentos, ou seja, número de manutenções realizadas, com o cotejo entre o custo relativo ao reparo (manutenção) e o custo da substituição das tubulações. Apresentaram uma técnica para identificação de quando as tubulações deveriam ser substituídas ao invés de realizar constantes manutenções na rede. Questões relativas à segurança do sistema, baseadas no número de rompimentos das tubulações, não foram incorporadas ao modelo.

Não obstante, KETTLER e GOULTER (1985) utilizaram o histórico para verificar se havia alguma relação entre a taxa de ruptura e o diâmetro da tubulação para os tubos de ferro fundido e fibrocimento. Este estudo mostrou que há uma redução na taxa de ruptura com o aumento do diâmetro da tubulação e existe também uma correlação entre o número de ruptura e a idade da tubulação. Utilizando análise multiobjetivo, GOULTER (1986) desenvolveu dois modelos. Em um deles analisou a relação entre o custo do capital inicial e o custo com reparos e a manutenção subsequente. No outro, examinou a relação entre o custo da tubulação inicial e a segurança dos tubos dentro da rede de distribuição. Os dados de rompimentos das tubulações foram usados com o intuito de limitar o número de falhas esperadas ou permitidas em cada setor da rede. Baseado nos dados históricos de rompimentos das tubulações. DEB (1991) propôs um modelo com o objetivo de orientar o programa de manutenção efetiva de substituição e reabilitação, por meio de uma função de natureza exponencial, que considera idade da tubulação - ruptura, e prevê taxas de futuras rupturas numa seção particular da tubulação.

5.3. Otimização Multiobjetivo ou Multicritério

Ao final da 2ª Guerra Mundial, a Europa encontra-se devastada pela guerra e os países destruídos necessitavam de alimentos, medicamentos, máquinas, transporte,

energia entre outras necessidades. Até os anos 60, os Estados Unidos tiveram uma notável hegemonia industrial, comercial e econômica. Neste contexto de mercado consumidor abundante, a indústria americana não se preocupava com o custo ou com a qualidade, uma vez que não havia concorrência para se preocupar. Por esse motivo, os processos de tomada de decisão limitavam-se à eficiência produtiva da empresa.

Com a recuperação da Europa e da Ásia na década de 70, intensificou-se a disputa por mercados externos. A reestruturação da economia mundial intensificou a competição internacional, estabelecendo uma nova dinâmica. A Pesquisa Operacional começou a redirecionar os tomadores de decisão a um determinado curso de ação, com o propósito de solucionar o problema. A partir destas constatações, os tomadores de decisão viram a necessidade de incorporar fatores considerados importantes para a tomada de decisão, quer sejam eles tangíveis ou intangíveis. As divergências de opiniões entre os diversos decisores envolvidos, bem como os possíveis imprevistos que poderiam ocorrer começaram a ser considerados.

Neste contexto, a otimização multiobjetivo ou multicritério está relacionada ao estudo de problemas que envolvam mais de uma função objetivo, ou seja, estuda problemas de otimização vetorial. Os objetivos podem ser conflitantes, sendo um dos pontos cruciais na chamada análise multicritério, a definição dos objetivos a serem considerados numa determinada situação decisória. Os objetivos devem refletir as aspirações dos decisores em relação ao alcance de uma determinada meta, maximizando ou minimizando o objetivo.

Num processo de decisão, dificilmente a decisão é tomada por apenas um decisor. Geralmente há vários decisores envolvidos no processo, e estão distribuídos numa hierarquia, ou seja, o nível do decisor depende da sua posição hierárquica para influir ou interferir nos objetivos e critérios de decisão. É normal que cada decisor tente defender seu próprio ponto de vista, e cada um irá avaliar os critérios e objetivos de acordo com seu interesse particular, implicando em competição de poder e conflito de interesses.

A busca da solução de um problema multiobjetivo geralmente trata de objetivos conflitantes, pois quando é atingida a maximização de um objetivo, não implicará dizer que, todos os demais objetivos foram maximizados. O termo "solução ótima" deve ser deixado de lado quando tratamos de problemas multiobjetivo, preferencialmente utilizando-se o termo "solução não-dominada". Uma solução factível é chamada de "solução não-dominada", quando não existe outra solução que aumente um dos objetivos sem causar degradação a outras funções. O primeiro passo dentro de uma análise multiobjetivo consiste em encontrar o conjunto das soluções não-dominadas dentro da região de factibilidade e, fazendo uma análise, o decisor deverá selecionar entre as alternativas disponíveis a "solução de compromisso", que melhor atenda às suas expectativas (SIMONOVIC, 1998).

De acordo com BANA e COSTA (1995), a tomada de decisão pode ser de forma simples definida como um esforço para resolver o dilema dos objetivos conflituosos, cuja presença impede a existência da 'solução ótima' e conduz à procura da "solução de melhor compromisso". Daí, a grande importância dos métodos multicritérios ou multiobjetivos como instrumentos de apoio à tomada de decisões. É necessário justificar a escolha de maneira clara e não ambígua. Pelo fato de as pessoas terem diferentes níveis de incerteza, e tenderem a se sentir expostas quando lhes é pedido que revelem a sua opinião, é necessário que a decisão esteja apoiada num processo formal e claro de avaliação. Desta forma, pode-se auxiliar o decisor a determinar as vantagens e desvantagens comparativas e selecionar a solução mais satisfatória

Modelos que utilizam análise multicritério permitem ao decisor uma análise simultânea de alguns aspectos tais como: sociais, econômicos, políticos, ambientais, financeiros e legais, até mesmo aspectos não-comensuráveis. Entretanto, a experiência e o conhecimento das pessoas envolvidas na decisão é tão valioso quanto aos dados utilizados.

ZOPOUNIDIS (1999) comenta a necessidade de uma análise multicriterial, apontando três motivos básicos:

- ✓ A formulação do problema apenas em termos de busca de um valor ótimo conduz o decisor a ter um ponto de vista analítico, reducionista da situação, ou seja, perde a visão sistêmica do problema em questão;
- ✓ Lembra que as decisões devem ser tomadas por pessoas e não por modelos. Desse modo, todas as restrições devem ser consideradas na tomada de decisão e ressalta que as preferências, experiências e conhecimentos prévios dos tomadores de decisão são decisivos no momento da escolha;
- ✓ Os riscos envolvidos nas decisões sobre o portfólio de uma empresa são tão complexos quanto a variabilidade do portfólio, utilizar apenas um critério na tomada de decisão torna qualquer atividade muito arriscada.

5.3.1. Diferentes Escolas de Análise Multicriterial

Admite-se a existência de duas escolas básicas no tocante às metodologias multicritério. De um lado a escola americana, que defende os modelos descritivista / prescritivista, onde o facilitador faz uma descrição do problema e compõe prescrições baseadas em hipóteses normativas, as quais são validadas pela realidade descrita. Do outro lado, a escola européia, que adota o modelo construtivista, onde procura-se no decorrer do processo junto com os atores, construir um modelo mais ou menos formalizado que permitirá a evolução do processo de apoio à decisão em concordância com os objetivos e os sistema de valores dos atores.

A escola americana caracteriza-se por fazer prescrições com referência a um ideal, procurando-se assim aproximar o mais possível deste. Tal ideal é baseado em

um grupo de axiomas, os quais, se examinados separadamente, podem ser aceitos naturalmente como normas ou hipóteses de trabalho.

De maneira simplista, pode-se dizer que, na escola europeia está presente o conceito de uma abordagem participativa e construtiva no desenvolvimento de modelos, permitindo a exploração de elementos subjetivos aos valores dos decisores na construção de recomendações que atendam às expectativas com relação aos problemas. No construtivismo, os conceitos, modelos, procedimentos e resultados são considerados como “chaves” capazes de abrir ou não certos bloqueios. Para ROY (1993), a meta não é descobrir uma verdade existente, externa aos atores envolvidos no processo, mas construir um “conjunto de chaves” que permitirá abrir portas para os atores, em concordância com seus objetivos e sistema de valor.

Segundo ROY (1985) as escolas diferenciam-se entre si devido a três grandes tipos de abordagem de síntese nas quais englobam diversos métodos multicritérios:

- ✓ Abordagem do julgamento local interativo, no qual o processo de modelação das preferências consiste numa seqüência de interações entre o analista e o decisor, onde observa-se a alternância entre as fases de cálculo e apreciação do decisor, ou seja, o analista seleciona, de acordo com as respostas anteriores do decisor, uma alternativa que a submete à apreciação do decisor.
- ✓ Abordagem do critério único de síntese, introduzida pela escola americana, a qual consiste em identificar uma função utilidade marginal para cada critério, que representará a utilidade subjetiva percebida pelo decisor, através de uma agregação única de consenso. O método da Teoria de Utilidade Multiatributo é o exemplo de aplicação do critério único de síntese.

- ✓ Abordagem da subordinação de síntese, introduzida pela escola francesa, a qual modela as preferências através da construção de uma relação binária. O princípio subjacente à abordagem da subordinação de síntese é expresso pelo axioma de comparabilidade parcial no qual três situações fundamentais de preferência podem ser encontradas: Incomparabilidade (R), preferência estrita (P) e indiferença (I), e ainda, em algumas circunstâncias admite a preferência fraca (Q), que leva em conta casos de indecisão entre P e I. Entre os métodos mais conhecidos e aplicados, estão os métodos ELECTRE's e PROMETTEE I e II.

5.3.2. Classificação das Técnicas Multiobjetivo ou Multicritério

5.3.2.1. Técnica de Geração de Soluções Não-Dominadas

Nesta técnica, as alternativas são geradas pelo analista, que faz estudos sobre a solução do problema, sem nenhum conhecimento prévio das preferências do decisor. A principal característica dessa técnica é que ela trabalha estritamente com a realidade física do problema e não considera as preferências do decisor. Essa técnica considera um vetor da função objetivo, usa esse vetor para identificar e gerar um subconjunto de soluções não-dominadas para uma região inicialmente factível. Existem vários métodos disponíveis para gerar soluções não-dominadas e alguns deles são amplamente utilizados e foram citados por BRAGA e GOBETTI (1997):

- Método das ponderações (ZADEH, 1963);
- Métodos das restrições (ZADEH, 1963);
- Método simplex em programação linear multiobjetivo (PHILIP, 1972)

5.3.2.2. Técnica com Articulação de Preferência Prévia

Nesta técnica o decisor manifesta sua preferência a um analista, antes da resolução efetiva do problema, permitindo possíveis trocas entre os objetivos a serem alcançados, com o recurso da ponderação. SIMONOVIC (1998) dividiu esta técnica em duas categorias e citou alguns exemplos.

a) Métodos Contínuos

Um vez identificado o conjunto de soluções não dominadas, o decisor é capaz de selecionar uma das soluções não-dominadas como sua escolha final. Mas para isso, o decisor será solicitado a apresentar suas preferências ou uma estrutura de preferência para contribuir na formulação multiobjetivo no modelo matemático. Com o intuito de ajudar o decisor na articulação de suas preferências, várias questões são colocadas ao decisor, solicitando a consideração de “trade-offs” específicos entre objetivos. Pode-se citar alguns exemplos desse método:

- Programação por Metas;
- Função de Utilidade Explícita;
- Ponderação de Critérios a Priori.

b) Métodos Discretos

Neste método, o decisor deverá proceder à escolha dentre um número finito de alternativas, as quais são avaliadas em um grupo comum de múltiplos objetivos ou multicritérios. SIMONOVIC (1998) cita alguns métodos:

- ELECTRE I e II

- Exclusionary Screening;
- Conjunctive Ranking;
- Weighted Average;
- Indifference Trade-off Method;
- Direct-Rating Method.

Dentre os métodos discretos destaca-se, a Teoria Multiatributo ou MAUT. A partir de uma função matemática, determina-se a importância atribuída a um critério em relação ao outro e priorizam-se as alternativas envolvidas. A importância dada a um critério diante de outros critérios é mensurada através de peso atribuído para critério, ou seja, um critério pouco importante recebe peso menor, em relação aos atribuídos aos demais critérios. Desta forma, é representada a importância relativa a cada critério pelo conceito de *trade-off*.

5.3.2.3. Técnica com Articulação Progressiva de Preferência

Esta técnica tem tido grande aceitação por parte dos pesquisadores e usuários, nos últimos anos. Esse grupo de técnicas é conhecido como grupo de técnicas interativas, onde há uma iteração analista-decisor durante a processo decisório (BARBOSA ,1997). FRANCATO (2002) comenta que, esta técnica requer um grande envolvimento do decisor no processo decisório, e tem a vantagem de permitir ao decisor expandir o entendimento e a sensibilidade na estruturação do problema, pois requer maior iteração, mas cita como desvantagem o consumo de tempo. SIMONOVIC (1998) cita algumas da técnicas interativas:

- Método dos Passos;
- Método de Goffrion;
- Programação de Compromisso;
- Método SEMOPS;

- Método do Valor Substituto de Troca.

Como citado por ZUFFO (1998), a análise multicritério abrange um número bastante significativo de métodos baseados na construção de um modelo matemático restrito e na informação levantada dos decisores sobre sua estrutura de preferências. Por isso, não é difícil achar na literatura várias classificações dos métodos multicritério. Percebeu-se que existem duas classificações quanto aos métodos multicritério, uma classificação mais usual que aglutina quatro grandes famílias: a teoria da utilidade multiatributo, a programação matemática multiobjetivo, os métodos iterativos e os métodos “*outranking*” e outra classificação que os distingue em três grandes grupos, que são: i) os métodos estocásticos; ii) os métodos contínuos; e iii) os métodos discretos. No entanto, cabe lembrar que ambas classificações são consideradas similares.

5.4. Conceitos e Definições Gerais

A fim de entender os problemas de decisão envolvendo múltiplos critérios, sentiu-se a necessidade de definir algumas terminologias usadas com frequência durante o processo de decisão. Os elementos tais como ator, família de critérios, atributo, solução eficiente, entre outros, são descritos a seguir:

Decisor é empregado para referenciar o indivíduo ou grupo de indivíduos que intervém no processo e, pode influenciar direta ou indiretamente a decisão através da manifestação de suas preferências e julgamentos fornecidos em distintas fases do processo.

Facilitador é um especialista que trabalha como colaborador próximo de quem decide, com a função de conduzir o processo de decisão, seja pela delimitação do modelo, da problemática, da maneira com que controla os dados e escolhe o método operacional. Segundo BANA e COSTA (1992) cabe também ao facilitador gerar uma solução de compromisso entre os intervenientes do processo através do nivelamento de seus conhecimentos sobre o problema, fazendo crescer os seus domínios habituais e melhorando a comunicação entre estes.

O termo *analista* refere-se ao cientista, ou técnico que tem como papel fundamental auxiliar o facilitador e o decisor na estruturação do problema, apontando os fatores do meio ambiente que influenciam na evolução, solução e configuração do problema. A principal contribuição do analista consiste na ajuda dada aos decisores na visualização das alternativas viáveis na solução do problema.

O termo *critério* é usado como medida base para a efetividade da avaliação, ou seja, podem ser metas, alvos ou objetivos almejados pelos decisores.

O conjunto de *critérios* também chamado família de critérios F, tem que ser coerente com a definição do problema e mutuamente exclusivos.

Os *atributos* são pontos de vista considerados relevantes para a análise e resolução do problema. Constitui a base para avaliar os níveis de vários objetivos e definir se as metas têm sido atingidas ou não, dada uma decisão particular.

O conceito de *dominância* explica uma situação na qual uma ação **a** domina uma ação **b** se **a** é ao menos tão boa quanto **b** para todos os pontos de vista considerados, e estritamente melhor que **b** para ao menos um ponto de vista.

O conceito de *trade-off* entre dois critérios refere-se à quantidade, ou seja, a importância que o decisor está disposto a conceder sobre um dos critérios para obter uma unidade do outro critério.

5.5. Métodos Multicritérios

São comentados de maneira resumida os métodos multicritérios empregados neste trabalho de pesquisa.

5.5.1. Programação de Compromisso (CP)

O método da programação de compromisso identifica soluções que estão o mais próximas da solução ideal baseado na noção de medidas métricas. As soluções identificadas como sendo a mais próxima a solução ideal são chamadas de solução de compromisso e constituem o conjunto de compromisso. A solução ideal é definida como o vetor $z^* = (z_1^*, z_2^*, \dots, z_p^*)$ onde z_i^* são as soluções dos problemas:

$$\begin{aligned} & \text{Max } z_i(x) \\ \text{sujeito a: } & x \in X \\ & i = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \tag{6.1}$$

O vetor de solução factível, x^* , terá que ser comum a todos os p problemas. A solução seria ótima desde que o conjunto não-dominado representasse um único ponto nomeado $z^*(x^*) = (z_1^*(x^*), z_2^*(x^*), \dots, z_p^*(x^*))$. Obviamente, isto é improvável uma vez que a solução ideal é geralmente não factível. Entretanto, a solução obtida poderá servir como um padrão para a avaliação das soluções não-dominadas que se pode conseguir. Então, pode se argumentar que encontrar soluções que estão tão próximas quanto possível da solução ideal é uma forma substituta razoável da maximização da função utilidade.

Portanto, a avaliação para obter o conjunto de pontos não-dominados consiste em medir o quão próximos estes pontos estão da solução ideal. Uma das medidas de

proximidades mais freqüentemente utilizadas, é a família de L_s , medida métrica, que pode ser definida de duas maneiras:

$$L_s = \left[\sum_{i=1}^p \alpha_i^s (z_i^* - z_i(\mathbf{x}))^s \right]^{1/s} \quad (6.2)$$

$$L_s = \sum_{i=1}^p \alpha_i^s (z_i^* - z_i(\mathbf{x}))^s \quad (6.3)$$

ou

onde $1 \leq s \leq \infty$.

Finalmente, uma solução de compromisso em relação a s é definida como x_s^* tal que:

$$\text{sujeito a: } \begin{aligned} \min L_s(\mathbf{x}) &= L_s(x_s^*) \\ x &\in X \end{aligned} \quad (6.4)$$

Desta forma, o conjunto de compromisso será o conjunto de todas as soluções de compromisso determinados pela solução (6.4) de um dado conjunto de pesos, $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$ e para todos $1 \leq s \leq \infty$. Operacionalmente, três pontos de um conjunto de compromissos são calculados, ou seja, aqueles correspondentes a $s = 1, 2,$ e ∞ . Para compreender a motivação para essa afirmação e melhor entender o papel dos parâmetros de α_i e s , consideraremos os seguintes casos especiais.

Seja $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_p = 1$ e fazendo $w_i = z_i^* - z_i(\mathbf{x})$. Com isso, a equação (6.3) se transforma em:

$$L_s = \sum_{i=1}^p w_i^{s-1} (z_i^* - z_i(\mathbf{x})) \quad (6.5)$$

Para $s = 1$, $w_i^{s-1} = 1$, temos:

$$L_s = L = \sum_{i=1}^p (z_i^* - z_i(\mathbf{x})) \quad (6.6)$$

Fica claro que, a escolha de s reflete a preocupação do tomadores de decisão a respeito do desvio máximo, ou seja, quanto maior o valor de s , maior a preocupação. A introdução de α_i permite explicitar os sentimentos dos tomadores de decisão, concernentes a importância relativa de vários objetivos. Assim, existe um esquema de duplo peso. O parâmetro s reflete a importância do desvio máximo e o parâmetro α_i reflete a importância relativa do i -ésimo objetivo.

Caso as funções objetivo não sejam expressas em termos comensuráveis, então uma função $S_i(D_i)$, com $D_i = z_i^* - z_i(\mathbf{x})$, é definida para garantir a mesma abrangência para cada função objetivo. Usualmente, essa abrangência corresponde ao intervalo $[0, 1]$. Essa escala é executada, definindo-se a função como :

$$S_i(D_i) = \frac{z_i^* - z_i(\mathbf{x})}{z_i^* - z_i^{**}} \quad (6.7)$$

onde z_i^{**} é definido como:

$$\begin{aligned} & \min z_i(\mathbf{x}) \\ \text{sujeito a: } & \mathbf{x} \in X \\ & i = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (6.8)$$

Com a transformação indicada, (6.4) é modificada substituindo-se (6.8) por $D_j = z_i^*$ - $z_i(\mathbf{x})$, ou seja,

$$\text{Sujeito a: } \min_{x \in X} \left[L_s(x) = \sum_{i=1}^p \alpha_i^s \left(\frac{z_i^* - z_i(x)}{z_i^* - z_i^{**}} \right)^s \right] = L_s(x_s^*) \quad (6.9)$$

A expressão (6.9) é a definição operacional de uma solução de compromisso para um dado s . Observar que a solução dessa expressão sempre produzirá um ponto não-dominado para $1 \leq s \leq \infty$. Para $s = \infty$, há no mínimo uma solução não-dominada, x_s^* , o que implica dizer que a programação de compromisso resulta em uma redução do conjunto não-dominado. Se o conjunto compromisso é pequeno o suficiente para permitir ao decisor escolher uma solução satisfatória, então o algoritmo é encerrado. Caso contrário, é pedido ao decisor para redefinir o ponto ideal e o processo se repete.

Segundo SIMONOVIC (1998), a programação de compromisso não está restrita aos conjuntos contínuos, ou seja, pode ser adaptada também para conjuntos discretos. Em um conjunto discreto, a solução ideal é definida como o melhor valor em um conjunto finito de valores de $z_i(\mathbf{x})$. Essencialmente, a solução ideal em um conjunto discreto seria definida como um vetor dos melhores valores selecionados de uma tabela "payoff". O vetor dos piores valores definem os valores da função objetivo mínima, ou seja, z_i^{**} . Com esses valores definidos e α_i e s dados, a solução de compromisso pode ser determinada, calculando-se a distância de cada alternativa da solução ideal e selecionando-se a alternativa com a distância mínima como a solução de compromisso.

5.5.2. Método ELECTRE

A sigla ELECTRE significa “*Elimination and (et) choice Translating Reality Algorithm*”, com origem em BENAYOUN *et al.* (1966). Este método aplica-se principalmente a tratamento de alternativas discretas avaliadas qualitativamente. Os métodos ELECTRE são em número de quatro e são considerados como métodos de sobreclassificação (“outranking”), ou seja, baseiam-se na construção de uma relação de sobreclassificação que incorpora as preferências estabelecidas pelo decisor diante das alternativas disponíveis.

A idéia do método ELECTRE I é separar do conjunto total das alternativas, aquelas que são preferidas na maioria dos critérios de avaliação, e que ainda não causam um nível inaceitável de descontentamento nos outros critérios. Portanto, utiliza-se no método multiobjetivo ELECTRE, dois conceitos para “*mapear*” a qualidade de uma decisão: índice de concordância (IC) e índice de discordância (ID). Assume-se que cada decisor possui uma estrutura de preferência que faz com que certos critérios tenham maior preponderância em relação a outros na avaliação das alternativas.

A concordância entre duas alternativas, i e j , é a medida relativa da proporção ponderada de objetivos para os quais a alternativa i é preferida à alternativa j . Definido matematicamente em termos formais pelo índice de concordância, IC , tal indicador varia de zero (nenhuma concordância) a 1,0 (máxima concordância). Quanto maior o índice de concordância $IC(i,j)$ significa que maior número de critérios estará sendo atendido ao ser escolhida a alternativa i sobre a j . O índice pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$IC(i, j) = \frac{\sum (W^+ + \frac{1}{2}W^-)}{\sum (W^+ + W^- + W^=)}$$

onde,

W^+ , representa a soma dos pesos dos objetivos onde “ i ” é preferível a “ j ”;
 W^- , representa a soma dos pesos dos objetivos onde “ j ” é preferível a “ i ”;
 W^0 , representa a soma dos pesos dos objetivos onde “ i ” é igual a “ j ”
 (indiferentes).

De forma complementar ao conceito de concordância, no método ELECTRE I trabalha-se com o conceito de discordância. Não adianta tomar uma decisão com, por exemplo, 95% dos critérios (ponderados pelos pesos do decisor) atendidos se não for contemplado um patamar mínimo de atendimento para os 5 % restantes.

O conceito de discordância é complementar ao de concordância e representa o desconforto experimentado na escolha da alternativa i sobre a alternativa j ou ainda, o índice de discordância mede a desvantagem relativa entre duas alternativas “ i ” e “ j ”, sendo definido como a máxima razão para cada critério. No cálculo do índice de discordância, define-se uma escala numérica comum a todos os critérios. Esta escala é usada para calcular o desconforto, diante de todos os critérios, causado pela escolha da alternativa “ i ” em lugar da “ j ”. Com estas considerações, o índice de discordância é determinado por:

$$D(i, j) = \max \left\{ \frac{Z_{jk} - Z_{ik}}{Z_k^* - Z_k^-} \right\} \forall k, j > i$$

onde,

Z_k^* , representa a conquista ótima para o critério k dentre as avaliações das alternativas para o critério k , Z_k^* correspondente à melhor avaliação;
 Z_k^- , representa a obtenção do péssimo para o critério k dentre as avaliações das alternativas para o critério k , Z_k^- correspondente à pior avaliação.

No ELECTRE I, a relação de dominância é definida ao estabelecer-se, pelo decisor, os valores dos parâmetros p e q . A alternativa “ i ” supera a alternativa “ j ” se, e somente se, $C(i,j) \geq p$ e $D(i,j) \leq q$.

O resultado de ELECTRE I é um gráfico determinando uma ordenação parcial das alternativas. Posteriormente, visando produzir uma ordenação de alternativas surge, o ELECTRE II, com o objetivo de ordenar um conjunto de alternativas não dominadas, perfazendo uma ordem de prioridade entre as alternativas. Os gráficos obtidos a partir do método ELECTRE I, que representam uma estrutura de preferência forte e outra fraca, são usados como dados de entrada no método ELECTRE II.

No entanto, no método ELECTRE II, o índice de concordância embora tenha o mesmo significado da versão anterior, refere-se a um valor que representa uma proporção de peso para que a alternativa “ i ” seja preferível a “ j ”, desse modo, o índice de concordância é determinado por:

$$IC(i, j) = \frac{\sum(W^+ + W^-)}{\sum(W^+ + W^- + W^=)}$$

No entanto, para o índice de discordância o procedimento de cálculo apresentado anteriormente é válido, para ambos os métodos ELECTRE I e II.

Com o intuito de construir dois tipos de relações de sobreclassificação: forte e fraca, são necessários a utilização de quatro parâmetros: p^* , q^* , p^0 , q^0 , no método ELECTRE II. Para obter a ordenação forte, dois parâmetros são usados, ou seja, a alternativa “ i ” supera fortemente a “ j ” se, somente se, $IC(i,j) \geq p^*$, $D(i,j) \leq q^*$ e $\sum w^+ \geq \sum w^-$. Para a ordenação fraca, outros dois parâmetros são usados para indicar a dominância; a alternativa “ i ” supera fracamente a “ j ” se, e somente se, $IC(i,j) \geq p^0$, $D(i,j) \leq q^0$ e $\sum w^+ \geq \sum w^-$. Portanto, a ordenação completa da melhor para a pior alternativa é conseguida por

meio da média extraída das duas relações anteriores, ordenação forte e ordenação fraca.

Porém, notou-se que a aplicação destes métodos, esbarrava em dificuldades inerentes à mensuração dos impactos das alternativas sobre os critérios considerados. Tais mensurações geralmente eram imprecisas ou mal determinadas. Estas dificuldades e imprecisões eram então desconsideradas. Para corrigir-se tais defeitos, optou-se pela construção de uma função de utilidade esperada para cada critério e por distribuições de probabilidade para representar a dispersão dos valores de desempenhos das alternativas, formando os valores de utilidades esperada para os critérios considerados. Incluindo estes conceitos, surgiu o método ELECTRE III.

O método ELECTRE IV emprega a mesma noção de sobreclassificação, embora mais enriquecida, permitindo chegar a soluções de compromisso entre diferentes critérios intervenientes no problema. Enquanto o ELECTRE III trabalha com relações de sobreclassificação nebulosas ou difusas, o ELECTRE IV dispensa o uso de pesos dos critérios.

Segundo GOICOECHEA *et.al* (1982), o método ELECTRE é ferramenta adequada para solucionar problemas de tomada de decisão de múltiplos objetivos que envolvem números discretos de alternativas. BRAGA e GOBETTI (1997) comentaram que na visão de COHON e MARKS (1975) o método ELECTRE I mostra uma certa obscuridade nos índices de concordância e discordância mas para os autores DAVID E DUCKUSTEIN, (1976); GERSHON *et. al.*, (1982); AREGAI *et.al.*, (1988) o método se mostrou eficaz em situações práticas em análise de recursos hídricos.

O método ELECTRE II foi utilizado por ZUFFO (2002) no estudo da reabilitação, expansão e conservação do sistema produtor de água, na bacia Baixo Cotia, localizada na Região Metropolitana de São Paulo. Mas o método não atendeu às expectativas durante a hierarquização das alternativas mostrando-se deficiente, quando comparado a outros métodos multicriteriais. Na tentativa de melhorar o resultado esperado ZUFFO

(2002) faz duas propostas de modificação na hierarquização das alternativas no método ELECTRE II.

Entretanto, vários estudos feitos no Brasil, aplicando os métodos da família ELECTRE na área de recursos hídricos obtiveram bons resultados, corroborando BRAGA e GOBETTI (1997). ALFREDO (1997) fez estudo da seleção de alternativas para o aproveitamento hidroelétrico no Rio Sapucaí. TEIXEIRA e BARBOSA (1995) aplicam os métodos ELECTRE I e II no estudo e seleção de alternativas de projeto de barragens de uso múltiplo. GOBETTI e BARROS (1994) revisaram o plano diretor de esgotos da Região Metropolitana de São Paulo, BARBOSA e GOBETTI (1995) estudaram e classificaram as alternativas de abastecimento da RMSP e entre os métodos aplicados encontra-se o método ELECTRE II. FRICKE *et.al.* (1988) aplicaram os métodos ELECTRE I e ELECTRE II no planejamento dos recursos hídricos da bacia do Rio Piracicaba.

5.5.3. Teoria da Utilidade Multiatributo (*MAUT*)

A teoria da utilidade multiatributo (MAUT) surgiu nos Estados Unidos e, é ainda hoje, um dos instrumentos de apoio à decisão de maior difusão no país de origem. Considerada uma área bastante ativa desde o início da década de 70 é, desde então muito utilizada em problemas de decisão multicriterial. A grande vantagem da utilização da teoria consiste em combinar os avanços teóricos com a aplicação em problemas práticos, o que tem levado os pesquisadores americanos a uma contínua melhoria do método.

Contrariando as expectativas dos americanos quanto à sua utilização, na Europa, a utilização da MAUT é mais reservada tanto pelos teóricos como pelos usuários da teoria. Esta resistência reside no postulado básico, que diz respeito à existência de uma função de utilidade capaz de representar as preferências globais do

decisor. Argumenta-se que as suposições feitas em torno à MAUT não são muito compatíveis com os conceitos da teoria da racionalidade e, portanto, limitando sua utilização como instrumento de auxílio a tomada de decisão (VINCKE, 1986).

A MAUT fundamenta-se numa estrutura de preferência do decisor para cada critério ou atributo, por intermédio de uma função utilidade U_j , onde a alternativa a é melhor que a alternativa b para i se e somente se $U_j(a) > U_j(b)$. As funções U_j são agregadas em uma única função global U , o que permite a resolução do problema inicial envolvendo múltiplos critérios é substituído por um problema monocritério. Desse modo, é definida uma função de valor real U sobre um conjunto de alternativas viáveis $A = \{a, b, c, \dots, n\}$ que representa a preferência global do decisor após ter sido feita a agregação do conjunto de critérios ou atributos.

O analista terá papel importante durante o processo, auxiliando o decisor a determinar a função utilidade. Mas caberá ao decisor escolher sem qualquer tipo de ambigüidade uma e somente uma dentre as seguintes possibilidades:

$a P b$ significa que a é estritamente preferida a b ;

$b P a$ significa que b é estritamente preferida a a ;

$a I b$ significa que a é indiferente a b .

A teoria da utilidade só é relevante, no entanto, quando os participantes do processo têm consistência e mantêm suas preferências. Ela deve ser transitiva, resultado direto da aditividade, da soma dos pesos.

5.5.3.1. Modelo VIP (Variable Interdependent Parameters)

Desenvolvido por DIAS e CLÍMACO (1999), o software VIP utiliza múltiplas abordagens, e garante diferentes perspectivas na situação de decisão. O modelo

desenvolvido visa apoiar a seleção de uma alternativa, dentre um conjunto de alternativas, considerando os múltiplos critérios de avaliação. Fundamentado no modelo de agregação aditiva, através de uma função de valor aditiva, que aceita informação imprecisa sobre a importância de cada critério.

Para os autores, uma solução de informação precisa ocorre quando os decisores conseguem indicar um valor preciso para cada parâmetro do modelo. As dificuldades encontradas em obter valores precisos para todos os parâmetros são:

- ✓ O desempenho das ações em avaliação pode ser desconhecido principalmente, quando há incerteza acerca do futuro, o que resultará na agregação de múltiplos aspectos em um único, implicando em alguma arbitrariedade, o que geralmente conduzem a erros;
- ✓ Outros parâmetros refletem valores ou preferências dos decisores, que consideraram difíceis de expressar, seja porque consideram difícil atribuir-lhes um valor numérico preciso, seja porque preferem não os divulgar;
- ✓ Em situações de decisão com múltiplos decisores, é freqüente que existam divergências de opinião ou de preferência entre os mesmos.

Por isso, o programa é adequado a situações de escolha nas quais os decisores não consigam, ou não desejam, fixar valores precisos para os parâmetros que refletem a importância dos critérios de avaliação. Essa importância traduz-se no valor dos parâmetros do modelo designados por coeficiente de escala ou também denominados constantes de escala.

DIAS e CLÍMACO (1999) definiram uma função aditiva com informações imprecisas sendo A : conjunto de alternativas; C : conjunto de critérios; K_i : parâmetro de importância (constantes de escala) do j^{th} elemento de C ; g_{ij} desempenho do i^{th} elemento de A de acordo com o j^{th} elemento de C e T como o conjunto de combinações aceitáveis de valores para o parâmetro, representado como um vetor t . O conjunto T poderá ser

discreto, contendo um número finito de "cenários", ou poderá ser contínuo, podendo estabelecer intervalos para o valor dos parâmetros e incluir restrições adicionais que inter-relacionem os mesmos como no caso do valor do parâmetro x não pode exceder o valor do parâmetro y .

Considerando a função de valor aditiva:

$$V(a_i, t) = \sum_{j=1}^n k_j(t) u_j g_{ij}$$

onde t é um elemento do conjunto T e somente o parâmetro de importância k_j ($j=1, \dots, n$) depende de t , o perfil ou a forma da função u_j e o desempenho das alternativas será também variáveis interdependentes. Estes parâmetros são vistos como variáveis interdependentes sujeitas a intervalos ($l_j < k_j < L_j$) e restrições lineares que podem ser restrições de ordem ($k_1 > k_2$), restrições de compromisso ($k_j/k_2 > 1.2$) ou restrições definidas através de comparações holísticas ($V(a_1) < V(a_2)$).

O modelo utiliza conceitos de dominância e de otimalidade, ou seja, está fundamentado na dominância absoluta, dominância usual (Bernoulli), na otimalidade e otimalidade potencial.

A dominância refere-se aos parâmetros ao invés dos múltiplos critérios e é interpretada como uma relação preferencial. O modelo de análise VIP incorpora múltiplas ferramentas de análise que são adequadas a estas situações e utiliza uma metodologia de redução progressiva do número de alternativas e da imprecisão dos parâmetros.

O conceito de tolerância utilizado no modelo permite aos decisores utilizarem algumas destas ferramentas de uma forma muito flexível, pois a análise dos conceitos de quasi-dominância e quasi-otimalidade oferecem argumentos suficientes para os

decisores concordarem sobre a melhor alternativa, ou apontam um pequeno conjunto de alternativas interessantes, antes de ter que alcançar valores exatos para cada parâmetros, além de oferecer um *insite*, que sem dúvida irá ajudar no processo de decisão.

A matriz de entrada utilizada pelo modelo VIP pode ser visualizada na Figura 5.1, onde no eixo da abscissa se encontra os critérios e na ordenada as alternativas. Embora, o modelo empregado no estudo de alternativas para a reabilitação do sistema de abastecimento de água é um versão acadêmica fornecida pelos autores, estes não comentaram se existe restrições quanto ao número de critérios e o número de alternativas no modelo profissional.

Criteria:	Crit1	Crit2	Crit3	Crit4	Crit5	Crit6	Crit7	Crit8	Crit9	Crit10	Crit11
Importance:	0.0468	0.0625	0.0625	0.0703	0.0703	0.0703	0.0625	0.0547	0.0781	0.0781	0.0703
a1	0.1	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.5	0.5	0.1	0.3
a2	0.5	0.4	0.2	0.5	0.5	0.3	0.5	0.3	0.2	0.5	0.2
a3	0.1	0.4	0.3	0.5	0.4	0.4	0.1	0.5	0.5	0.4	0.3
a4	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3	0.3	0.5
a5	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.3	0.5	0.5	0.2	0.3

Figura 5.1: Matriz de entrada do modelo VIP

O modelo é de fácil utilização, mas tem como inconveniente a entrada das notas atribuídas pelos decisores, principalmente, quando há um número grande de decisores envolvidos no processo de decisão. Para utilização do modelo é necessário que as notas atribuídas pelos decisores sejam ponderadas, uma vez que, é admitido que a soma total das notas atribuídas aos critérios tem que ser menor ou igual a um. O mesmo não ocorre nos métodos ELECTRE II, método de Programação de

Compromisso, e no modelo Expert Choice que permitem trabalhar com as notas atribuídas pelos decisores, sem nenhuma manipulação, o que pode explicar a grande utilização dos mesmos nos processos de decisão.

O modelo permite que a hierarquia das alternativas obtida possam ser visualizadas graficamente, como mostrado na Figura 5.2 ou ainda, com valores numéricos, o que é muito interessante pois, durante a hierarquização das alternativas, observa-se que por esse método a diferença entre alternativas é muito pequena independentemente das notas atribuídas pelo decisor.

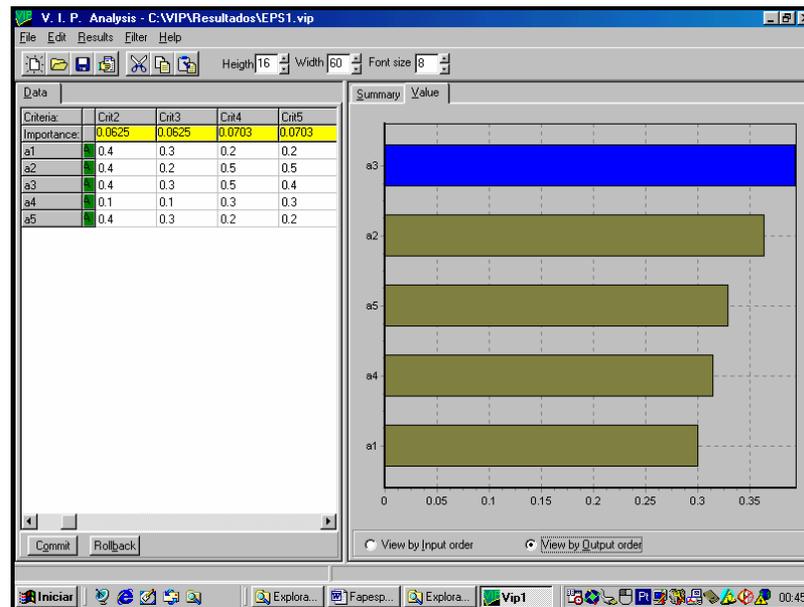


Figura 5.2: Resultado gráfico da hierarquização das alternativas

Na visão de DIAS (1999) a principal razão da utilização do modelo VIP é que os decisores não são forçados a encontrar um consenso sobre os valores precisos para cada parâmetro, o que economiza tempo e evita divergência entre os decisores. A outra razão apontada é em relação aos resultados que podem ser visualizados na forma gráfica, o que torna o programa interessante.

5.5.4. Método Analítico Hierárquico (AHP)

Na década de 70, o prof. Thomas L. Saaty atuou como consultor do governo egípcio a fim de solucionar o conflito militar no Oriente Médio. Na tentativa de solucionar o problema, o método da teoria dos jogos foi aplicado e as orientações dadas pelo prof. Saaty acabaram ocasionando o processo de paz. Mas, insatisfeito com a maneira que se chegou a decisão por não considerar aspectos que julgava importante, por serem intangíveis ou não quantificáveis, SAATY (1971) desenvolveu o método analítico hierárquico.

O método analítico hierárquico (AHP – Analítico Hierárquico Process) foi desenvolvido para lidar com problemas tecnológicos, econômicos e sócio-políticos complexos. Pertencente à terceira família de métodos de análise multicritério, sendo provavelmente o método multicritério mais utilizado no apoio à tomada de decisão e na resolução de conflitos negociados em problemas com múltiplos critérios.

O método foi baseado no comportamento da mente humana para a resolução de problemas complexos, isto é, primeiramente identifica o problema para depois sintetizar com as relações encontradas. Desse modo, o método fornece uma abordagem lógica que permite aos decisores avaliar as atividades, ou alternativas, com base em múltiplos critérios, ou objetivos, incluindo aqueles de natureza incomensurável ou intangível. Pode-se dizer que o método AHP baseia-se em três etapas fundamentais: a estruturação ou decomposição do problema, o julgamento comparativo e a síntese das prioridades. A etapa de estruturação ou decomposição do problema está intrinsecamente ligada ao processo de compreensão e aprendizagem do problema, e a reestruturação é garantida à medida que novas informações relativa ao problema são obtidas durante o processo.

Já o julgamento consiste em fazer a comparação das ações umas com as outras de modo a se obter o valor relativo de cada ação comparada. O método AHP usa a comparação por pares entre as alternativas, bem como entre os critérios,

objetivando determinar as prioridades das alternativas ao longo da hierarquia. A comparação partidária é representada por uma matriz quadrada cujos elementos são os pesos atribuídos à comparação entre os elementos A_i e A_j . A matriz seria recíproca, se todos os julgamentos fossem perfeitos em todas as comparações, resultando $A_{ij}A_{jk} = A_{ik}$ para qualquer i, j, k , faria a matriz ser absolutamente consistente. A inconsistência da matriz será tolerável até um certo limite, que é determinado através de um índice denominado “Índice Randômico” obtido por uma tabela e é função da dimensão da matriz de comparação.

A construção da matriz se dá pela comparação par a par de cada elemento de um nível hierárquico, criando uma matriz quadrada, recíproca, positiva, que representará a partir de uma escala de pré-definida, a opinião e a preferência dentre os elementos comparados entre si. Neste contexto, a filosofia central do método está na agregação dos critérios em um critério único de síntese. O conjunto de valores das comparações dos pares entre as alternativas, para cada critério, gera uma medida de valor para cada alternativa no vetor prioridade, também denominado auto vetor ou critério virtual onde todas as dimensões, independentes, são observadas e traduzem a priorização das alternativas.

5.5.4.1. Modelo Expert Choice (EC)

Em meados de 1980, o prof. Ernest Forman consultor e parceiro do prof Saaty desenvolveram o software Expert Choice para uso em microcomputadores. O software está baseado na metodologia do AHP, que é sem dúvida uma metodologia das mais usadas na avaliação dos processos decisórios, apresentado por SAATY (1971).

O software funciona em ambiente windows, o que ajuda o usuário na construção de seus modelos decisoriais, o que justifica a grande utilização nos centros de pesquisas acadêmicas, instituições públicas e empresas a fim de solucionar

problemas singulares e específicos, mas também é aplicado em situações complexas como formulação de diretrizes estratégicas. O software ocupa um papel importante nas decisões críticas em organizações tais como NASA, IBM, Xérox, Rockwell International, General Motors, etc, por fazer parte do planejamento estratégico, da priorização de projetos e distribuição de recursos, entre outros fins.

SAATY (1971) definiu uma escala para a comparação par a par, e explicou que o ser humano tem um limite psicológico máximo para comparar elementos e julgá-los corretamente, 7 ± 2 itens, assim o número 9 surge como limite por nível hierárquico. Baseado nesta informação, o modelo Expert Choice deve ter no mínimo 5 critérios (ou objetivos) e no máximo 9 critérios (ou objetivos) a serem comparados. O modelo apresentado na Figura 5.3 refere-se à estruturação hierárquica de um problema de reabilitação de um sistema de distribuição de água com a consideração de critérios quantitativos e qualitativos perfazendo um total de quinze critérios.

No entanto, para contornar os problemas que envolvem números de critérios (ou objetivos) superior a 9, o modelo utiliza um artifício, pela simples divisão em sete critérios, conforme pode ser visualizado na Figura 5.3, permite a existência de no máximo 9 sub-critérios. Uma vez utilizado esse artifício, procede-se posteriormente a correção dos pesos atribuídos. As setas vermelhas apontando para baixo, que aparecem em cada sub-critério, na Figura 5.3, indicam a existência de um nível inferior de avaliação, ou seja, corresponde as alternativas estudadas.

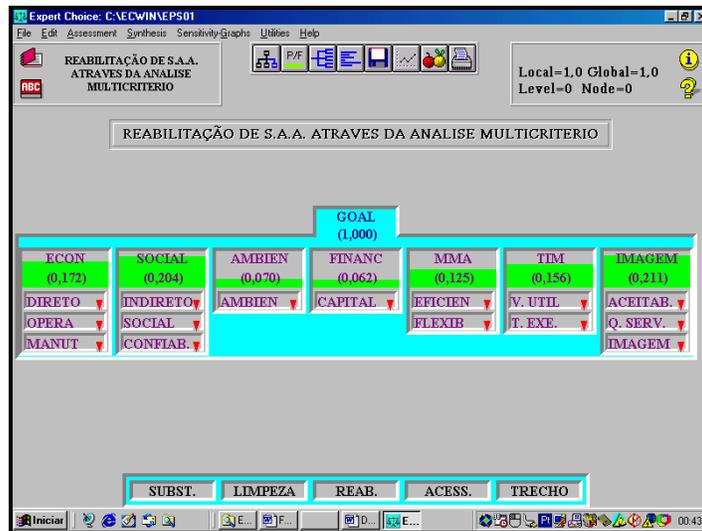


Figura 5.3: Estruturação hierárquica do modelo

Com dito anteriormente, o programa utiliza um artifício para contemplar mais de nove critérios. Neste caso em particular, é necessário a estruturação em quatro níveis hierárquicos: objetivo da decisão, critérios, sub-critérios e as alternativas. Para melhor elucidar esta questão, a Figura 5.4 mostra sete critérios, e aponta que o critério econômico está subdividido em três sub-critérios a saber: custo direto, custo operacional e o custo de manutenção e mostra a relação de cada sub-critério com as cinco alternativas analisadas.

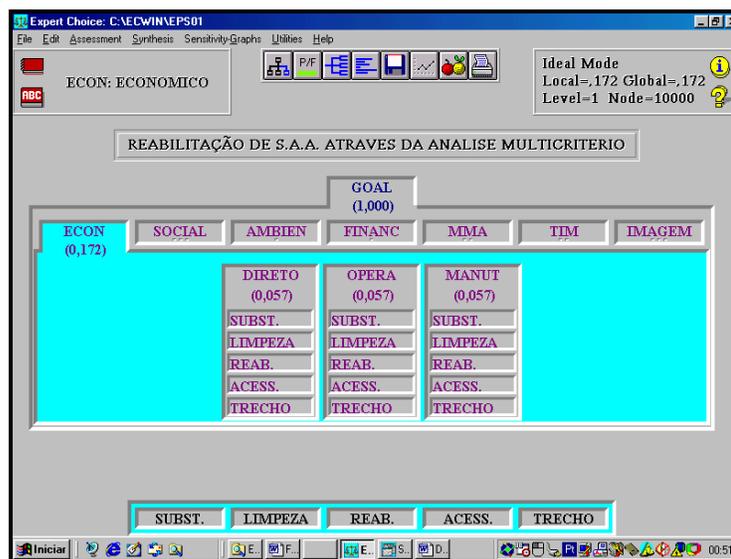


Figura 5.4: Ilustração do nível hierárquico do modelo

Uma vez completo o modelo de decisão, o Expert Choice expõe uma serie de inter-comparações entre as alternativas com relação aos critérios (ou objetivos) adotados. Por isso, é uma ferramenta que facilita a tomada de decisão através de comparações de critérios, prioridades, ajudando os usuários a visualizar a importância relativa dos vários fatores num determinado problema, face à variação de alternativas.

A análise de sensibilidade pode ser visualizada através de cinco gráficos, mostrados na Figura 5.5, o que permite analisar e eliminar alguma incerteza, caso exista, durante o processo de decisão, através da realização de testes rápidos com os cenários analisados, ou seja, na incerteza e “e se acontecer isso”, o modelo mostra prontamente o efeito no resultado final.

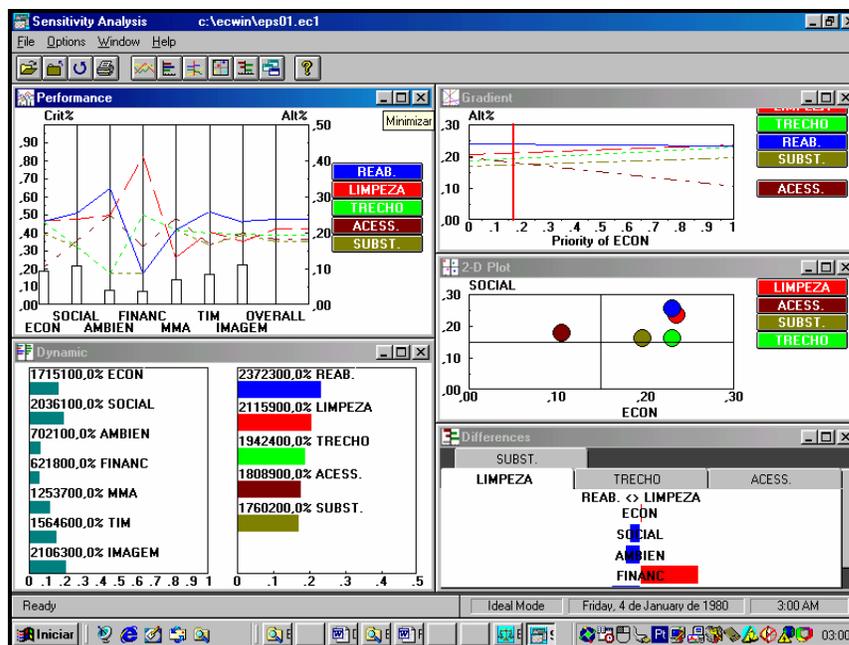


Figura 5.5: Ilustração dos resumos fornecido pelo Expert Choice

5.6. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é usada para examinar se o modelo utilizado é robusto através da alterações em seus parâmetros. É conveniente que se realize a

análise de sensibilidade, pois se uma pequena alteração no peso de um critério causar uma grande variação na avaliação final das ações, o modelo não é robusto e os resultados obtidos devem ser encarados com um certo cuidado, sendo recomendado neste caso, uma reavaliação dos parâmetros utilizados.

Fixar parâmetros num modelo multicritério é uma tarefa difícil e complicada, propensa a ser realizada de forma arbitrária, o que pode comprometer a confiança que os decisores depositam nos resultados do modelo. É recomendado o empenho na análise da robutez dos resultados através de modificações no valor dos parâmetros e a observância no resultado final. Embora trabalhosa, é uma fase muito importante na aplicação de qualquer modelo multicriterial e contribuirá sem dúvida, no processo decisório aumentando a confiança nos resultados obtidos.

6. Metodologia e Aplicações

O objetivo do trabalho é propor uma metodologia para reabilitação de sistemas de abastecimento de água, que utiliza um modelo de simulação hidráulica e métodos multicriteriais, no estudo e hierarquização de alternativas técnicas, conforme ilustrado na Figura 6.1.

Na primeira etapa a metodologia proposta utiliza o software de simulação de redes hidráulica SPERTS, desenvolvido por LUVIZOTTO JR. (1995). Tal simulador é utilizado para identificar os pontos deficientes do sistema de distribuição e verificar a eficiência da solução técnica adotada para a reabilitação do sistema. O modelo hidráulico SPERTS, é baseado no equacionamento geral para análise de redes de condutos forçados em regime transitório. A análise em regime permanente em período extensivo empregado no SPERTS decorre da adoção de uma celeridade fictícia que permite a convergência mais rápida ao regime desejado através do método das características.

O número de alternativas geradas dependerá do comprometimento operacional do sistema. É importante destacar que, com o modelo SPERTS, as alternativas são

estudadas em termos de sua real inserção e contribuição para a melhoria da rede como um todo, ao invés de análise potencial (trecho a trecho) dissociado do todo.

Para a estruturação da metodologia foi necessária a definição de critérios de avaliação a serem aplicados na formulação multicriterial. Foram elaborados quinze critérios com a ajuda de alguns decisores de empresas de saneamento e pesquisadores que atuam nesta área. Para a definição dos pesos relativos a cada um dos critérios foi elaborada uma consulta por meio de um questionário a quatro grupos distintos de decisores: profissionais especialistas na área de Recursos Hídricos, profissionais de empresas de saneamento, profissionais das empresas prestadoras de serviço na área de reabilitação e consumidores dos sistemas de abastecimento.

Os critérios e os pesos obtidos foram aplicados em quatro métodos multicriteriais: método de Programação de Compromisso (CP), o método ELECTRE II, modelo VIP e por fim a aplicação do método AHP com a utilização do software Expert Choice (EC). A aplicação do método multicriterial foi feita com técnicas multicriteriais que trabalham com articulação prévia de preferências, onde o decisor fornece as informações sobre suas preferências ao analista, o qual é responsável pela aplicação do método. No trabalho proposto, é aplicada a categoria Métodos Discretos onde existe um número finito de alternativas para que o decisor proceda a escolha.

O surgimento dos métodos multicriteriais tornou possível a elaboração de modelos mais aproximados da realidade, uma vez que, durante o processo decisório podem ser consideradas todas as inter-relações relevantes à avaliação.

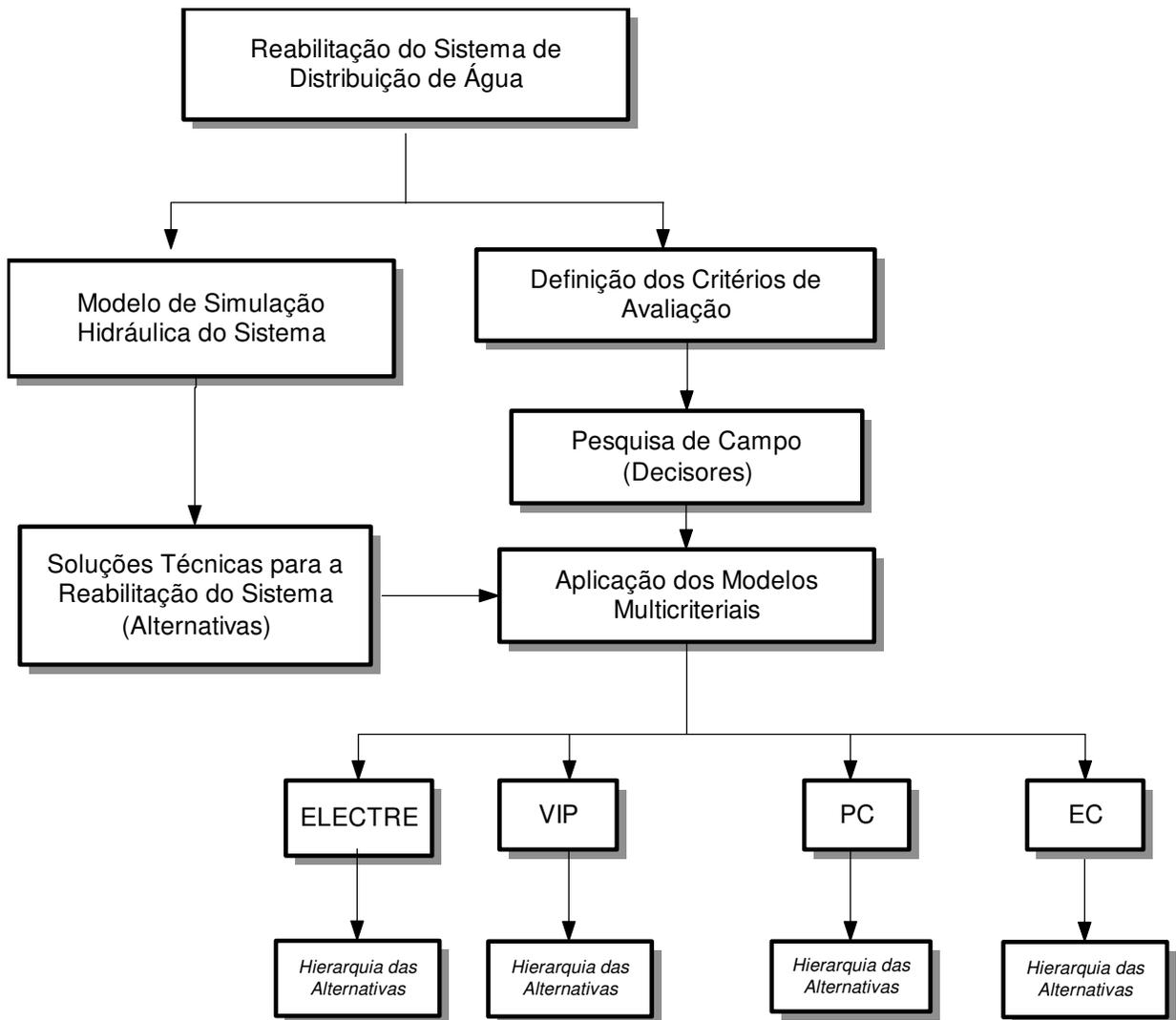


Figura 6.1: Diagrama esquemático da metodologia

6.1. Estudo de Caso

No início do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foram realizadas algumas visitas as empresas de saneamento no estado de São Paulo e em Minas Gerais, com o objetivo de identificar sistemas com deficiências operacionais, objetivando empregar a metodologia desenvolvida neste trabalho. Infelizmente, embora os gestores dessas empresas se dispuseram em ajudar na pesquisa, as cidades visitadas não dispunham de cadastros técnicos confiáveis, acabando por inviabilizar o estudo de caso em um sistema real.

Então, com o objetivo de estudar a metodologia proposta fez-se a construção de uma rede hipotética. A rede foi construída com o intuito de apresentar falhas operacionais propositais, a fim de garantir aplicação de algumas alternativas que reabilitassem o sistema.

A rede hipotética construída é composta de 48 trechos, 43 nós, 2 reservatórios e 1 estação de bombeamento, conforme topologia apresentada na Figura 6.2. Entre dois nós encontram-se os trechos das tubulações, com respectivos diâmetros, comprimentos e diferentes rugosidades como pode ser observado na Tabela 6.1. A fim de tornar a operação mais próxima da realidade, a rede contempla alguns nós de demandas fixas e outros nós com perfil de demanda diária conforme Tabela 6.2 onde são informados os dados relativos aos nós de demanda que foram utilizados para o cálculo hidráulico da rede em estudo no modelo SPERTS.

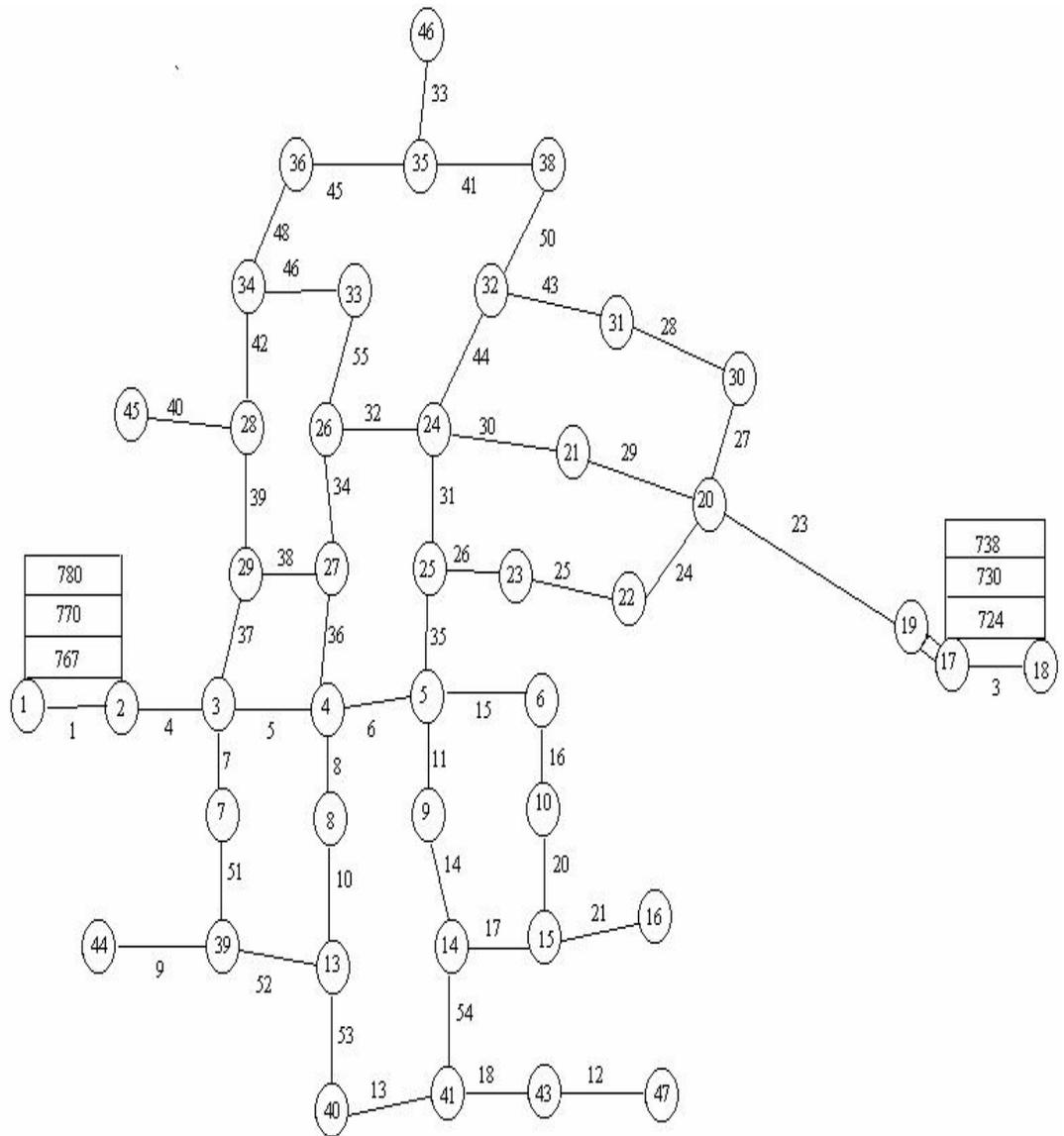


Figura 6.2: Rede hipotética

6.1.1. Aplicação do Modelo SPERTS

Com o objetivo de identificar os pontos deficientes do sistema de distribuição de água, o modelo de simulação hidráulica SPERTS versão 1.0, versão acadêmica, foi utilizado na metodologia. O modelo pode ser rodado em regime permanente ou em regime extensivo, com ou sem regras operacionais. O modelo permite ainda a interface gráfica da operação, o que garante a visualização dos nós da em termos de carga, pressão, vazão, velocidade, níveis de reservatórios etc, conforme mostrado ilustrativamente na Figura 6.3.

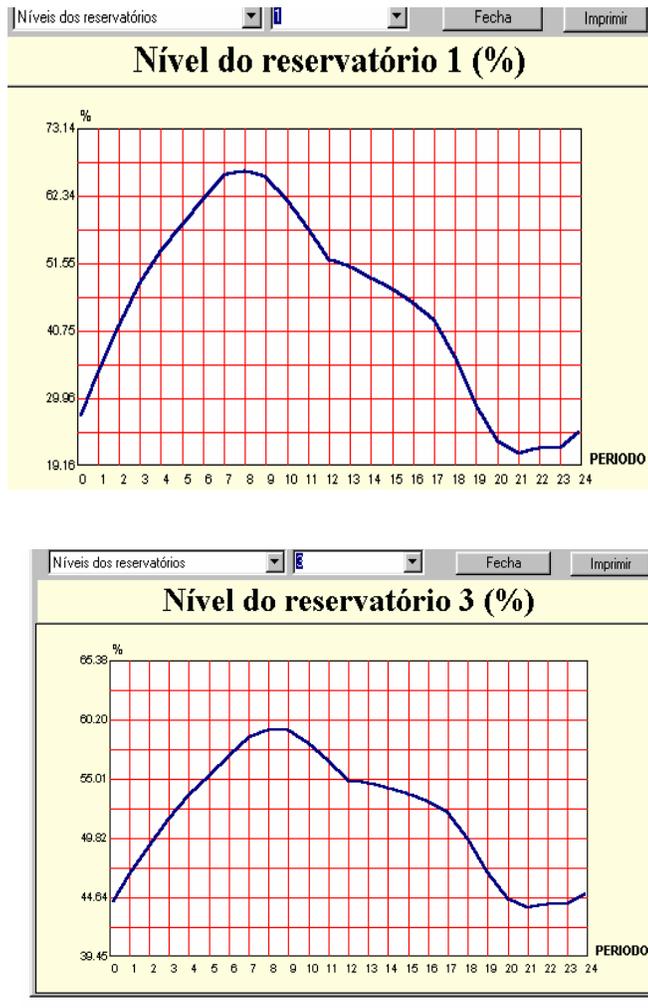


Figura 6.3: Operação dos reservatórios 1 e 3

Tabela 6.1: Características da rede hipotética

Nº do Trecho	No 1	No 2	D (mm)	L (m)	“C”
04	02	03	300	1650	82
05	03	04	250	400	82
06	04	05	250	380	82
07	03	07	250	840	82
08	04	08	150	786	82
09	39	44	100	380	100
10	08	13	150	660	100
11	05	09	100	659	100
12	43	47	75	510	100
13	40	41	75	465	100
14	09	14	100	695	100
15	05	06	150	325	100
16	10	06	150	310	100
17	14	15	100	350	100
18	41	43	75	365	100
20	10	15	150	825	100
21	15	16	100	325	100
23	19	20	250	3650	82
24	20	22	250	510	82
25	22	23	150	480	82
26	23	25	100	368	82
27	20	30	200	456	82
28	30	31	150	535	82
29	20	21	100	478	82
30	21	24	100	562	100
31	25	24	100	368	100
32	24	26	100	732	100
33	35	46	100	652	100
34	26	27	100	489	100
35	25	05	100	398	100
36	04	27	100	610	100
37	03	29	200	510	100
38	27	29	100	398	100
39	29	28	150	552	100
40	28	45	100	525	100
41	38	35	100	478	100
42	28	34	100	325	100
43	31	32	100	525	82
44	24	32	100	556	100
45	35	36	100	655	100
46	33	34	100	410	100
48	34	36	100	625	100
50	32	38	100	430	100
51	07	39	100	510	100
52	13	39	100	423	100
53	13	40	100	451	100
54	14	41	100	489	100
55	26	33	100	425	100

Tabela 6.2: Perfil dos nós da rede de distribuição

<i>Nós</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>Demanda (l/s)</i>	<i>Curva Neutra</i>	<i>Nós</i>	<i>Cota (m)</i>	<i>Demanda (l/s)</i>	<i>Curva Neutra</i>
1	770,0	0	*	25	731,7	1	N1
2	770,0	55	N1	26	734,8	2	N2
3	735,0	0,5	N2	27	735,5	2	N2
4	730,5	3	N2	28	734,7	1	N2
5	729,0	5,5	N2	29	738,2	3	N2
6	724,4	1	N2	30	724,0	2	N2
7	738,5	5	N2	31	729,0	1	N1
8	728,8	1,7	N2	32	728,6	3	N1
9	726,0	1	N2	33	734,0	1	N2
10	730,0	0	*	34	734,5	1,5	N2
13	726,7	1,6	N2	35	723,0	1	N1
14	723,0	4	N2	36	731,0	2,7	N2
15	725,0	2	N2	38	713,3	2	N1
16	721,0	4	N2	39	726,0	5,5	N2
17	730,0	36	N1	40	722,5	2,2	N2
18	730,0	0	*	41	729,0	1	N2
19	723,0	0	*	43	718,0	1,3	N1
20	738,0	5	N2	44	726,5	1,5	N1
21	734,5	4	N1	45	730,0	3,5	N2
22	725,0	1	N2	46	732,5	1,5	N1
23	729,0	3	N2	47	718,0	0,8	N1
24	730,5	2	N2				

O perfil da curva de demanda horária usado na modelagem não é uma curva real conforme pode ser observado na Figura 6.4.

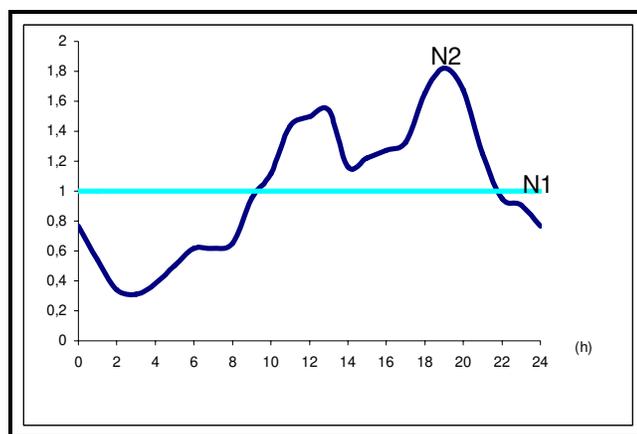


Figura 6.4: Perfil da curva de demanda

No estudo de caso, adotou-se para a rede hipotética, tubulações em ferro fundido com diferentes coeficientes de rugosidade, indicando a ampliação ou crescimento da população na rede em estudo, conforme mostrado na Tabela 6.1.

A simulação feita com o modelo SPERTS em regime extensivo apontou deficiência de pressão em 22 nós, no horário das 18 às 20 horas, não atendendo a pressão mínima de norma de 15 mca, conforme apresentado na Tabela 6.3. Observou-se também que em três nós, 14, 15 e 16 a pressão chegou a um terço do valor permitido por norma, ou seja, 5 mca.

Tabela 6.3: Nós com deficiência de pressão (mca)

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	14,95	10,49	12,92	29	14,27	9,58	12,23
08	15,90	8,78	12,78	33	13,02	7,33	10,14
09	15,03	8,28	12,76	34	12,23	6,53	11,02
10	14,24	8,03	12,03	36	13,10	7,12	12,39
13	14,17	7,80	12,19	39	14,68	7,96	12,39
14	12,68	5,02	10,29	40	13,38	6,97	12,02
15	12,68	5,30	10,32	41	14,82	7,13	12,43
16	11,98	3,71	9,53	43	14,28	6,59	11,88
26	13,59	8,08	11,54	44	13,83	7,11	11,54
27	14,52	9,35	12,45	45	13,20	6,76	10,98
28	14,42	9,12	12,33	47	14,68	6,99	12,98

Sabe-se que quando as redes de distribuição apresentam problemas de pressão e vazão, algumas medidas podem ser tomadas para solucionar tais problemas:

- Substituir tubulações que se revelam insuficientes em termos de diâmetros hidráulico;
- Proceder à limpeza das tubulações que se encontram com alto índice de incrustação;
- Proceder à limpeza e o revestimento das tubulações, aumentando desse modo o seu diâmetro hir a setorização do sistema de distribuição;

- Substituir tubulações que apresentam alto índice de rupturas;
- Introduzir “booster” no sistema;
- Colocar válvulas redutoras de pressão de maneira a corrigir distorções existentes.

Com o objetivo de solucionar o problema de baixa pressão em alguns nós da rede hipotética, o modelo SPERTS foi utilizado para simular alternativas que garantissem a reabilitação do sistema em termo de pressão nos nós deficientes. Na Figura 6.5 é possível visualizar a tela com a distribuição de pressões na rede, obtida no ambiente do SPERTS.

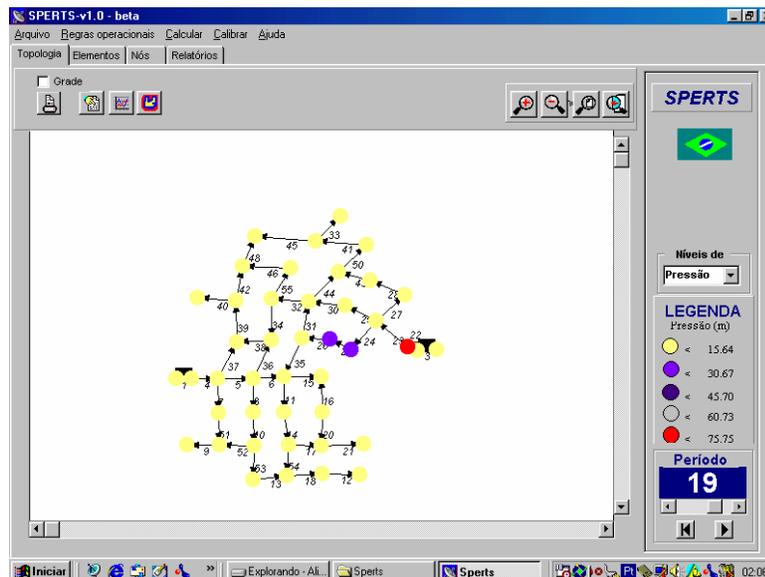


Figura 6.5: Simulação da rede hipotética

Na tentativa de solucionar o problema da rede foram simuladas quatro alternativas no SPERTS.

Alternativa 1 (A1) – Substituição

Uma alternativa encontrada para a reabilitação do sistema é a substituição de dois trechos de rede, o trecho 23 e o trecho 4, que perfazem um total de 5300 metros

de tubulação, através da aplicação de técnica destrutiva, conforme é mostrado na Figura 6.6.

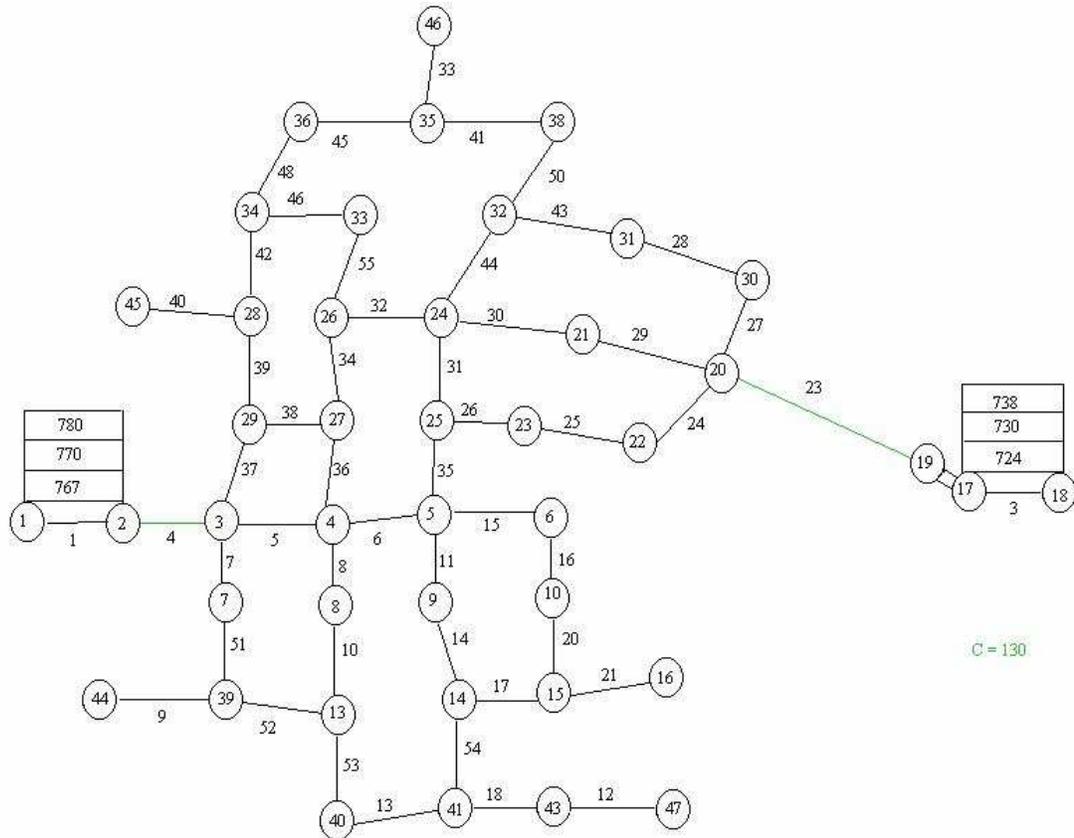


Figura 6.6: Trechos de tubulações a serem substituídas

A alternativa de substituir a tubulação pode ser empregada quando as tubulações apresentam um grande número de rompimentos, ou a estrutura da tubulação está comprometida, ou ainda, nas redes de distribuição que apresentam deficiências em termos de diâmetro hidráulico. Nestes trechos citados a rugosidade da tubulação está comprometida, como é apresentado na Tabela 6.4 e, por isso, optou-se pela substituição, pois para tubulação nova o coeficiente de rugosidade é de 130.

Tabela 6.4: Trechos de tubulações a serem substituídas

Número Trecho	Extensão (m)	Diâmetro (mm)	Coeficiente "C" Antes	Coeficiente "C" Depois
23	3650	250	82	130
4	1650	300	82	130

A substituição dos dois trechos de tubulação permitiu a reabilitação da rede em termos de pressão, uma vez que diminuiu a perda de carga na tubulação aumentando a pressão nos nós, conforme é mostrado na Tabela 6.5. A alternativa de substituir os 5300 metros de tubulações elevou significativamente a pressão média nos nós deficientes, que passaram de 7,4 mca para 21,5 mca.

Tabela 6.5: Pressão nos nós deficientes após a substituição

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	26,70	24,27	24,93	29	26,09	23,47	24,31
08	26,85	22,69	24,89	33	25,23	21,60	23,41
09	26,94	22,25	24,93	34	24,41	20,77	22,59
10	26,16	23,01	24,21	36	25,52	21,58	23,71
13	26,30	21,70	24,29	39	26,50	21,85	24,48
14	24,57	18,98	22,45	40	26,24	20,89	24,14
15	24,58	19,27	22,50	41	26,71	21,08	24,58
16	23,89	17,69	21,70	43	26,16	20,54	24,03
26	25,87	22,41	24,09	44	25,65	21,00	23,63
27	26,51	23,40	24,71	45	25,15	20,77	23,19
28	26,37	23,13	24,54	47	26,57	20,94	24,44

Alternativa 2 (A2) - Limpeza

Foi simulada a limpeza dos trechos adjacentes aos reservatórios, os trechos 23 e 4, conforme é apresentado na Figura 6.7. A escolha da técnica de limpeza está condicionada ao estado físico e a natureza dos detritos conforme descrito anteriormente

no Capítulo 4. Para o estudo de caso, adotou-se a utilização de pig para a remoção da incrustação.

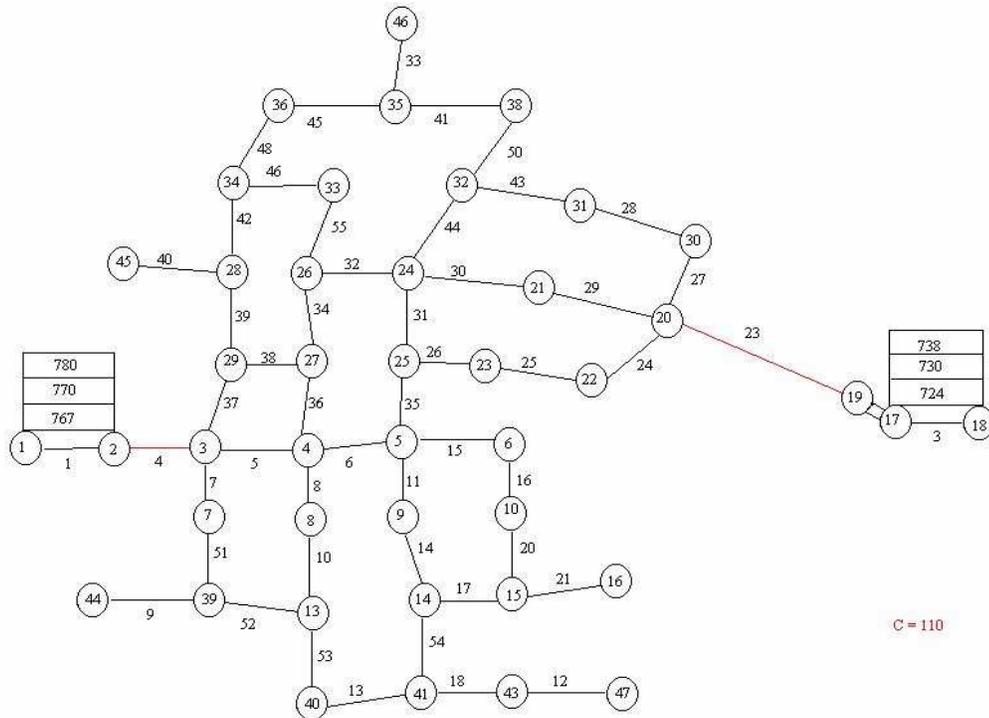


Figura 6.7: Trechos de tubulações a serem limpos

A remoção dos detritos e ou incrustações permite o aumento significativo do coeficiente de rugosidade, podendo chegar a patamares de coeficientes rugosidade de tubulações novas ou semi-novas. Entretanto, neste estudo optou-se por assumir o coeficiente “C” igual a 110, admitindo que a realização da limpeza chegasse ao patamar de tubulações semi-novas. A literatura relata serviços onde o coeficiente “C” superarm o valor 130, podendo chegar a 140 (Capítulo 4).

Tabela 6.6: Trechos das tubulações a serem limpas

Número Trecho	Extensão (m)	Diâmetro (mm)	Coeficiente “C” Antes	Coeficiente “C” Depois
23	3650	250	82	110
4	1650	300	82	110

A alternativa de realizar a limpeza nos dois trechos de tubulação permitiu o aumento de pressão nos nós deficientes como pode ser observado na Tabela 6.7. Sem dúvida, a medida proposta elevou os níveis de pressão nos nós deficientes e, neste caso, a pressão média nos nós deficientes passou de 7,4 mca para 17,7 mca.

Tabela 6.7: Pressão nos nós deficientes após a limpeza

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	23,56	20,57	21,72	29	22,92	19,74	21,07
08	23,68	18,96	21,65	33	21,95	17,76	20,06
09	23,75	18,50	21,67	34	21,40	16,94	19,24
10	22,96	18,26	20,95	36	22,17	17,68	20,29
13	23,13	17,97	21,05	39	23,34	18,12	21,24
14	21,38	15,24	19,19	40	23,06	17,16	20,89
15	21,39	15,52	19,23	41	23,53	17,34	21,33
16	20,70	13,93	18,44	43	22,98	16,79	20,78
26	22,57	18,56	20,71	44	22,49	17,27	20,39
27	23,30	19,63	21,42	45	21,94	17,01	19,91
28	23,16	19,37	21,27	47	23,38	17,20	21,18

Alternativa 3 (A3) - Reabilitação

Com a preocupação de causar mínimos transtornos na execução de serviços necessários para tornar o sistema eficiente, a reabilitação do trecho 4, com 1650 m de comprimento através de técnicas não destrutiva é outra alternativa analisada. Esse trecho foi selecionado por apresentar grande perda de carga e ser o principal tronco de alimentação do setor deficiente. O trecho a ser reabilitado é apresentado na Figura 6.8.

A título de simulação, foi empregado o coeficiente “C” igual a 125, que corresponde ao revestimento de tubulações com argamassa de cimento ou de resina epóxi, conforme mostrado na Tabela 6.8. Durante as visitas técnicas feitas, verificou-se que estas técnicas são as técnicas de reabilitação comumente empregadas no Brasil.

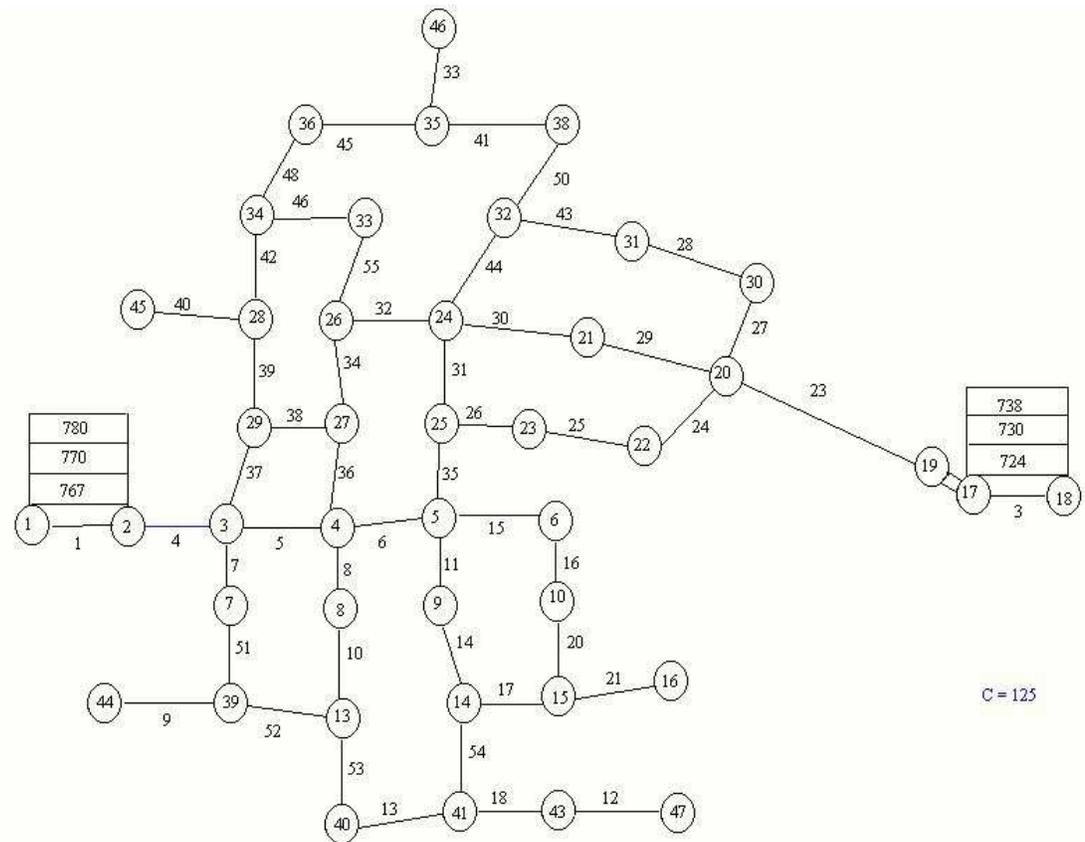


Figura 6.8: Trecho da rede a ser reabilitada

Tabela 6.8: Trecho da tubulação reabilitada

Número Trecho	Extensão (m)	Diâmetro (mm)	"C" Antes	"C" Depois
04	1650	300	82	125

O resultado da simulação do trecho 4 através da técnica de reabilitação não destrutiva foi satisfatório pois, verificou-se que o quesito pressão foi atendido conforme pode ser visualizado na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Pressão nos nós deficientes após a reabilitação das tubulações

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	24,06	21,31	22,10	29	23,23	20,25	21,26
08	23,91	19,37	21,76	33	21,18	17,03	19,19
09	23,79	18,69	21,60	34	20,46	16,30	18,46
10	22,99	18,43	20,87	36	20,86	16,34	18,88
13	23,38	18,40	21,18	39	23,63	18,60	21,42
14	21,46	15,46	19,15	40	23,25	17,52	20,97
15	21,44	15,72	19,17	41	23,63	17,60	21,32
16	20,75	14,12	18,38	43	23,08	17,05	20,77
26	21,62	17,60	19,66	44	22,78	17,75	20,57
27	23,15	19,60	21,16	45	21,91	17,12	19,76
28	23,13	19,48	21,92	47	23,48	17,45	21,17

Observou-se que, os valores de pressão nos nós deficientes foram muito próximos ao da alternativa 2, que simulou a limpeza de 5300 metros de tubulações, ou seja, a pressão média nos nós deficientes para a alternativa de limpeza é de 17,7 mca, enquanto a de reabilitação é de 17,8 mca.

Alternativa 4 (A4) – Colocação de “booster”

Durante a simulação da rede notou-se que alguns setores da rede, em determinadas horas do dia, apresentavam pressões abaixo da mínima permitida e a colocação “boosters” em pontos estratégicos resolveria o problema de pressão na rede.

Alternativa 5 (A5) – Fechamento da malha

Outra alternativa analisada foi a construção de dois trechos de rede de 100 mm de diâmetro, medindo 960 metros de comprimento, através de técnica destrutiva. A instalação da tubulação permite o fechamento dos dois anéis sendo que, o trecho 70 foi necessário 525 metros de tubulação em ferro fundido para interligar os nós 23 – 6 e, o

trecho 71, 425 metros de tubulação em ferro fundido para interligar o nós 32 – 33, conforme apresentado na Figura 6.9 e descrito na Tabela 6.10.

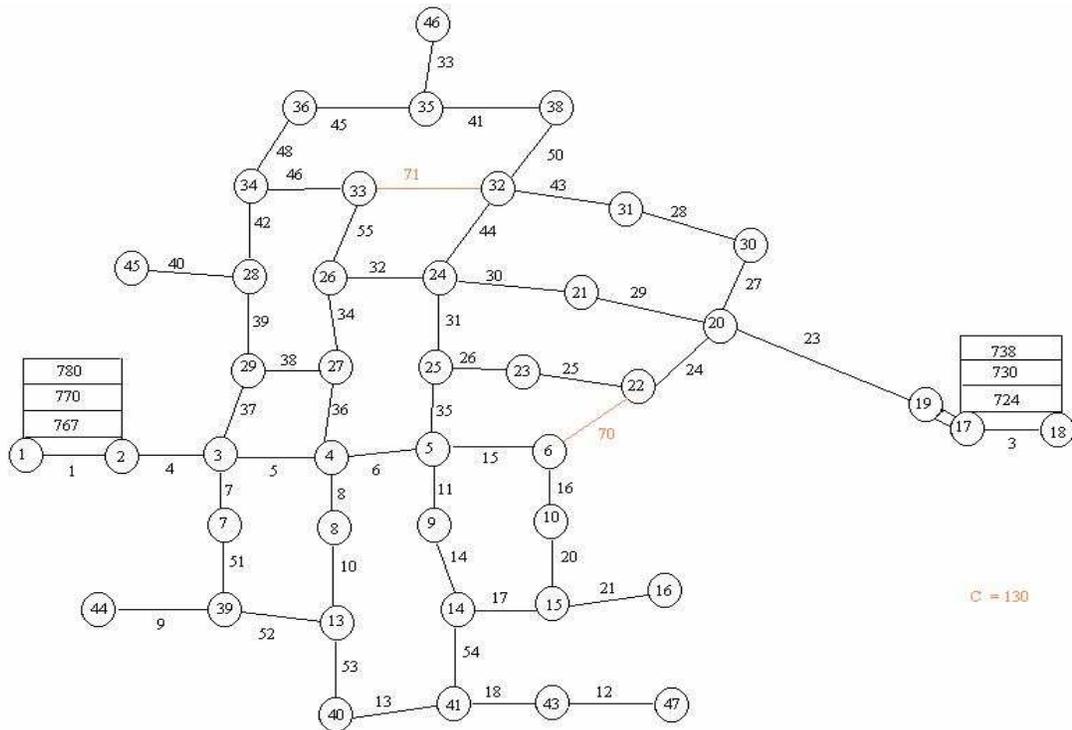


Figura 6.9: Fechamento de anéis da rede

Tabela 6.10: Fechamento de anéis na rede

Número Trecho	Extensão (m)	Diâmetro (mm)	Coefficiente "C"
70	525	100	130
71	435	100	130

O fechamento de duas malhas na rede permitiram o aumento da pressão nos nós deficientes. As pressões ficaram próximas aos valores obtidos na simulação para a alternativa A1, ou seja, a média dos valores das pressões nos nós deficientes para substituição 5300 metros de tubulações é de 21,5 mca, enquanto o fechamento das malhas garantem a pressão média nos nós deficientes de 20,6 mca. Na Tabela 6.11

são apresentados os valores das pressões obtidos na simulação do fechamento das malhas.

Tabela 6.11: Pressão nos nós após o fechamento da malha

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	26,17	23,53	24,34	29	25,22	22,36	23,39
08	26,51	22,15	24,52	33	22,65	18,63	20,80
09	27,18	22,33	25,15	34	21,84	17,79	19,96
10	27,81	23,68	25,90	36	21,24	16,76	19,32
13	26,04	21,24	23,99	39	26,19	21,34	24,13
14	25,33	19,65	23,21	40	26,31	20,81	24,19
15	25,81	20,46	23,74	41	27,29	21,56	25,16
16	25,12	18,87	22,95	43	26,74	21,01	24,61
26	22,67	18,72	20,82	44	25,34	20,49	23,28
27	25,02	21,59	23,16	45	23,70	19,02	21,68
28	24,92	21,38	23,03	47	27,17	21,42	25,01

Como pode ser observado todas as alternativas propostas atendem ao quesito de pressão mínima, conforme é mostrado na Figura 6.10. Observou-se também que as alternativas apresentaram um comportamento muito semelhante com relação à pressão nos nós.

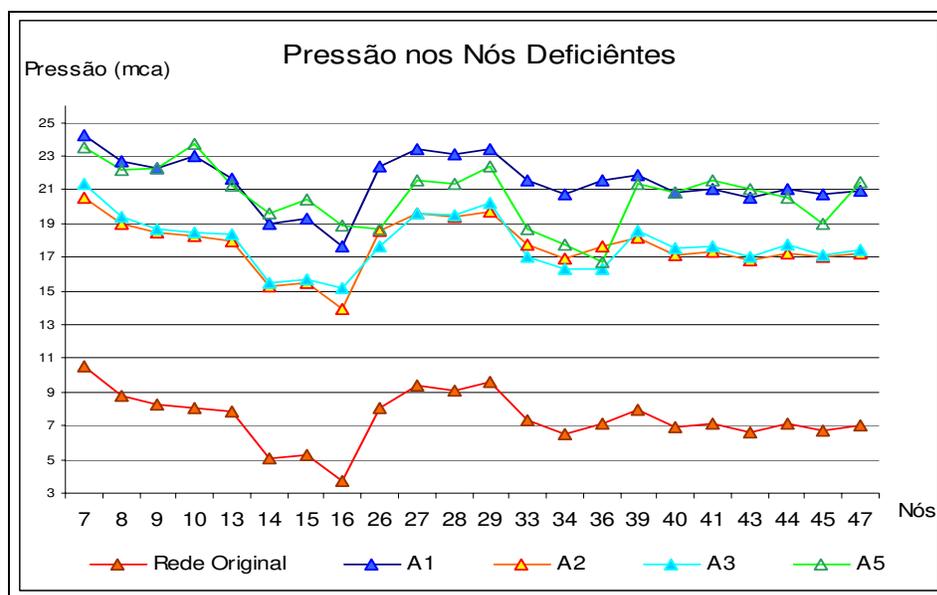


Figura 6.10: Comportamento das pressões nos nós para as alternativas propostas.

Com relação às alternativas propostas, a autora acredita que o emprego de técnicas não destrutivas constitui importante solução alternativa pois possibilita a restauração das redes existentes de forma rápida e, garantem o restabelecimento do dimensionamento original das tubulações, promovendo o revestimento das paredes internas o que prolonga a sobrevida útil. A maior vantagem na utilização de técnicas não destrutiva é que o impacto ambiental e social do trabalho a ser executado é mínimo quando comparado a técnica destrutiva. A autora entende que o estudo do melhor trecho a ser reabilitado demanda conhecimento da rede, pois dependendo da medida adotada poderão ocorrer outros transtornos que poderão implicar na adoção de outras medidas.

A autora crê que, a alternativa de substituir as tubulações através de técnica destrutiva, ou seja, de forma convencional, deve ser encarada como opção e não como alternativa única, pois, além de onerosa, tem como inconveniente o alto custo social, exige a remoção de grande área pavimentada, movimento de terra, corte no abastecimento aos usuários além dos transtornos causados pela obstrução das vias públicas dificultando tanto o acesso residencial como o comercial.

Cabe lembrar que, o tempo de execução nem sempre é considerado durante o estudo de alternativas viáveis. HOOGSTEEN (1993) recomenda que uma vez estabelecidas as alternativas, devem ser examinadas, priorizadas, realizado o levantamento do custo de cada alternativa e por fim, seja feita uma análise de custo comparativo antes de ser decidido um plano de ação. No entanto, planejar as medidas que deverão ser tomadas e associar o custo-benefício proporcionado, é tarefa árdua.

A utilização de qualquer processo de limpeza permitirá aumento do coeficiente de Hazen Willians, mas conforme comentado por DUTTING (1968) e TSUTIYA (2001), em um curto período de tempo, o valor do coeficiente “C” torna-se praticamente idêntico ao verificado antes da aplicação da limpeza. Embora a alternativa estudada traga benefícios à curto prazo, com o mínimo custo, sabe-se que a mesma tem que ser

refeita de tempos em tempos e um grande volume de água é desperdiçado durante a limpeza da tubulação.

6.1.1.1 Mudança na Curva de Demanda

Com intuito de verificar a vulnerabilidade das alternativas propostas anteriormente, em relação à pequenas mudanças de demanda, fez-se um acréscimo da demanda em alguns nós, conforme apresentados na Tabela 6.12, para o verificar o comportamento da pressão nos nós deficientes.

Tabela: 6.12: Acréscimo da demanda nos nós

<i>Número Nó</i>	<i>Q (l/s) Normal</i>	<i>Q (l/s) acréscimo</i>	<i>Curva</i>
3	0,5	1,0	N2
4	3,0	4,0	N2
5	5,0	6,0	N2
10	0,0	1,0	N2
22	1,0	1,5	N2

O resultados das simulações para as alternativas propostas levando em consideração o acréscimo de demanda são apresentados a seguir.

Alternativa 1 (A1) -Substituição

Foi simulada a substituição dos trechos 23 e 4, que perfazem um total de 5300 metros de tubulação, por meio da aplicação de técnica destrutiva. Nestes trechos citados utilizou-se o coeficiente de rugosidade igual a 130. Como pode ser observada na Tabela 6.13, a alternativa não mostrou ser vulnerável ao acréscimo de demanda, mantendo valores acima do limite mínimo de pressão nos nós deficientes.

Tabela 6.13: Pressões (mca) para os nós deficientes - Substituição

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	24,86	22,18	22,86	29	24,22	21,35	22,22
08	24,58	20,08	22,38	33	23,33	19,43	21,29
09	24,27	19,18	22,02	34	22,52	18,62	20,48
10	22,79	18,11	20,59	36	23,66	19,46	21,64
13	24,03	19,10	21,78	39	24,30	19,32	22,04
14	21,72	15,69	19,36	40	23,78	18,06	21,44
15	21,54	15,76	19,20	41	23,95	17,90	21,58
16	21,06	14,82	18,63	43	23,40	17,35	21,03
26	23,93	20,20	21,93	44	23,45	18,47	21,19
27	24,47	21,07	22,44	45	23,27	18,64	21,09
28	24,49	21,00	22,44	47	23,81	17,76	21,43

Alternativa 2 (A2) - Limpeza

Foi simulada a limpeza dos trechos 4 e 23, que totalizam 5300 metros de tubulações. Durante a simulação admitiu-se que a eficiência da limpeza neste dois trechos de tubulação atingisse o patamar de tubulações semi-novas e, por isso, foi utilizado o coeficiente de rugosidade igual a 110. Os resultados obtidos para a pressão nos nós deficientes podem ser visualizados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14: Pressões (mca) para os nós deficientes - Limpeza

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	21,37	18,08	19,29	29	20,72	17,23	18,63
08	21,03	15,92	18,76	33	19,71	15,20	17,59
09	20,64	14,91	18,31	34	18,91	14,39	16,79
10	19,14	13,82	16,86	36	19,98	15,17	17,87
13	20,48	14,92	18,15	39	20,76	15,16	18,42
14	18,03	11,36	15,58	40	20,18	13,83	17,76
15	17,80	11,36	15,38	41	20,28	13,59	17,83
16	17,11	9,77	14,58	43	19,74	13,04	17,28
26	20,29	15,95	18,21	44	19,91	14,31	17,57
27	21,91	16,89	18,80	45	19,73	14,48	17,42
28	20,95	16,87	18,82	47	20,14	13,44	17,68

Alternativa 3 (A3)- Reabilitação

Como comentado anteriormente, foi selecionado para a reabilitação da rede o trecho 4, por apresentar grande perda de carga e também por ser o principal tronco adutor do setor deficiente. Foi empregado o coeficiente de rugosidade igual a 125, o que corresponde a reabilitação de tubulações com argamassa de cimento, argamassa acrílica ou resina epóxi. Os resultados obtidos nesta simulação são apresentados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15: Pressões (mca) para os nós deficientes - Reabilitação

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	24,79	22,11	22,79	29	24,16	21,28	22,15
08	24,48	19,98	22,28	33	23,26	19,36	21,22
09	24,11	18,99	21,87	34	22,46	18,55	20,41
10	22,61	17,90	20,40	36	23,60	19,39	21,57
13	23,93	18,98	21,68	39	24,21	19,21	21,94
14	21,50	15,43	19,12	40	23,64	17,89	21,29
15	21,27	15,44	18,92	41	23,75	17,66	21,37
16	20,58	13,85	18,12	43	23,20	17,11	20,82
26	23,87	20,13	21,86	44	23,36	18,36	21,09
27	24,40	20,99	22,36	45	23,21	18,57	21,02
28	24,43	20,93	22,37	47	23,60	17,52	21,20

Alternativa 5 (A5)- Fechamento da malha

Foram construídos dois trechos de rede, trecho 70 e 71, conforme a Figura 6.9 que permitiram o fechamento de duas malhas. Admitiu-se que a tubulação empregada nesta alternativa é de PEAD e, adotou-se o coeficiente de rugosidade igual a 130. Na Tabela 6.16 são apresentados os valores das pressões simulados, em mca, para os nós deficientes da rede em questão.

Tabela 6.16: Pressões (mca) para os nós deficientes – Fechamento da malha

Número Nó	Período			Número Nó	Período		
	18 (h)	19 (h)	20 (h)		18 (h)	19 (h)	20 (h)
07	21,22	17,90	18,82	29	20,17	16,61	17,76
08	20,48	15,22	17,90	33	17,04	12,23	14,63
09	19,03	19,90	16,40	34	16,24	11,42	13,81
10	19,44	13,97	16,92	36	15,15	9,97	12,67
13	19,98	14,28	17,35	39	20,31	14,59	17,67
14	17,46	10,54	14,73	40	19,67	13,13	16,94
15	17,67	11,03	15,00	41	19,72	12,79	16,99
16	16,98	9,44	14,20	43	19,17	12,24	16,44
26	17,05	12,30	14,63	44	19,46	13,74	16,82
27	19,46	15,24	17,03	45	18,47	13,07	15,88
28	19,69	15,43	17,24	47	19,57	12,65	16,84

Analisando os resultados obtidos das simulações das alternativas propostas, observou-se que uma pequena variação no perfil de consumo comprometeu a pressão em vários nós do sistema conforme é mostrado na Figura 6.11. Para a alternativa de limpeza (A2), 13 nós apresentaram pressões abaixo da mínima requerida. Muito semelhante foi o comportamento da simulação para alternativa de fechamento de malha (A5), que mostrou 16 nós com deficiência de pressão, o que leva a crer que, outras medidas deverão ser tomadas no planejamento da reabilitação do sistema para esses dois casos em especial.

Da análise dos resultados apresentados observou-se também que, a alternativa (A1) - substituição dos trechos (4 -23) e a alternativa (A3)- reabilitação do trecho 4 não foram vulneráveis a mudanças nos nós de consumo e, portanto, podem ser consideradas como opções mais adequadas no planejamento da reabilitação do sistema.

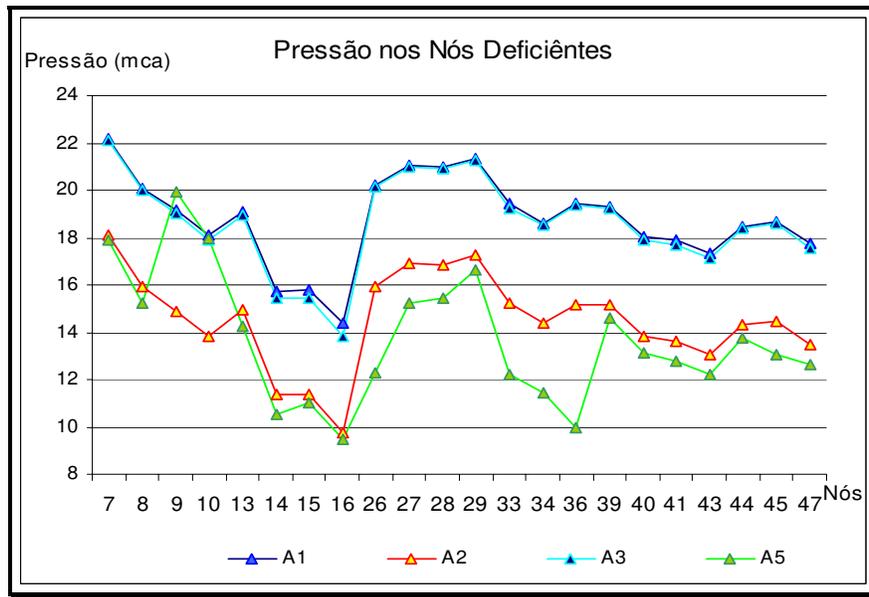


Figura 6.11: Pressão (mca) nos nós – acréscimo de demanda

6.1.2. Aplicação dos Modelos Multicriteriais

Com o objetivo de exprimir os anseios econômicos, sociais, ambientais e técnicos foram elaborados 15 critérios para a aplicação dos métodos multicriteriais. Os critérios foram elaborados com a ajuda de alguns decisores de empresas de saneamento e com a ajuda de pesquisadores que atuam área de recursos hídricos. Para a definição das notas relativas a cada um dos critérios foi solicitado o preenchimento do questionário entregue em mãos, a 80 pessoas, de quatro grupos distintos, porém apenas 65 questionários foram respondidos sendo que destes 19 profissionais especialista trabalham em recursos hídricos, 20 profissionais de diversas áreas das empresas de saneamento, 20 consumidores com formação de nível superior que utilizam o sistema de abastecimento e, 6 técnicos das empresas prestadoras de serviços de reabilitação em tubulações. Na pesquisa de campo (entrevistas), não foi realizado nenhum tratamento estatístico nos pesos obtidos, preservando assim, o desejo de cada decisor, na tomada de decisão. As notas atribuídas pelos decisores durante a pesquisa de campo são apresentadas nas Tabelas de 1 a 4 no Anexo A.

A título de evitar diferenças grotescas no momento do preenchimento do questionário, durante a atribuição das notas foi descrito resumidamente o cenário de uma cidade fictícia para o estudo de caso. Imaginou-se uma cidade de porte médio, com 250 anos de idade e 400 mil habitantes. Na sua área central, possui monumentos históricos e tem regiões comerciais e industriais bem definidas. Na área central da cidade está localizada a área comercial. O sistema de distribuição de água começou a apresentar problemas de rompimentos, baixa pressão na rede, água suja entre outros problemas, com uma certa freqüência, sendo necessária a intervenção com medidas que a reabilitem. É conveniente destacar que neste local há um grande fluxo de pessoas e veículos transitando diariamente.

Notou-se uma discrepância natural entre os grupos de decisores entrevistados em relação às notas atribuídas aos critérios. Foi sugerido aos decisores entrevistados que atribuíssem notas no valor contido no intervalo de 1 a 10, que melhor representasse a opinião sobre a importância relativa a cada critério. Os comentários com relação ao julgamento dos decisores são apresentados no item 6.1.2.4. O questionário entregue aos entrevistados pode ser observado no anexo A.

De posse dos critérios, das notas atribuídas a cada critério e das alternativas obtidas através do simulador e que, portanto, satisfazem e resolvem os problemas operacionais detectados, inicia-se neste ponto, a real contribuição acadêmica do trabalho proposto, onde procurar-se-á dentro de um ambiente multicritério, proceder a um estudo de hierarquização de alternativas conjuntamente com a quantificação da contribuição de cada alternativa para a reabilitação do sistema. Os critérios e as notas obtidas foram aplicados em quatro métodos multicriteriais: método de Programação de Compromisso (CP), o método ELECTRE II, modelo VIP e por fim o modelo Expert Choice (EC).

Para a utilização dos métodos multicriteriais foi necessária a definição da matriz de "PayOff". Para a construção da matriz "PayOff" adotou-se uma escala de notas para os critérios variando de um valor mínimo igual a 1 e valor máximo igual a 5.

Na Tabela 6.17 é possível visualizar os quinze critérios utilizado neste trabalho, bem como, o seu grau de importância com relação a cada alternativa estudada. Uma vez estabelecida a matriz “PayOff” e de posse das notas atribuídas pelos quatro grupos de decisores distintos, procedeu-se à aplicação dos métodos multicriteriais.

Tabela 6.17 : Matriz “PayOff”

Critérios	Alternativas				
	A1	A2	A3	A4	A5
<i>Custos Direto</i>	1	5	2	3	3
<i>Custos Operacionais</i>	4	3	4	1	4
<i>Custos com Manutenção</i>	3	2	3	1	3
<i>Custos Indiretos</i>	2	5	5	3	2
<i>Custos Sociais</i>	2	5	4	3	2
<i>Custos Ambientais</i>	1	3	4	3	1
<i>Custos de Capital</i>	1	5	1	2	3
<i>Eficiência</i>	5	3	5	4	4
<i>Vida Útil da Sol. de Reabilitação</i>	5	2	5	3	5
<i>Tempo de Execução</i>	1	5	4	3	2
<i>Flexibilidade</i>	3	2	3	5	3
<i>Confiabilidade</i>	5	3	5	4	5
<i>Aceitabilidade</i>	2	5	4	4	3
<i>Qualidade dos Serviços</i>	5	3	5	4	5
<i>Imagem</i>	5	3	5	4	4

6.1.2.1. Resultados Obtidos

De posse das notas atribuídas pelos 65 decisores (DM) e da matriz “PayOff”, iniciou-se a análise multicriterial por diferentes métodos, para os diferentes grupos de decisores. Os resultados da aplicação dos métodos são apresentados nas Tabelas 6.18 a 6.33. A classificação das alternativas que satisfazem a reabilitação do sistema de distribuição hipotético são apresentadas na forma de % de ocorrência em cada posição hierárquica nas Figuras 6.12 a 6.27 (também resumidas na Tabela 6.34).

Tabela 6.18: Resultados da aplicação do método ELECTRE II

Consumidores do sistema de abastecimento de água					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
DM1	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM2	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM3	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM4	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM5	A3	A2	A5	A4	A1
DM6	A3	A2	A4	A5	A1
DM7	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM8	A3	A2	A1 – A4 – A5		
DM9	A3	A2 – A5	A4	A1	
DM10	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM11	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM12	A3	A2 – A4	A1 – A5		
DM13	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM14	A3	A2	A1 – A4 – A5		
DM15	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM16	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM17	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM18	A3	A2	A5	A4	A1
DM19	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM20	A3	A2 – A4 – A5	A1		

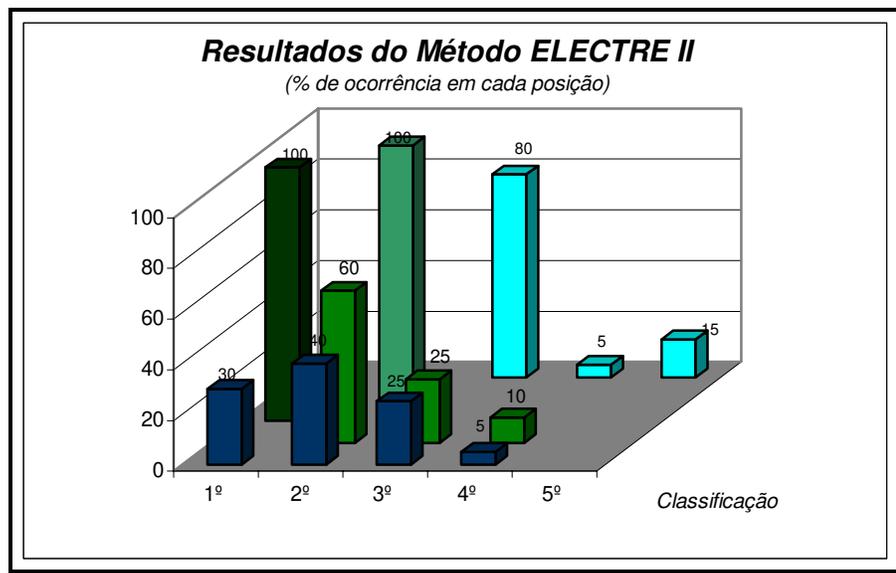


Figura 6.12: Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “consumidores”

Tabela 6.19: Resultados da aplicação do modelo VIP

Consumidores do sistema de abastecimento de água					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2	A5	A1	A4
DM2	A3	A2	A5	A4	A1
DM3	A3	A2	A5	A4	A1
DM4	A3	A2	A5	A4	A1
DM5	A2	A3	A5	A1	A4
DM6	A3	A2	A4	A5	A1
DM7	A3	A2	A5	A4	A1
DM8	A3	A2	A5	A4	A1
DM9	A3	A2	A5	A4	A1
DM10	A2	A3	A5	A4	A1
DM11	A3	A2	A5	A4	A1
DM12	A3	A2	A5	A4	A1
DM13	A3	A2	A5	A4	A1
DM14	A3	A2	A5	A1	A4
DM15	A3	A2	A5	A4	A1
DM16	A3	A2	A5	A4	A1
DM17	A3	A2	A5	A4	A1
DM18	A3	A2	A5	A4	A1
DM19	A3	A2	A5	A4	A1
DM20	A3	A2	A5	A1	A4

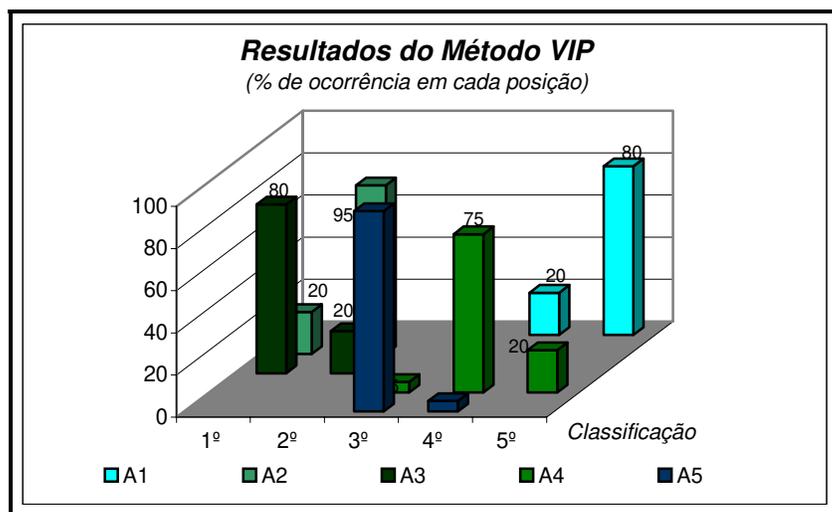


Figura 6.13: Hierarquização do modelo VIP para a categoria “consumidores”

Tabela 6.20: Resultados da aplicação do método CP

Consumidores do sistema de abastecimento de água										
Decisor	Classificação das Alternativas									
	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª	
	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2
DM1	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM2	A3	A3	A5	A4	A1	A5	A2	A1	A4	A2
DM3	A3	A3	A5	A4	A1	A5	A2	A1	A4	A2
DM4	A3	A3	A5	A4	A1	A5	A2	A1	A4	A2
DM5	A3	A3	A2	A2	A5	A5	A1	A1	A4	A4
DM6	A3	A3	A2	A4	A4	A2	A5	A5	A1	A1
DM7	A3	A3	A2	A2	A5	A4	A1	A5	A4	A1
DM8	A3	A3	A2	A2	A5	A4	A1	A5	A4	A1
DM9	A3	A3	A2	A5	A5	A2	A1	A4	A4	A1
DM10	A3	A3	A2	A2	A5	A5	A1	A4	A4	A1
DM11	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM12	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM13	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM14	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM15	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM16	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM17	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM18	A3	A3	A2	A2	A5	A5	A1	A4	A4	A1
DM19	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM20	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2

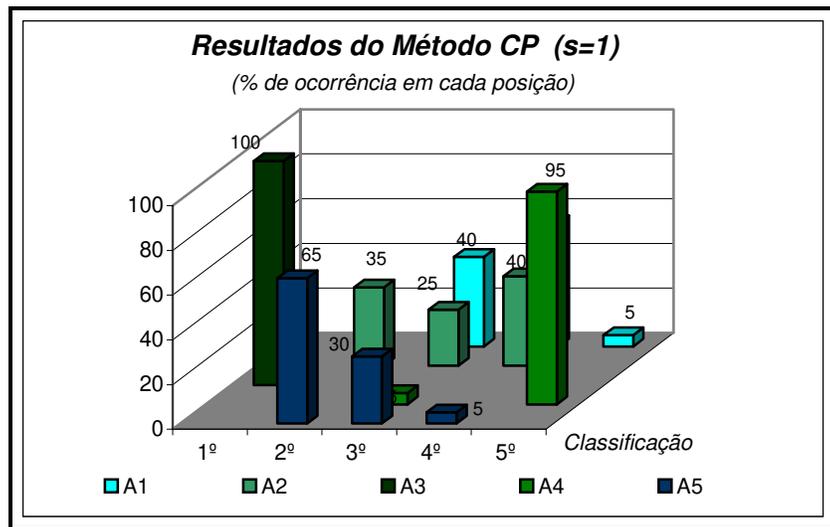


Figura 6.14: Hierarquização do método CP para a categoria “consumidores”

Tabela 6.21: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice

Decisor	Consumidores do sistema de abastecimento de água				
	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2	A5	A4	A1
DM2	A3	A2	A5	A4	A1
DM3	A3	A2	A4	A5	A1
DM4	A3	A2	A4	A5	A1
DM5	A2	A3	A5	A4	A1
DM6	A3	A2	A4	A5	A1
DM7	A3	A2	A5	A4	A1
DM8	A3	A2	A5	A4	A1
DM9	A3	A2	A5	A4	A1
DM10	A3	A2	A5	A4	A1
DM11	A3	A2	A5	A4	A1
DM12	A3	A2	A5	A4	A1
DM13	A3	A2	A5	A4	A1
DM14	A3	A2	A5	A4	A1
DM15	A3	A2	A5	A4	A1
DM16	A3	A2	A5	A4	A1
DM17	A3	A2	A5	A4	A1
DM18	A3	A2	A5	A4	A1
DM19	A3	A2	A5	A4	A1
DM20	A3	A2	A5	A4	A1

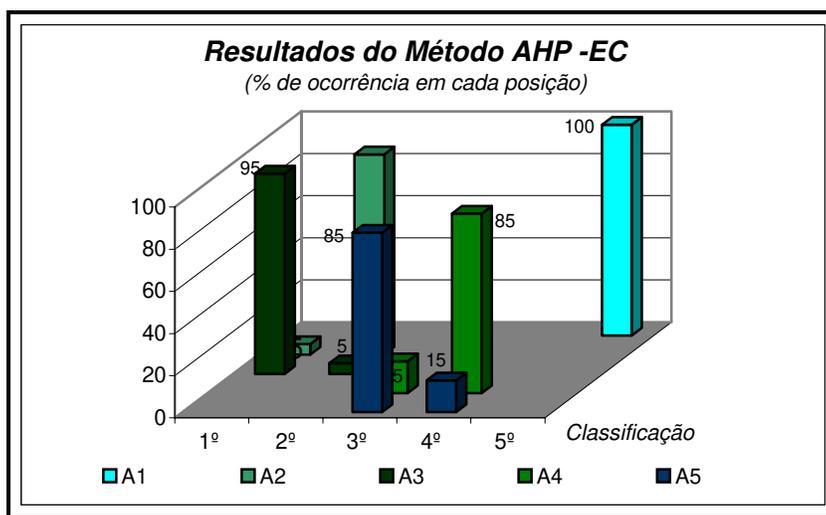


Figura 6.15: Hierarquização do modelo EC para a categoria “consumidores”

Tabela 6.22: Resultados da aplicação do método ELECTRE II

Decisor	Acadêmicos e especialistas da área de recursos hídricos				
	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM2	A3	A2 – A4	A1 – A5		
DM3	A3	A2 – A5	A1		
DM4	A3	A2 – A5	A4	A1	
DM5	A3	A2	A1 – A4 – A5		
DM6	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM7	A3	A2 – A5	A1 – A4		
DM8	A3	A2	A1 – A4 – A5		
DM9	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM10	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM11	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM12	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM13	A3	A2	A1 – A4 – A5		
DM14	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM15	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM16	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM17	A3	A2 – A4	A1 – A5		
DM18	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM19	A3	A2	A1 – A4 – A5		

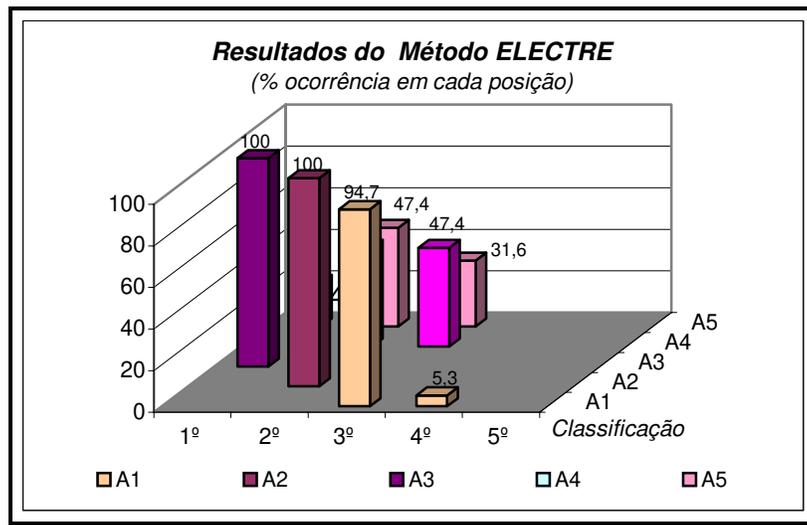


Figura 6.16: Hierarquização do método ELECTRE II para categoria “acadêmicos e especialistas”

Tabela 6.23: Resultados da aplicação do modelo VIP

Decisor	Acadêmicos e especialistas da área de recursos hídricos				
	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2	A5	A4	A1
DM2	A3	A2	A5	A1	A4
DM3	A3	A2	A5	A1	A4
DM4	A3	A2	A5	A4	A1
DM5	A3	A2	A5	A4	A1
DM6	A3	A2	A5	A4	A1
DM7	A3	A5	A2	A1	A4
DM8	A3	A2	A5	A1	A4
DM9	A3	A2	A5	A4	A1
DM10	A3	A2	A5	A4	A1
DM11	A3	A2	A5	A4	A1
DM12	A3	A2	A5	A4	A1
DM13	A3	A2	A5	A4	A1
DM14	A3	A5	A2	A1	A4
DM15	A3	A2	A5	A4	A1
DM16	A3	A2	A5	A4	A1
DM17	A3	A2	A5	A4	A1
DM18	A3	A2	A5	A4	A1
DM19	A3	A2	A5	A4	A1

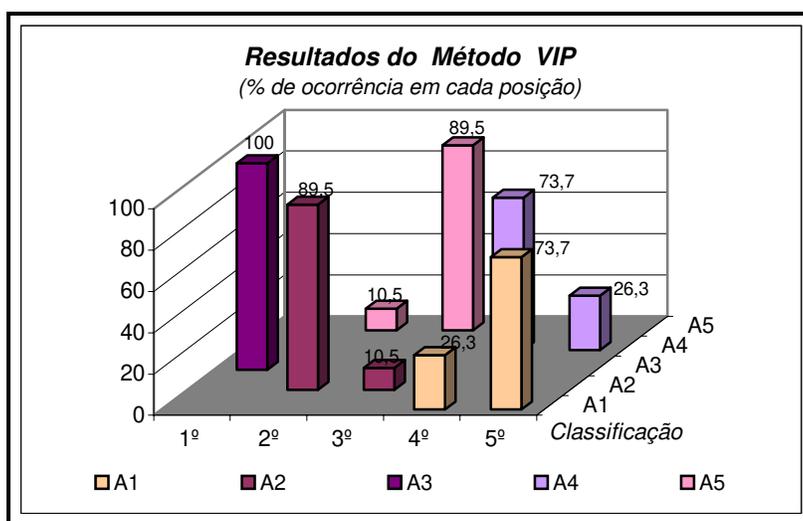


Figura 6.17: Hierarquização do modelo VIP para a categoria “ acadêmicos e especialistas”

Tabela 6.24: Resultados da aplicação do método CP

Acadêmicos e especialistas da área de recursos hídricos										
Decisor	Classificação das Alternativas									
	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª	
	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2
DM1	A3	A3	A2	A5	A5	A4	A1	A2	A4	A1
DM2	A3	A3	A5	A5	A1	A1	A2	A4	A4	A2
DM3	A3	A3	A5	A4	A1	A1	A2	A2	A4	A4
DM4	A3	A3	A2	A5	A5	A4	A1	A4	A4	A1
DM5	A3	A3	A5	A4	A1	A5	A2	A1	A4	A2
DM6	A3	A3	A5	A5	A2	A2	A1	A4	A4	A1
DM7	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM8	A3	A3	A5	A4	A2	A5	A1	A2	A4	A1
DM9	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM10	A3	A3	A5	A4	A2	A5	A1	A2	A4	A1
DM11	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM12	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM13	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM14	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM15	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM16	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM17	A3	A3	A2– A5	A4	A1	A5	A4	A2		A1
DM18	A3	A3	A5	A5	A2	A2	A1	A4	A4	A1
DM19	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2

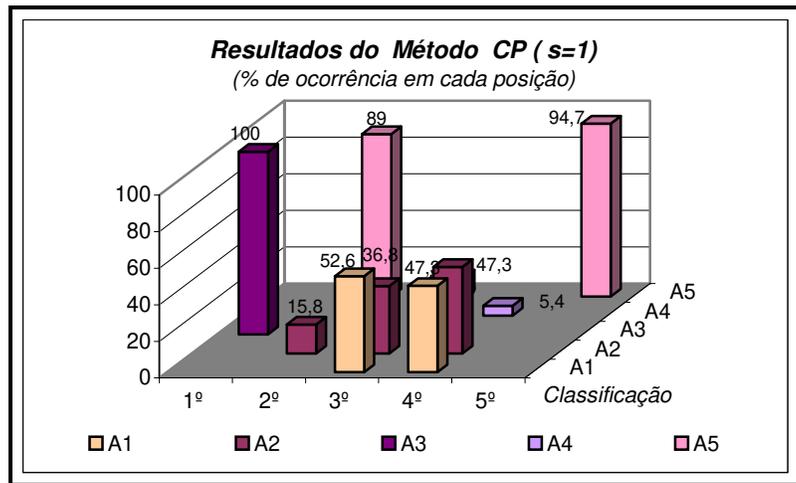


Figura 6.18: Hierarquização do método CP para a categoria “acadêmicos e especialistas”

Tabela 6.25 : Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice

Decisor	Acadêmicos e especialistas da área de recursos hídricos				
	Classificação das Alternativas				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
DM1	A3	A2	A4	A5	A1
DM2	A3	A2	A4	A5	A1
DM3	A3	A2	A4	A5	A1
DM4	A3	A2	A4	A5	A1
DM5	A3	A2	A4	A5	A1
DM6	A3	A2	A4	A5	A1
DM7	A3	A2	A4	A5	A1
DM8	A3	A2	A4	A5	A1
DM9	A3	A2	A4	A5	A1
DM10	A3	A2	A4	A5	A1
DM11	A3	A2	A4	A5	A1
DM12	A3	A2	A4	A5	A1
DM13	A3	A2	A4	A5	A1
DM14	A3	A2	A4	A5	A1
DM15	A3	A2	A4	A5	A1
DM16	A3	A2	A4	A5	A1
DM17	A3	A2	A4	A5	A1
DM18	A3	A2	A4	A5	A1
DM19	A3	A2	A4	A5	A1

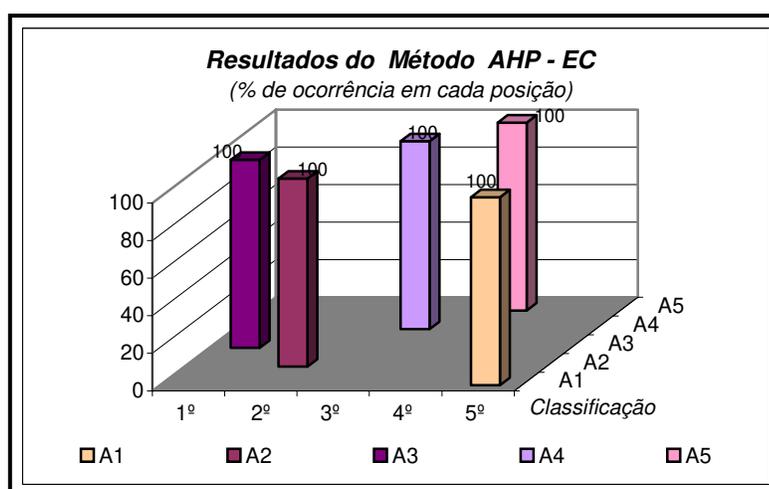


Figura 6.19: Hierarquização do modelo EC para a categoria “acadêmicos e especialistas”

Tabela 6.26: Resultados da aplicação do método ELECTRE II

Decisores das empresas de saneamento					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2 – A5	A1 – A4		
DM2	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM3	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM4	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM5	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM6	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM7	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM8	A3 – A5	A2 – A4	A1		
DM9	A3	A2 – A5	A4	A1	
DM10	A3	A2 – 5A	A4	A1	
DM11	A3	A2 – A5	A4	A1	
DM12	A3	A2 – A5	A4	A1	
DM13	A3	A2 – A5	A4	A1	
DM14	A3	A1 – A2 – A4 – A5			
DM15	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM16	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM17	A3	A2 – A4 – 5A	A1		
DM18	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM19	A3 – A5	A2	A1 – A4		
DM20	A3	A2 – A5	A1 – A4		

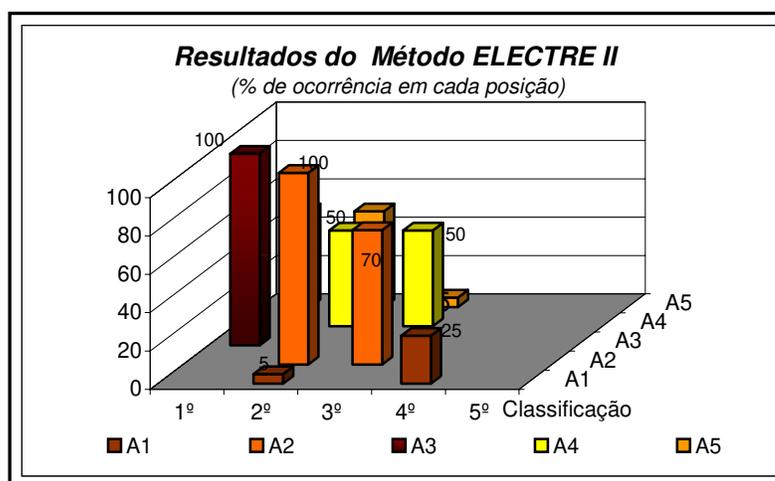


Figura 6.20: Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “empresas de saneamento”

Tabela 6.27: Resultados da aplicação do modelo VIP

Decisor	Decisores das empresas de saneamento				
	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A5	A2	A1	A4
DM2	A3	A2	A5	A4	A1
DM3	A3	A2	A5	A4	A1
DM4	A3	A2	A5	A4	A1
DM5	A3	A2	A5	A4	A1
DM6	A3	A2	A5	A4	A1
DM7	A3	A2	A5	A4	A1
DM8	A3	A2	A5	A4	A1
DM9	A3	A2	A5	A4	A1
DM10	A3	A2	A5	A4	A1
DM11	A3	A5	A2	A1	A4
DM12	A3	A2	A5	A4	A1
DM13	A3	A2	A5	A4	A1
DM14	A3	A2	A5	A1	A4
DM15	A3	A2	A5	A4	A1
DM16	A3	A2	A5	A4	A1
DM17	A3	A2	A5	A4	A1
DM18	A3	A2	A5	A4	A1
DM19	A3	A2	A5	A4	A1
DM20	A3	A2	A5	A1	A4

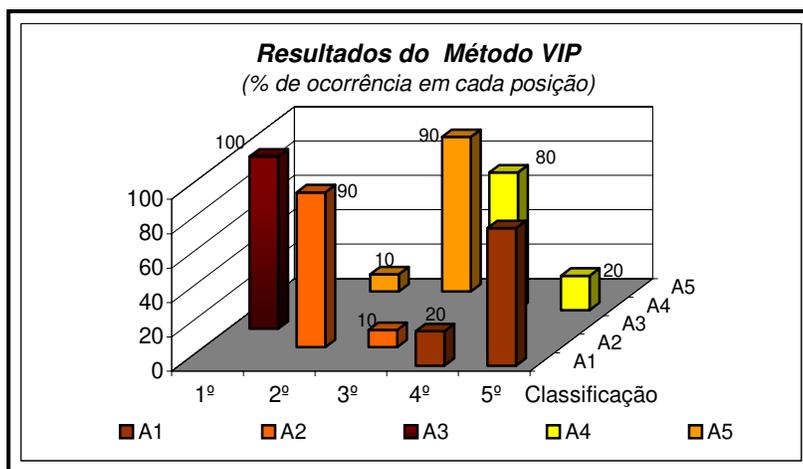


Figura 6.21: Hierarquização do modelo VIP para a categoria das “empresas de saneamento”

Tabela 6.28: Resultados da aplicação do método CP

Decisores das empresas de saneamento										
Decisor	Classificação das Alternativas									
	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª	
	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2
DM1	A3	A3	A5	A5	A1	A1	A2	A4	A2	A4
DM2	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM3	A3	A3	A5	A4	A2	A5	A1	A2	A4	A1
DM4	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM5	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM6	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM7	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM8	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2
DM9	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM10	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM11	A3	A3	A5	A5	A1	A1	A2	A4	A4	A2
DM12	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM13	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM14	A3	A3	A5	A5	A1	A1	A2	A4	A4	A2
DM15	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM16	A3	A3	A2	A4	A5	A2	A1	A5	A4	A1
DM17	A3	A3	A5	A5	A2	A5	A1	A2	A4	A1
DM18	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM19	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM20	A3	A3	A5	A5	A1	A4	A2	A1	A4	A2

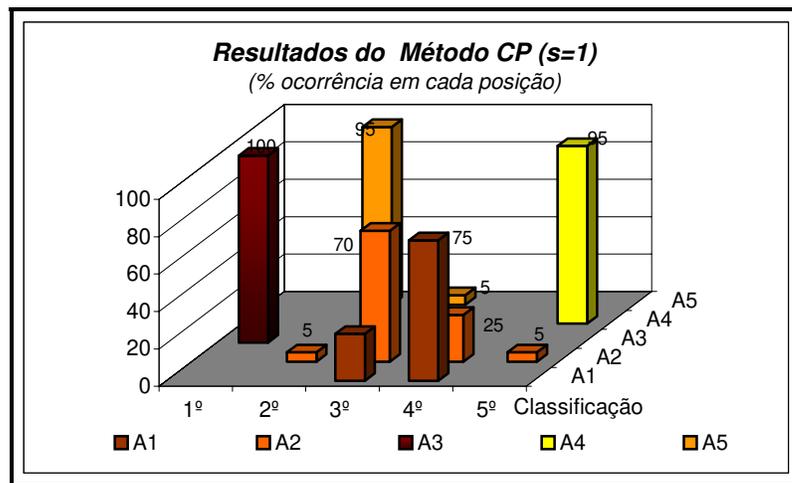


Figura 6.22: Hierarquização do método CP para a categoria “empresas de saneamento”

Tabela 6.29: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice

Decisores das empresas de abastecimento de água					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2	A4	A5	A1
DM2	A3	A2	A4	A5	A1
DM3	A3	A2	A5	A4	A1
DM4	A3	A2	A5	A4	A1
DM5	A3	A2	A4	A5	A1
DM6	A3	A2	A4	A5	A1
DM7	A3	A2	A4	A5	A1
DM8	A3	A2	A4	A5	A1
DM9	A3	A2	A4	A5	A1
DM10	A3	A2	A4	A5	A1
DM11	A3	A2	A4	A5	A1
DM12	A3	A2	A4	A5	A1
DM13	A3	A2	A4	A5	A1
DM14	A3	A2	A4	A5	A1
DM15	A3	A2	A4	A5	A1
DM16	A3	A2	A4	A5	A1
DM17	A3	A2	A4	A5	A1
DM18	A3	A2	A4	A5	A1
DM19	A3	A2	A4	A5	A1
DM20	A3	A2	A4	A5	A1

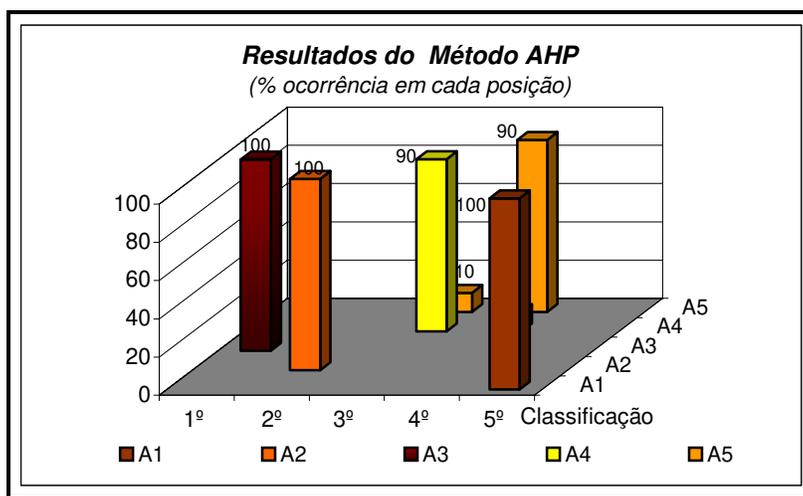


Figura 6.23: Hierarquização do modelo EC para a categoria “empresas de saneamento”

Tabela 6.30: Resultados da aplicação do método ELECTRE II

Especialistas das empresas prestadoras de serviços					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM2	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM3	A3	A2	A1 – A4 – A5		
DM4	A3	A2 – A4	A1 – A5		
DM5	A3	A2 – A4 – A5	A1		
DM6	A3 – A5	A2	A1 – A4		

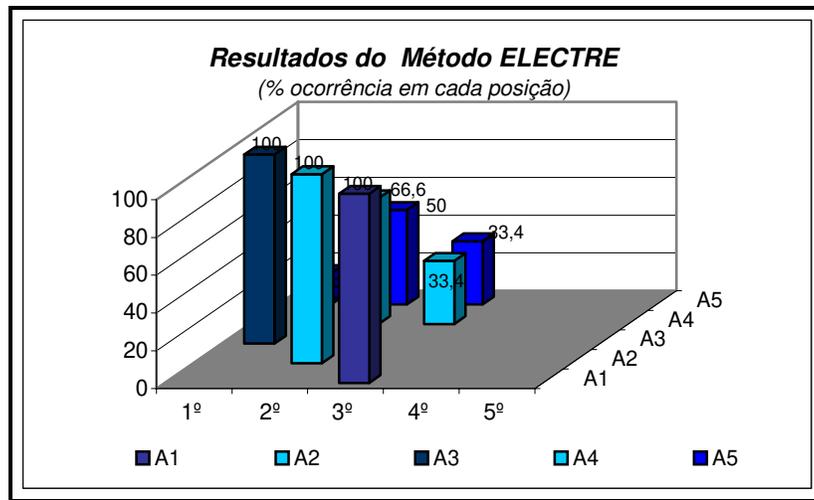


Figura 6.24: Hierarquização do método ELECTRE II para a categoria “empresas de prestadoras de serviços”

Tabela 6.31: Resultados da aplicação do modelo VIP

Especialistas das empresas prestadoras de serviços					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2	A5	A4	A1
DM2	A3	A2	A5	A4	A1
DM3	A3	A2	A5	A4	A1
DM4	A3	A2	A5	A4	A1
DM5	A3	A2	A5	A4	A1
DM6	A3	A2	A5	A4	A1

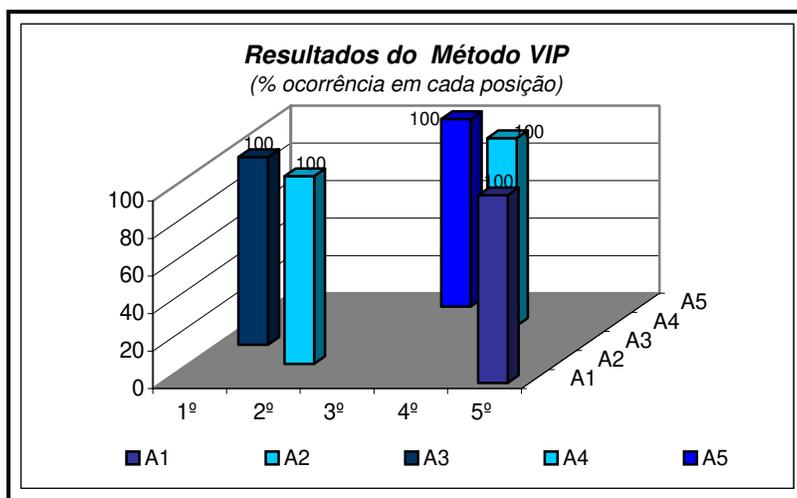


Figura 6.25: Hierarquização do modelo VIP para a categoria “empresas de prestadoras de serviços”

Tabela 6.32: Resultados da aplicação do método CP

Especialistas das empresas prestadoras de serviços										
Decisor	Classificação das Alternativas									
	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª	
	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2	S = 1	S = 2
DM1	A3	A3	A5	A4	A2	A5	A1	A2	A4	A1
DM2	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A1	A4	A2
DM3	A3	A3	A2	A4	A5	A5	A1	A2	A4	A1
DM4	A3	A3	A5	A4	A2	A5	A1	A2	A4	A1
DM5	A3	A3	A5	A5	A2	A4	A1	A2	A4	A1
DM6	A3	A3	A5	A4	A2	A5	A1	A2	A4	A1

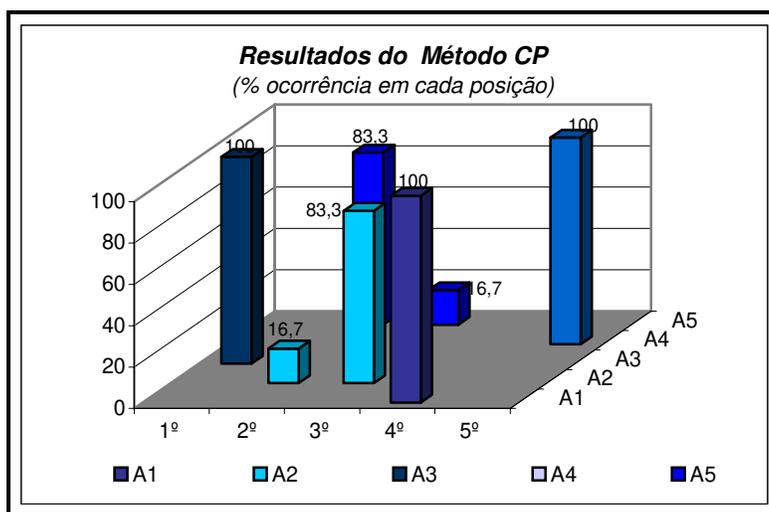


Figura 6.26: Hierarquização do método CP para a categoria “empresas de prestadoras de serviços”

Tabela 6.33: Resultados da aplicação do método AHP – Expert Choice

Especialistas das empresas prestadoras de serviços					
Decisor	Classificação das Alternativas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
DM1	A3	A2	A5	A4	A1
DM2	A3	A2	A5	A4	A1
DM3	A3	A2	A5	A4	A1
DM4	A3	A2	A5	A4	A1
DM5	A3	A2	A5	A4	A1
DM6	A3	A2	A5	A4	A1

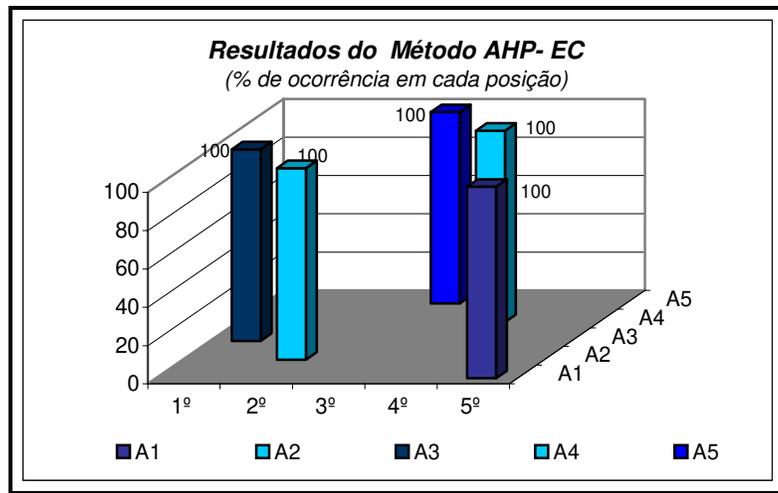
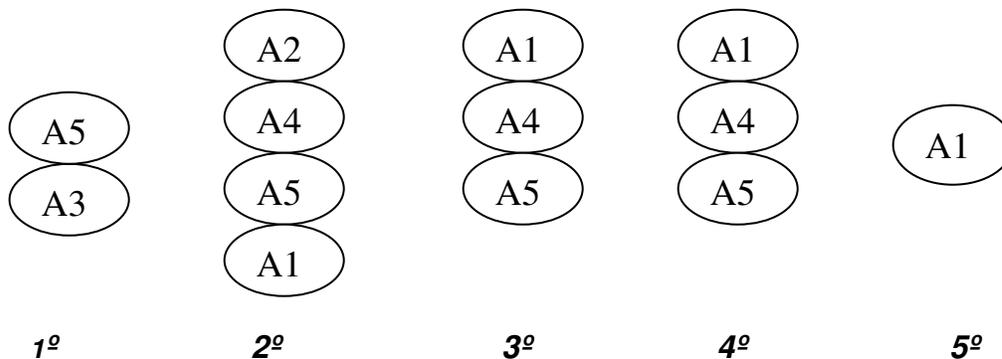


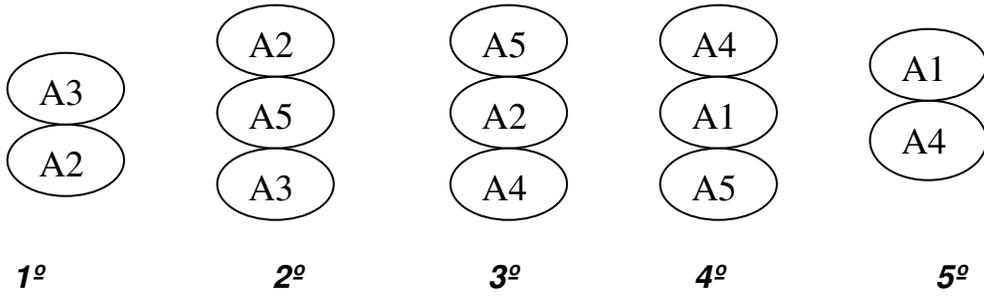
Figura 6.27: Hierarquização do modelo EC para a categoria “empresas de prestadoras de serviços”

A classificação geral das alternativas para os diferentes decisores é apresentada a seguir para os diferentes métodos:

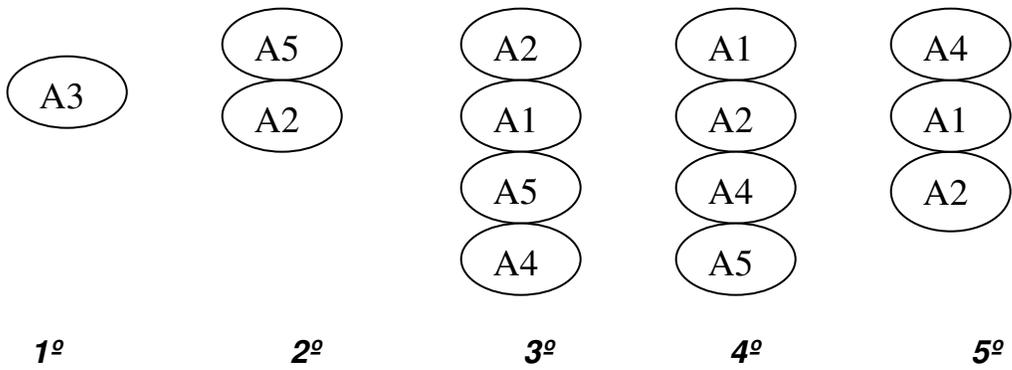
Método Electre II



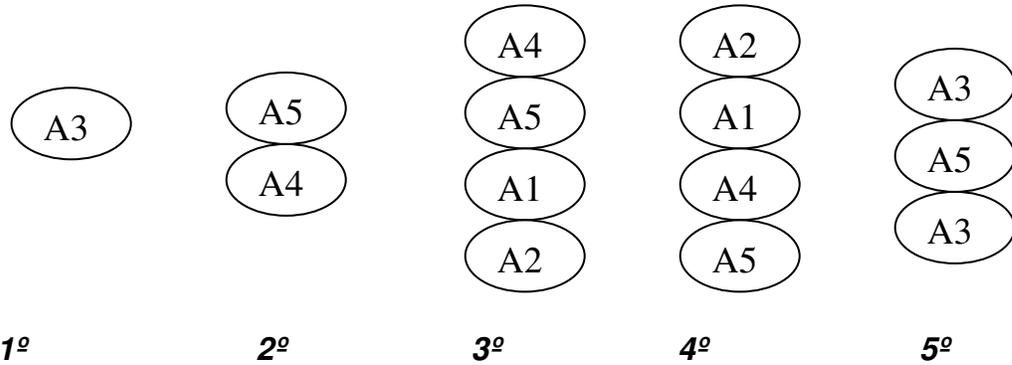
Método VIP



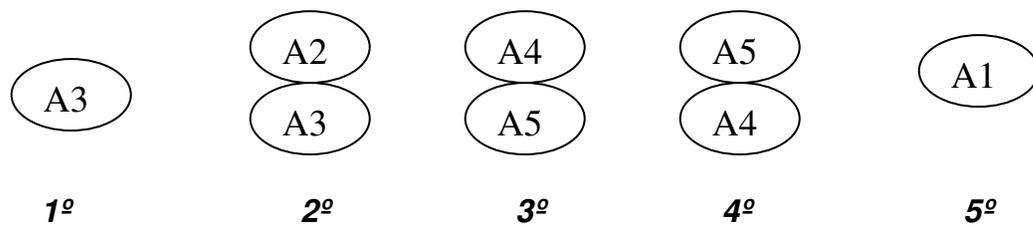
Método CP (s=1)



Método CP (s=2)



Método AHP



Na Tabela 6.34 podem ser visualizadas as percentagem que cada alternativa obteve durante a hierarquização da alternativa. Vários métodos apresentaram mais de uma alternativa como solução dentro do processo de hierarquização. A autora entende como vantagem dos métodos utilizados essa possibilidade de propor mais que uma alternativa durante o processo decisório, o que torna o processo mais flexível uma vez que “atende” às expectativas.

Tabela 6. 34: Classificação geral dos métodos multicriteriais

Classificação Geral versus Métodos Multicriteriais					
Classificação	ELECTRE II	VIP	CP		AHP
			S=1	S=2	
1º	100% A3 32,0% A5	97,0% A3 3,0% A2	100% A3	100% A3	100% A3
2º	100% A2 52,0% A4 46,0% A5 1,5% A1	92,3% A2 6,2% A5 1,5% A3	81,5% A5 18,5% A2	83,0% A5 17,0% A4	98,5% A2 1,5% A3
3º	84,4% A1 40,6% A4 18,5% A5	92,3% A5 6,2% A2 1,5% A4	50,7% A2 35,5% A1 12,3% A5 1,5% A4	60,0% A4 24,6% A5 7,7% A1 7,7% A2	63,0% A4 37,0% A5
4º	10,7% A1 3,0% A4 1,5 % A5	78,5 % A4 20,0% A1 1,5% A5	63,2% A1 33,8% A2 1,5% A4 1,5% A5	41,5% A2 40,0% A1 12,3% A4 6,2% A5	61,5% A5 38,5% A4
5º	4,6% A1	81,5% A1 18,5% A4	97,0% A4 1,5% A1 1,5% A2	52,4% A1 43% A2 4,6% A4	100% A1

6.2. Alternativas de Reabilitação versus Critério Custo Direto

A título ilustrativo e, para efeito quantitativo sobre o valor da reabilitação proposta, adotou-se neste estudo, o valor médio dos serviços praticados pelas

empresas SABESP, SANASA e DMAE – Porto Alegre aos quais a autora teve acesso. A seguir são apresentados os custo direto de algumas alternativas que possibilitam a reabilitação do sistema.

Alternativa 1 (A1) – Substituição

A tubulação da rede hipotética é de ferro fundido. A alternativa proposta foi a substituição de 5300 metros de tubulações que apresentava alta índice de perda de carga, por uma nova tubulação de mesmo diâmetro em ferro fundido. Na Tabela 6.35 são apresentados os custo relativo a essa alternativa.

Tabela 6.35: Custo da substituição em ferro fundido

<i>Número Trecho</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>R\$/m</i>	<i>Total</i>
23	3650	250	742,00	2.708.300,00
4	1650	300	765,30	1.262.745,00
				3.971.045,00

Pensando em substituir a tubulação, a outra alternativa seria a de substituir os 5300 de tubulação de ferro fundido que apresenta problemas por tubulações de PEAD. Segundo, dados fornecidos pelo DMAE – Porto Alegre, essa troca é viável e aconselhável, uma vez que o PEAD tem preço mais competitivo que o ferro fundido, conforme apresentado na Tabela 6.36. Neste estudo, a mudança de material permitirá uma economia de 36,08%, além de trazer outros benefícios que foram comentados anteriormente, na revisão bibliográfica.

Tabela 6.36: Custo da substituição em PEAD

<i>Número Trecho</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>R\$/m</i>	<i>Total</i>
23	3650	250	460,18	1.679.657,00
4	1650	300	520,20	858.330,00
				2.537.987,00

Alternativa 2 (A2) – Limpeza

Limpeza da tubulação com a utilização de pigs. Na Tabela 6.37 são apresentados os custos dessa alternativa.

Tabela 6.37: Custo da limpeza nos trechos

<i>Número Trecho</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>R\$/m</i>	<i>Total</i>
23	3650	250	1,0	3650,00
4	1650	300	1,2	1980,00
				5630,00

Alternativa 3 (A3) – Limpeza e revestimento

Como a tubulação da rede hipotética é de ferro fundido e apresenta problemas de perda de carga principalmente nas saídas dos reservatórios. A alternativa proposta foi limpeza e revestimento de 1650 metros de tubulações. Neste caso, poderia ser aplicada à limpeza e revestimento de argamassa de cimento, argamassa acrílica ou resina de epóxica, que têm praticamente o mesmo custo. Na Tabela 6.38 são apresentados os custos médio relativo a essa alternativa, cobrado no mercado.

Tabela 6.38: Custo da limpeza e revestimento

<i>Número Trecho</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>R\$/m</i>	<i>Total</i>
04	1650	300	141,70	233.805,00
				233.805,00

Alternativa 5 (A5) – Fechamento das malhas

Durante a simulação verificou-se que a colocação de dois trechos de rede resolveria à curto prazo, o problema de pressão nos nós deficientes. Como comentado

anteriormente, a substituição de tubulação de ferro fundido por PEAD, traz uma economia considerável a empresa de saneamento, Então, optou-se pela instalação de 960 metros de tubulações de PEAD no fechamento de dois anéis que possibilitam o aumento de pressão na rede. Na Tabela 6.39 são apresentados os custo médio relativo a essa alternativa.

Tabela 6.39: Custo da colocação dos trechos em PEAD

<i>Número Trecho</i>	<i>Extensão (m)</i>	<i>Diâmetro (mm)</i>	<i>R\$/m</i>	<i>Total</i>
70	525	100	460,18	241.594,50
71	435	100	460,18	200.178,30
				441.772,80

6.2. 1. Análise dos Resultados

Todas as alternativas propostas atendem o quesito pressão e que as alternativas apresentam comportamentos muito semelhantes, conforme apresentados anteriormente na Figura 6.10. Portanto, vale ressaltar que as alternativas têm custos e vida útil diferentes, que devem ser considerados na escolha final da “melhor” alternativa de reabilitação.

Da análise dos resultados apresentados nas Tabelas 6.35, 6.36, 6.37, 6.38 e 6.39, observou-se que, o problema de reabilitação de redes hidráulicas não pode ser tratado com base numa análise pura de custo direto. A análise monocriterial aponta, para este estudo de caso, a alternativa A2, que tem pressão média nos nós em torno de 17 mca e o menor custo das alternativas de reabilitação, conforme apresentado na Figura 6.28.

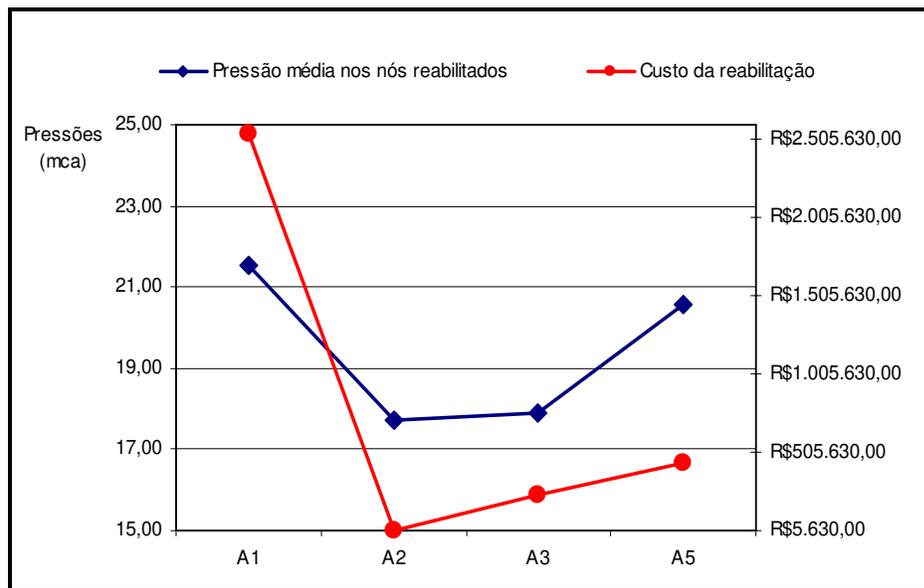


Figura 6.28: Análise de custos das alternativas propostas

Quando ponderada cada alternativa de reabilitação conclui-se que para a alternativa A1, o valor total do custo com a substituição é muito alto quando comparada as demais, o que não justificaria esse investimento, visto que, existe outras medidas que possibilitam a reabilitação do sistema com um investimento bem menor. Sem dúvida a substituição da tubulação trará problemas na execução, com o deslocamento de tráfego e pedestre, tempo de serviço, desabastecimento etc. mas, trará também benefícios tais como: a eliminação de reparos e manutenção a médio prazo e o aumento de pressão na rede.

A alternativa que representa o menor custo é a alternativa A2, que propõe a limpeza da tubulação em alguns trechos da rede. A desvantagem dessa alternativa reside no fato do processo ter que ser refeito periodicamente, o que aumenta os custos indiretos e ambientais, uma vez que, os números de descargas necessárias para a limpeza da rede é maior.

A limpeza e revestimento da tubulação num trecho de 1650 metros de tubulações adjacentes ao reservatório 1 é a alternativa A3. Essa medida garantirá uma

melhor performance ou desempenho dos demais trechos a jusante dos trechos reabilitados, uma vez que, ocorrerá uma redução significativa no valor da perda de carga.

Embora, o investimento necessário para implementar a alternativa A3 não seja exorbitante, o mesmo proporcionará o aumento a pressão nos nós deficientes e, aumentará a vida útil da tubulação de 40 a 60 anos, sem causar transtornos para os usuários do sistemas e os transeuntes, conforme comentado por vários autores durante a revisão bibliográfica na literatura. O mesmo não acontece com a alternativa A5, (construção de dois trechos de rede), que tem um custo elevado quando comparado ao benefício adquirido, visto que, as tubulações que apresentam altos índices de incrustação e, portanto, alto índice de perda de carga, continuaram seu processo exponencial de envelhecimento, o que não garante que essa alternativa consiga ser mantida a longo prazo além de causar transtornos para sua implementação.

A autora entende que é necessária a implantação de uma abordagem moderna de suporte à decisão pelas empresas de saneamento, que a análise multicriterial vem ao encontro a esta necessidade, ajudando a analisar simultaneamente critérios que os tomadores de decisão julgam importantes. Neste estudo de caso, em particular, a o uso de quatro modelos que utilizam a análise multicriterial apontaram a alternativa A3 como sendo a melhor alternativa para a reabilitação do sistema.

A autora acredita que, as técnicas de análise multiobjetivo ou multicritério apresentam pleno potencial como estrutura de apoio à tomada de decisão. A adequação destas técnicas é reforçada pela diversidade de objetivos que devem ser considerados nas decisões estratégicas de reabilitação de sistemas de abastecimento de água muitos dos quais não são passíveis de tradução em termos monetários.

6.2.2. Análise do Perfil dos Decisores

Com o intuito de traçar o perfil dos grupos de decisores pesquisados, foram analisado os pesos atribuídos a cada critério adotado, conforme Tabelas do anexo A. O autor tabelou os pesos segundo seu grau de importância durante a escolha de uma alternativa para a reabilitação do sistema. Desse modo, estabeleceu-se um critério auxiliar que pode ser visualizado na Tabela 6.40. A escolha da escala ordinal tem o propósito de estabelecer uma forma sistemática de analisar o grau de importância com relação ao critério analisado durante a tomada de decisão, pelos diferentes grupos de decisores pesquisados.

Tabela 6.40: Pesos atribuídos X grau de importância

Intervalo de Pesos	Grau de Importância
1,0 - 2,0	Irrelevante
3,0 - 4,0	Pequena Importância
5,0 - 6,0	Importância Moderada
7,0 - 8,0	Importante
9,0 - 10,0	Muito Importante

De posse das notas atribuídas, estabeleceu-se por grupo pesquisado, o grau de importância de cada critério. Os resultados obtidos da análise podem ser observados na Tabela 6.41.

6.2.2.1 Conclusão sobre o Julgamento dos Decisores

Da análise dos pesos atribuídos pelos quatro grupos de decisores pesquisados foram extraídos os seguintes comentários:

Todos os grupos pesquisados julgaram importante o critério custo direto. Mas, na visão de 35% do grupo de consumidores do sistema e 45% dos decisores das empresas de saneamento, este critério foi considerado como muito importante, mostrando ser muito significativo na escolha da alternativa de reabilitação do sistema.

Quanto ao critério custo operacional, a análise mostrou que todos os grupos pesquisados têm uma grande preocupação com esse critério na escolha da alternativa de reabilitação. No grupo de consumidores, essa preocupação ficou bem evidenciada, pois 45% do grupo julgaram esse critério muito importante na escolha.

Na análise das notas dada ao critério custo de manutenção, verificou-se que, todos os grupos de decisores pesquisados têm preocupação com a manutenção realizada no sistema de abastecimento e consideram o critério como muito importante.

Na análise feita, notou-se que 35 % do grupo de consumidores e 50% do grupo dos decisores das empresas prestadoras de serviço consideram muito importante o critério custo indireto na escolha da alternativa de reabilitação. Mas, na visão de 55% dos decisores das empresas de saneamento esse critério representa importância moderada, ou seja, o risco de indenização, por danos causados pela medida reabilitadora aplicada, está prevista durante a escolha da alternativa.

O critério custos ambientais tem notas altas para todos os grupos pesquisados, na escolha da medida reabilitadora a ser adotada. No grupo de consumidores do sistema de abastecimento 70% das pessoas pesquisadas julgaram o critério como muito importante, evidenciando a preocupação de adotar medidas que não agridam, ou minimizem o impacto ao meio ambiente. Essa preocupação também representa o anseio de 60% do grupo de decisores das empresas de saneamento, que julgaram o critério como muito importante.

Com relação ao critério custo de capital observou-se que 60% dos decisores das empresas de saneamento julgaram o critério muito importante na escolha da

medida reabilitadora. Entretanto, para os decisores do grupo de empresas prestadoras de serviço, a análise comparativa em termos de custo-grau de comprometimento da receita da empresa é muito importante para 84% dos decisores pesquisados, pois considera a taxa de juros envolvida e o período de amortização do financiamento.

A melhoria que o sistema atingiu por meio da reabilitação adotada é considerada no critério eficiência. Embora, o critério eficiência traduza um anseio técnico, notou-se que não somente as empresas de saneamento estão preocupadas em obtê-lo, ou seja, 60% do grupo de consumidores do sistema de abastecimento consideram o critério muito importante na tomada de decisão perdendo somente para o grupo de decisores das empresas de saneamento que considerou 70%.

O tempo para reparar ou refazer o serviço é considerado no critério vida útil da solução da reabilitação. Analisando as notas atribuídas verificou-se que esse critério é muito importante para todos os grupos de decisores pesquisados. O estresse com os transtornos causados pelos freqüentes reparos no sistema pode justificar o grau de importância atribuído neste critério.

O tempo gasto na execução do serviço de reabilitação está relacionado com a medida adotada. Na análise desse critério, verificou-se que o 50% do grupo de consumidores do sistema de abastecimento considera o critério como muito importante, o que pode estar associado aos transtornos gerados pela falta de água nos estabelecimentos residenciais e comerciais. Para 30% do grupo de decisores das empresas de saneamento e 32% do grupo dos prestadores de serviço também consideram esse critério como muito importante, mostrando que parte dos decisores pesquisados tem a preocupação em colocar o sistema em operação o mais rápido possível, pois a arrecadação da empresa de saneamento está diretamente relacionada ao fornecimento de água.

Todos os grupos de decisores julgaram importante o critério flexibilidade do sistema de abastecimento, mas 68% dos decisores das empresas prestadoras de serviços julgaram o critério como muito importante.

Na visão de 100% dos decisores das empresas prestadoras de serviço julgaram ser muito importante o critério aceitabilidade. Segundo as empresas prestadoras de serviço, o planejamento e a implementação de um bom programa de relações com os consumidores é igualmente tão importante quanto o planejamento do trabalho real de limpeza e revestimento. Informações sobre a necessidade da medida a ser implementada, tempo de execução, etc são passadas aos consumidores a fim de aumentar o vínculo empresa-consumidor. Mas, as empresas de saneamento não têm a mesma preocupação com o critério aceitabilidade, e 65% dos decisores pesquisados julgaram o critério importante, o que identifica que medidas que causam transtornos para os consumidores poderão ser adotadas, principalmente, quando é feita uma análise custo/benefício.

O ambiente sócio econômico vem passando por transformações. A mudança de comportamento em todos os setores da sociedade tem contribuído para a formação de consumidores e cidadãos mais exigentes com relação aos serviços prestados. Embora todos os grupos pesquisados consideraram o critério muito importante na tomada de decisão, o grupo de consumidores do sistema de abastecimento foi o que atribui pesos altos, ou seja, 80% do grupo de consumidores julgaram o critério muito importante. A mudança de comportamento dos consumidores fez com que as empresas de saneamento passassem a se preocupar com a qualidade dos serviços prestados, enxergando os consumidores não mais como consumidores e sim como clientes exigentes e conhecedores de seus direitos.

Na análise das notas atribuída pelos decisores pesquisados, ficou evidenciada a preocupação de 40% dos decisores das empresas de saneamento e 50% das empresas prestadoras de serviços com relação ao critério imagem da empresa na tomada de decisão. Eles julgaram o critério imagem como muito importante isso identifica que, a projeção política associada à medida adotada, investimento com

marketing e propagandas são utilizadas pelas empresas com o intuito de fixar sua imagem e conquistar a confiança de seus consumidores. Embora haja essa preocupação por parte das empresas, verificou-se que, os consumidores não estão preocupados com a imagem que as empresas tentam passar e sim com a qualidade do serviço fornecido.

Tabela 6.41: Resumo do julgamento dos critérios pelos diferentes decisores

Crítérios	Decisores			
	Consumidores dos Sistemas	Acadêmicos e Especialistas	Empresas de Saneamento	Empresas Prest. de Serviços
Custos Direto	25% Importante 35% Muito Imp.	50% Importante 25% Muito Imp.	45% Importante 45% Muito Imp.	50% Imp.Moderada 50% Importante
Custos Operacionais	40% Importante 45% Muito Imp.	31% Importante 31% Muito Imp.	45% Importante 25% Muito Imp.	50% Imp.Moderada 50% Importante
Custos De Manutenção	50% Importante 45% Muito Imp.	52% Importante 26% Muito Imp.	55% Importante 40% Muito Imp.	50% Importante 50 % Muito Imp.
Custos Indiretos	35% Importante 35% Muito Imp.	26% Imp.Moderada 52% Importante	55% Imp.Moderada 35% Importante	50% Importante 50% Muito Imp.
Custos Sociais	35% Imp.Moderada 50% Importante	36% Importante 26% Muito Imp.	50% Importante 25% Muito Imp.	100% Muito Imp.
Custos Ambientais	25% Importante 70% Muito Imp.	36% Importante 46% Muito Imp.	25% Importante 60% Muito Imp.	50% Importante 50% Muito Imp.
Custos de Capital	40% Importante 30% Muito Imp.	57% Importante 26% Muito Imp.	20% Importante 60% Muito Imp.	84% Importante 16% Muito Imp.
Eficiência	20% Importante 60% Muito Imp.	31% Importante 26% Muito Imp.	30% Importante 70% Muito Imp.	68% Importante
Vida Útil da Reabilitação	35% Imp.Moderada 50% Muito Imp.	57% Importante 31% Muito Imp.	30% Importante 55% Muito Imp.	16% Importante 84% Muito Imp.
Tempo De Execução	40% Importante 40% Muito Imp.	31% Imp.Moderada 36% Importante	45% Importante 30% Muito Imp.	68% Importante 32% Muito Imp.
Flexibilidade	25% Imp.Moderada 55% Importante	20% Imp.Moderada 67% Importante	25% Imp.Moderada 50% Importante	68% Muito Imp.
Confiabilidade	25% Imp.Moderada 55% Muito Imp.	26% Importante 62% Muito Imp.	20% Importante 75% Muito Imp.	32% Importante 68% Muito Imp.
Aceitabilidade	25% Imp.Moderada 45% Importante	36% Imp.Moderada 31% Importante	65% Importante 15% Muito Imp.	100% Muito Imp.
Qualidade dos Serviços	10% Importante 80% Muito Imp.	52% Importante 48% Muito Imp.	15% Importante 75% Muito Imp.	50% Importante 50% Muito Imp.
Imagem	35% Imp.Moderada 35% Importante	36% Imp.Moderada 52% Importante	55% Importante 40% Muito Imp.	50% Importante 50% Muito Imp.

7. Conclusões

Foi proposta nesta tese uma metodologia de análise multicriterial para uso na etapa de planejamento da reabilitação de sistemas de abastecimento de água. A hipótese subjacente à proposição da investigação é que os sistemas em uso vêm apresentando progressiva deterioração físico-operacional que se traduz em degradação do nível de serviço e, ao mesmo tempo, necessidades de investimentos incrementais cada vez maiores para futura reabilitação. Assim, o trabalho de pesquisa pretendeu trazer as seguintes contribuições: (a) ressaltar a importância da reabilitação dos sistemas seja para a melhoria do nível de atendimento dos serviços, como para a preservação dos recursos hídricos; (b) apresentar tecnologias que permitem a reabilitação, no contexto nacional e internacional e, (c) propor o emprego de métodos multicriteriais no auxílio à tomada de decisão sobre a escolha da melhor alternativa para a reabilitação dos sistemas.

Da série de visitas técnicas a empresas de saneamento, realizadas com a finalidade de conhecer melhor os problemas relacionados à reabilitação. Estas visitas trouxeram muitos subsídios ao desenvolvimento e implementação da metodologia proposta. As entrevistas com gestores e os operadores das empresas de saneamento também permitiram conhecer a situação das mesmas destacando (a) a falta de conhecimento dos sistemas, devido a ausência e/ou a precariedade de banco de dados

cadastrais e técnicos; (b) baixo nível de capacitação dos operadores do sistema e (c) a inexistência de recursos financeiros próprios em quantidade suficiente que possibilitem investimento no setor. Como objetivos a serem alcançados pelas empresas pode-se destacar: a redução de perdas físicas (através da minimização das pressões nos nós); redução do custo de bombeamento (com a redução da rugosidade das tubulações); redução do número de rompimento das tubulações; redução do número de reclamações (desabastecimento ou degradação da qualidade da água fornecida). Algumas dessas questões foram estudadas na metodologia e fizeram parte das alternativas propostas para a reabilitação. As visitas de campo proporcionaram o entendimento não só das dificuldades operacionais enfrentadas bem como o acompanhamento e a visualização dos procedimentos inerentes às técnicas de reabilitação de tubulações.

Outra contribuição trazida por este trabalho de tese foi a revisão bibliográfica, realização de visitas técnicas a empresas, a apresentação e o detalhamento de várias técnicas não destrutivas que permitem a reabilitação dos sistemas de distribuição de água. A grande maioria das técnicas apresentadas neste trabalho estão consagradas nos países desenvolvidos, mas apresentam uma discreta utilização no Brasil.

Durante a revisão bibliográfica sobre o tema do trabalho confirmou-se a originalidade, relevância e oportunidade do mesmo, pois existem vários trabalhos que aplicam a análise multicriterial no planejamento de recursos hídricos, porém nenhum se aplica à reabilitação dos sistemas de abastecimento de água. Por isso, o trabalho buscou propor uma metodologia com o intuito de orientar e apoiar o processo de decisão, no sentido de torná-la uma atividade bem fundamentada em termos de planejamento. Até pouco tempo atrás, os processos de decisão fundamentavam-se somente nos variáveis passíveis de quantificação, não sendo considerado fatores de natureza qualitativa. Os valores sociais, políticos, ambientais e pessoais não eram considerados durante o processo de decisão, enfatizando-se as análises técnico-econômicas.

A metodologia adotada mostrou-se apropriada na resolução do problema de planejamento da reabilitação de sistemas de abastecimento de água, garantindo consistência no processo de incorporação da estrutura de preferência dos decisores e a coerência dos resultados, atestada pela proximidade das hierarquias geradas pelos quatros métodos multicriteriais.

A proposição da nova metodologia de análise e planejamento da reabilitação de sistemas de abastecimento de água desenvolvida na tese permitiu rever e identificar as alternativas técnicas disponíveis (reabilitação física), trabalhar com análise do desempenho hidráulico considerando simultaneamente cada possível intervenção no desempenho global da rede (reabilitação operacional sistêmica) e concluir com a etapa da análise multicriterial na seleção das alternativas para a solução do problema de reabilitação, assim caracterizando as principais contribuições da tese.

8. Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, A Evolução da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil, **Relatório de Gestão**, Edição Comemorativa do Dia Mundial da Água, 2001, CD-ROM.

ALEGRE, H., COELHO.S.T., **Rendimiento Hidráulico y Estrategias de Rehabilitación**, in: Mejora Del Rendimiento y De La Fiabilidad En Sistemas de Distribucion De Agua, (**curso dictado en la UMIP, noviembre, 1994**), vol.1, p. **343-363.,1995.**

ALFREDO, A. D., **Contribuição ao Estudo de Viabilidade e Seleção de Alternativas de Projeto de Obras Hidráulicas**. Dissertação de Mestrado, FEC, UNICAMP, Campinas, p. 102. 1997.

ALLAN, H. A., TSELENTIS, Y., AINSWORTH, K., A Guidance for Greek Municipal Water Enterprises on Introduction of New Technologies and Methodologies to Improve Network Management, **Water Supply**, Vol. 16, Nos 1/2, pp. 566-571, 1998.

ALLEANCE., **Água e Energia – Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Explorados nos Sistemas de Água Municipais**, p.159, 2002.

- ALPEROVITS, E., U.SHAMIR, Design of optimal distribution systems. **Water Resources Research**, v.13, n. 6, p. 855-900, 1977.
- ARAUJO, F. A. S., MONTENEGRO, S. M. G. L., **Avaliação de Perdas em Setor de Abastecimento de Água em Cruz de Rebouça, Município de Igarassu, Estado de Pernambuco**. Seminário: Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. João Pessoa, Paraíba, Junho, 2002. CD-ROM.
- AREGAI, T., FOGEL, M.M., DUCKSTEIN, L., Multicriterion Selection of Wastewater Management Alternatives. *Journal of Water Resources Planning and Management*. V14, n.4, 1988.
- ARTIMI, L., **Comunicação Pessoal**, Coordenador da Captação do Sistema de Abastecimento da SANASA – Campinas, Junho, 2002.
- AZEVEDO, L. G. T., SIMPSON, L. D., **Management of Water Resources** – Economic Notes. The World Bank, September, 1995, 42p.
- AZEVEDO NETO, J. M. et al. **Planejamento de Sistemas de Abastecimento de Água**. Universidade Federal do Paraná. 281p. 1973.
- AZEVEDO NETO, J. M. et al. **Projeto de Sistemas de Distribuição de Água**. Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e de Controle de Poluição das Águas, CETESB. São Paulo. 336p. 1975.
- BALL, K., **What You See is What You Get – Quality Assurance for Cleaned and Lined Water Main**, ACE 1992, Annual Conference Proceeding, pp.41-50,1992.
- BANA e COSTA C.A ., O que entender por tomada de decisão multicritério ou multiobjetivo? **Introdução à Abordagem Multicritério**. p.118-139, 1995 b.
- BANCO MUNDIAL., **Sistemas de Suporte à Decisão para Outorga de Direitos de Uso de Água no Brasil**. Série Água Brasil, 48p. Brasil, 2003.
- BARBOSA, P.S.F., Curso de Planejamento e Gerenciamento de Recursos Hídricos, **Introdução às Técnicas de Otimização e Simulação**, Escola Politécnica da USP, Outubro 1991.

- BARBOSA, P. S. F., **O Gerenciamento de Recursos Hídricos no Estado de São Paulo**. RAUSP – Revista de Administração. Vol. 32, n.1. janeiro/março 1997.
- BENAJOUN, J., et. al., Linear Programing with Multiple Objective Functions: Step Method (STEM), p.361, 1971.
- BOST, J. F., CHANTRE, P., LOWDEN, A., MUNKLEY, A., Technologies for Pipeline Rehabilitation: on Overview of Drinking Water Mains Rehabilitation, **Water Supply**, Vol. 12, Nos 3/4, Zurich, pp. 69-79, 1994.
- BOYD, G. et.al., Selecting Lead Pipe Rehabilitation and Replacement Technologies, **Journal AWWA**, July, 2001, pp. 74 – 87.
- BRAGA, JR. B.P.F., Análise Multiobjetivo, in: PORTO, R.L.L. **Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.361-356., 1997.
- BRAGA, B., GOBETTI, L., Análise Multiobjetivo, In: **Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Cap. 7, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, 1997, pp. 361 – 420.
- CANTOR, A. F. et al., Use of Polyphosphate in Corrosion Control, **Journal AWWA**, Vol. 92, p. 95-102, February, 2000.
- COIMBRA, M. C. M. et al., **Análise do custo X Benefício do Uso de Ortopolifosfatos no Combate à Água Vermelha e na Desincrustação das Redes de Distribuição**, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. VII-051. p. 1330-1336, Rio de Janeiro, 1999.
- COVAS, D.I. C., RAMOS, H. M., ALMEIDA, A. B. DE., **Caracterização do Fenômeno Hidráulico da Fuga. Uma Contribuição para um Melhor Controle de Fugas em Sistemas de Abastecimento de Água**, 4º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Coimbra, Portugal, Maio, 1999. 14p.
- DANTAS, M. P., GONÇALVES, E., MACHADO, M. R. **Setorização de Redes de Distribuição de Água e Controle de Pressão Voltados para o Controle de**

- Perdas**, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Rio de Janeiro, janeiro, 1999, v. II, 10p.
- DAVID, L., DUCKSTEIN, L., **Multicriterion Ranking of Alternative Long-rang Water Resource Systems**. Water Resources Bulletin, v12, n.4, 1976.
- DAY, M, D., **Balancing Needs, Growth & Infrastructure Rehabilitation**. Water Resources Infrastructure: Needs, Economics, and Financing. Forth Worth, TX, USA. April, pp. 88-91, 1990.
- DEB, A. K. **Water Distribution Infrastructure Analysis**. Proceedings of the 18 th Annual Conference and Symposium. New Orleans, LA. May, pp. 830-834, 1991.
- DIAS, L. C., CLÍMACO, J. N., **Additive Agregation with Variable Interdependent Parameters: the VIP Analysis Software**, University of Coimbra, School of Economics and INESC Coimbra, 18p. 1999.
- DUTTING, R. F., **Cleaning and Lining Water Mains in Place Water Works School**. New England Water Association, Februrary, 1968.
- DYACHKOV, A., Rehabilitation of the Water Distribution Network in the **City of Moscow**, **Water Supply**, Vol. 12, Nos 3/4, Zurich, pp. 89-94, 1994.
- EBNER, B. H., Cement-Mortar Lining, **AWWA**, Annual Conference Proceeding, pp. 121-129, 1993.
- ERICSSON, A. A., **Controle Automático de Sistemas Urbanos de Distribuição de Água**, Anais do 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Belém, setembro, 1989, v. II, p 3-18.
- FALCÃO, A. C. J, HELOU, L. C, ZAHED FILHO, K, **Desenvolvimento de um Software para Análise e Cadastro de Pedidos de Ligação de Água**, Anais do 15º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Belém, setembro, 1989, v. II, p 28-32.
- FERNANDES, D., **Comunicação Pessoal**, Engenheiro Civil, Niedung do Brasil Ltda, São Paulo, agosto, 2002.

- FLORES, V., **Comunicação Pessoal**, Engenheiro Civil – Divisão de Obras do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), Porto Alegre, Julho, 2003.
- FRANCATO, A. L., **Relatório Científico – FAPESP**, Projeto: Operação Multiobjetivo de Sistemas de Abastecimento de Água, Campinas, 88p.,1998.
- FRANCATO, A. L., **Otimização Multiobjetivo para a Operação de Sistemas Urbanos de Abastecimento de Água**, FEC, UNICAMP, Tese (Doutorado), 182p. 2002.
- FRICKE, G. T., NOUR, E. A. A, SINGER, E. M., **Análise Multicriterial da Bacia do Rio Piracicaba Através das Metodologias ELECTRE I e ELECTRE II**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiente, 15. Belém do Pará, 1989. V.II
- GERMANOPOULOS, G., JOWITT, P. W., Leakage reduction by excessive pressure minimisation in a water supply network. Proc. Inst. Of Civ. Engr., Pt. 2, No 87, 195-214, 1989
- GERMANOPOULOS, G., La Regulacion Optima de Valvulas en aras de Una Minimizacion de Fugas, in: **Mejora Del Rendimiento y De La Fiabilidad En Sistemas De Distribucion De Agua**, (curso dictado en la UMIP, noviembre, 1994), vol.1, p. 212-231.,1995.
- GLASBROOK, D. J., Application of GIS for Maintenance in Widespread Distribution Networks, **Water Supply**, Vol. 12, Nos 3/4, Zurich, pp. 119-138, 1994.
- GOBBETTI L. C., BARROS, M. T. L., Análise Multiobjetivo Aplicada aos Sistemas de Recursos Hídricos. **Revista Latino Americana de Hidráulica**. São Paulo. N 9, pp 317-326, 1994.
- GOICOECHEA, A., HANSEN, D., DUCKSTEM, L., **Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications**. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.519.
- GOULTER, I. C., Multi-objetive Optimization of Water Distribution Networks, in: **Civil Engineering Systems**, vol. 3, p. 222-231, 1986.

- GOULTER, I. C., Modelos Analíticos y de Simulación Para el Análisis de la Fiabilidad en Sistemas de Distribución de Agua. In: **Mejora Del Rendimiento y De La Fiabilidad En Sistemas De Distribucion De Agua**, (curso dictado en la UMIP, noviembre, 1994), vol.1, p.301-340.,1995.
- GOMES, L. F. A. M., MOREIRA, A. M. M., **Da Informação à Tomada de Decisão: Agregando Valor Através dos Métodos Multicritérios**, RECITEC, Vol. 2, Nº 2, Recife, 1998, pp. 117 –139.
- GONÇALVES, E., **Estudo Sobre Determinação de Perdas e Indicadores de Desempenho do Controle de Perdas na Distribuição de Água**. Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Belém, janeiro, 1999, v. II, p 1595-1604.
- GRAY, J. F., **Sliplining Verses Cement-Mortar Lining in Specialited Cases**, ACE 1992, Annual Conference Proceeding, pp.351-354,1992.
- HIRNER, W., Criteria for Planning and Establishing Priorities for Distribution Network Rehabilitation, **Water Supply**, Vol. 12, Nos 3/4, Zurich, pp. 43-58, 1994.
- HIRNER, W., ALEGRE, H., COELHO, S. T., **Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento: Conceitos Básicos, Terminologia e Indicadores de Desempenho**, 4º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Coimbra, Portugal, Maio, 1999. 15p.
- HOOGSTEEEN, K. J., **Basic Distribution System Maintenance**, AWWA 1993, Annual Conference and Exposition; Chicago, Illinois June 20-24 th.
- ISLEB, J. A., GRZYS, R. R., **The Use of Private Sector Techniques in Delivering a Municipal Water Supply Project in Sussex, Wisconsin**, AWWA 1999, Annual Conference and Exposition; Chicago, Illinois June 20-24 th, pp., 1999.
- JAAKO POYRY ENGENHARIA LTDA (JPE). Plano Diretor de Captação de Água para Abastecimento Público nas Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari. São Paulo, 1992, 212p.
- JARRIGE, P.A, Optimal control of Water Distribution Networks: Technical Survey and Pratical Applications, in: **Water Supply – State of Art and Future Trends**,

- pp. 319-339, ed. E. Cabrera and F. Martinez, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1993.
- JOWITT, P. W., XU, C., Optimal Valve Control in Water Distribution Networks, **Journal Water Resources Planning And Management.**, ASCE, 116 (4), pp. 455-472,1990.
- JOWITT, P., GERMANOPOULOS, G., Optimal Scheduling in Water-Supply Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v.118, n. 4, pp. 406-422, 1992.
- KIM, J. H., MAYS, L. W., **Optimal Rehabilitation Model for Water Distribution Systems**. Proceedings of the 20 th Anniversary Conference on Water Management in 90s. Seattle, WA, USA. May, 1990, pp.400-403.
- KIRMEYER, G. J., et al., **Lead Pipe Rehabilitation and Replacement Techniques**. AWWA Research Foundation and Water Works Association. Denver, CO. 233p. 2000.
- KRAMER, S. R., **Benefits of Using Trenchless Technology for Pipeline Installation and Rehabilitation**, ACE 1993, Annual Conference Proceeding., pp.63-77. 1993.
- KRAVOSAC, A. C. B., **A Automação de Processos em Instalações de Saneamento Básico Otimizado – Procedimentos de Operação para Redução dos Gastos com Energia Elétrica, Operação e Manutenção**, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Rio de Janeiro, janeiro, 1999, v. IV, p 2117-2134.
- LANSEY, K. L., MAYS, L. W., Optimization Model for Water Distribution System Design, **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, p. 1401-1418, 1989.
- LIMA, J. S., **Comunicação Pessoal**, Chefe da Divisão de Controle de Perdas, Departamento de Água e Esgoto de Jundiaí, São Paulo, outubro, 2002.

- LOESCH, C., HEIN, N., **Pesquisa Operacional, Fundamentos e Modelos**, Universidade Regional de Blumenau Ed. FURB, 269p.,1999.
- LUVIZOTTO JR. E., **Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador**, Tese (Doutorado), EPUSP, S. Paulo, p. 139. 1995.
- MANUAL OF WATER SUPPLY PRACTICES – M28, **Rehabilitation of Water Mains**, Second Edition, AWWA, 2001, p.59.
- MARTINS, A. W., IDE, C. N., GONDA, J., STEFFEN, J. L., **Vazamento em Adutoras de Ferro Fundido – Causa e Solução**, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Rio de Janeiro, janeiro, 1999, v. II, p 1526-1533.
- MCNEILL, L., EDWARDS, M., Iron Pipe Corrosion in Distribution Systems, **Journal AWWA**, July, 2001, pp. 88 – 100.
- MEICHES, L. A. M., **Controle de perdas em sistemas de Abastecimentos de Água**. Dissertação de Mestrado, EPUSP, S. Paulo, p.249. 1984.
- MICHALIK, P., Status and Rehabilitation of the Distribution Network in Dresden, **Water Supply**, Vol. 12, Nos 3/4, Zurich, pp. 81-87, 1994
- MINISTÉRIO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO. **Diagnóstico do Setor Saneamento: Estudo Econômico e Financeiro**. Brasília: MPO – Secretaria de Política Urbana. 251p. 1995.
- MINISTÉRIO PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO. **Demanda, Oferta e Necessidades dos Serviços de Saneamento**. Brasília: MPO – Secretaria de Política Urbana. 219p. 1995.
- O`DAY, D. K., **Water Main Rehabilitation Needs for 1990`s**. 1992 National Conference on Water Resources Planning and Management – Water Forum `92. Baltimore, MD, USA. August, 1992. p760-763.
- ORMSBEE, L., LANSEY, K.E., Optimal Control of Water Supply Pumping Systems, **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 2, p. 237-252,1994.

- PARDALOS, P. M., SISKOS, Y., ZOPOUNDIS, C., **Advances in Multicriteria Analysis. Non-convex optimization and its application**, Vol. 5, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 249, 1995.
- PARK, J. I., LAMBERT, J. H., HAIMES, Y.Y., Hydraulic Power Capacity of Water Distribution Networks in Uncertain Conditions of Deterioration. **Water Resources Research**. Vol. 34. N.º 12. p.3605-3614. December 1998.
- PRADO, F. R. L., ZAHED FILHO, K., HASSEGAWA, C. M., **Avaliação da Eficiência e Economicidade da Atual Reservação do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo**, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Rio de Janeiro, janeiro, 1999, v. III-003, 9p.
- RAY, C., MATTHEWS, P., Diagnosis Methods and Performance Indicators for Watermain Rehabilitation: Anglian Water's Experience, **Water Supply**, Vol. 14, Nos 3/4, pp. 347-358, 1996.
- REIS, L.F.R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H., Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm, **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.123 n. 06, 1997.
- RIGONATO, E., **Comunicação Pessoal**, Gerente do Setor de Manutenção de Válvulas, SANASA – Campinas, São Paulo, 2002.
- RODRIGUES, W., **Comunicação Pessoal**, Coordenador da Operação do Sistema de Abastecimento da SANASA – Campinas, Junho, 2000.
- RODRIGUES, W., **Comunicação Pessoal**, Coordenador da Operação do Sistema de Abastecimento da SANASA – Campinas, Março, 2001.
- ROY, B., **Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision**. Ed. Economia, Paris, 1985.
- ROY, B., **Decision science or decision-aid?** European Journal of Operational Research. V. 66 pp.184-203, 1993.

- SANTANA, G.C., **Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Abastecidos por Bombeamento e Reservatórios de Regularização**. Campinas: FEE, UNICAMP, Tese (Doutorado),179p.,1999.
- SANTOS, J., **Comunicação Pessoal**, Engenheiro da SANIT Engenharia Ltda, Março, 2002.
- SARZEDAS, G. L., RAMOS A. N., MATSUGUMA, S., **Pesquisa de Vazamentos ou Redução de Pressão? Como Investir na Redução de Perdas Físicas**, Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Rio de Janeiro, janeiro, 1999, v. II, p 1451-1461.
- SEDU/PR – PMSS., **Seminário sobre Programas de Redução de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água em Países da América Latina**, Fortaleza, Outubro, 2001, CD-ROM.
- SIMONOVIC, S. P., **A Systems Approach to Creative Water Resources Engineering**, Apostila do curso da técnica multiobjetiva, USP, p.109 São Paulo 1998.
- SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D., **An Analytical Approach to Scheduling Pipe Replacement**, J. Am. Water Assoc., 71(5) p. 248-258, 1979.
- SKARDA, B. C., Water Pipe Network – Future Strategy Detection and Prevention of External Corrosion in Zurich, **Water Supply**, Vol. 12, Nos 3/4, pp. 139-150, 1994.
- TARQUIM, A. J., DOWDY, J., Optimal Pump Operation in Water Distribution, **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, V. 115, N. 2, pp. 158-168, 1989.
- TEIXEIRA A. C., BARBOSA, P. S. F., Avaliação Multicriterial de Alternativas de Projetos de Barragens de Uso Múltiplos. In: **XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Recife, V. 3, pp73-77, 1995.
- TUCCI, C. E. M., Controle de Qualidade da Água de Áreas Urbanas, **Revista Informativa da Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, nº 2, pp. 19-20, julho, 2000.

- THODEN, W. A., **Main Line Valve Survey Results Valve Replacement and Rehabilitation Options**, pp. 435-467, 1993.
- TSUTIYA, M. T., Reservatório de Distribuição de Água: Principais Aspectos Hidráulicos Relacionados com a Saída de Água, **Revista Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, VII – 12, 1999.
- TSUTIYA, M. T., **Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água**, 1ª edição, ABES, São Paulo, 2001.
- VAIRAVAMOORTHY, K., LUMBERS J., Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control, **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, N. 11, pp 1146 – 1154, november, 1998.
- VENTURINI. M.A.A.G., **Contribuição ao Estudo da Otimização de Redes Hidráulicas Através de um Modelo de Programação Linear**. Campinas: FEC, UNICAMP, Dissertação de Mestrado, 97p., 1997.
- VINCKE. P., **Analysis of Multicriteria Decision Aid in Europe**. V. 25, pp 160-168, 1986.
- ZAHED FILHO, K., **Previsão de Demanda de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistema de Distribuição de Água**, Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo, 135p., 1990.
- ZELENY, M., **Multiple Criteria Decision Making**. McGraw-Hill Book Company. New York. 563 p., 1982.
- ZINGEREVITZ, I., **Comunicação Pessoal**, Diretor da ERCON Engenharia Ltda, Março, 2002.
- ZUFFO, A. C., **Seleção e Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento Ambiental de Recursos Hídricos**, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 302p, 1998.
- ZUFFO, A. C., et.al., Aplicação de Métodos Multicriteriais ao Planejamento de Recursos Hídricos, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 7, N°1, Janeiro/Março, 2002, pp.

- WALSKI, T. M., PELLICCIA, A., Economic Analysis of Water Main Breaks, **Journal AWWA – Research and Technology**, March, 1982, pp.140 – 147.
- WALSKI, T. M., Cleaning and Lining Versus Parallel Mains, **Journal of water Resources Planning and Management**, Vol. 111, Nº 1, January, 1985, pp. 43 – 53.
- _____, “Making Water System Rehabilitation Decisions” **Water Forum `86´**, ASCE, New York, N.Y., 1986. pp.467-474.
- _____, **Water Supply System Rehabilitation**, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y., 328p., 1987.
- WOODBRUM, J., LANSEY, K., MAYS, L. W., **Model for the Optimal Rehabilitation and Replacement of Water Distribution System Components**. National Conference on Hydraulic Engineering. New York, N.Y., 1987. p.606-611.
- WOODFALL, I. M., **Rehabilitation of a 48 Inch Steel Water Main**, AWWA 1993, Annual Conference and Exposition; Chicago, Illinois, June 20-24 th, p. 749 - 773.
- WORK BANK, **Project Appraisal Document on the Proposed Loan in the Amount of US\$ 150 Million to the Federative Republic of Brazil for the Second Water Sector Modernization Project – PMSS II** , 82p. 1998.
- YACH, R., Mexico City Pipeline Rehabilitation Project Saves Water, Revista: **W&WI**, June 2000, p 8 - 13.
- YAMADA, M., **Comunicação Pessoal**, Engenheiro Civil, Sanear Engenharia e Construção Ltda, São Paulo, agosto, 2002.

ANEXOS A

Prezado(a) Senhor(a),

Solicitamos a colaboração de V. Sa. no tocante ao preenchimento de um questionário que tem por finalidade ponderar os critérios adotados em um estudo de Alternativas de Reabilitação dos Sistemas de Abastecimento de Água. Este questionário faz parte de um projeto de pesquisa de doutoramento em Recursos Hídricos e está sendo desenvolvido na Universidade Estadual de Campinas.

O ambiente sócio econômico passa por crescentes transformações. As pessoas têm criado novos hábitos, preferências e comportamento em todos os setores da sociedade, tornando-se conhecedoras das mudanças políticas, sociais e tecnológicas o que tem contribuído para a formação de consumidores, trabalhadores e cidadãos mais exigentes. Até poucos anos atrás, os processos de tomada de decisão fundamentavam-se em processos quantificáveis, e os valores sociais, ambientais, políticos e pessoais não eram considerados na tomada de decisão. A partir destas considerações, sentimos a necessidade de incorporar ao processo decisório alguns outros fatores que consideramos importantes na tomada de decisão.

Por isso, a contribuição de V. Sa. será muito importante para que possamos atribuir uma boa ponderação a cada um dos critérios considerados. Essa avaliação representará o grau de importância que cada critério tem sobre os demais na opinião dos diversos especialistas consultados. O estudo corresponde a uma avaliação técnica para análise de alternativas de reabilitação de sistemas de abastecimento de água, visando a melhoria dos serviços prestados aos consumidores de uma cidade, tomada como de médio porte neste estudo.

A título de situar o decisor será descrito resumidamente o cenário em estudo. Trata-se de uma cidade de porte médio, com 250 anos de idade e 400 mil habitantes. A cidade possui monumentos históricos em sua área central e tem regiões comerciais, industriais e a residenciais bem definidas. Na área central da cidade, onde está localizada a área comercial, o sistema de distribuição de água começou apresentar problemas como rompimentos, falta de pressão na rede, água suja, etc., com uma certa frequência, sendo necessária intervenção com medidas que o reabilitem novamente. É conveniente destacar que neste local há um grande fluxo de pessoas e veículos transitando diariamente.

Instrução para o preenchimento da Tabela 01

1. São apresentados a seguir, uma tabela que contém os critérios e informações que julgamos oportunos para a construção das matrizes a serem adotadas nos métodos de tomada de decisão.
2. As células devem ser preenchidas com um valor contido no intervalo de 1 a 10, que melhor represente sua opinião sobre a importância relativa de cada critério, ou seja, os critérios menos relevantes na tomada de decisão devem receber notas baixas e os critérios mais relevantes recebam notas altas.
3. Se desejar fazer algum comentário ou dar sugestões poderá utilizar o espaço em branco da tabela.

Certo de contar com a sua colaboração, antecipadamente agradecemos:

M. Sc Maria Alice A. G. Venturini e Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa

<i>Cr�terios</i>	<i>Descri�o do Crit�rio</i>	<i>Nota</i> 1 - 10
Custos Diretos	S�o os valores gastos com material empregado, m�o de obra elabora�o do projeto t�cnico e demais servi�os.	
Custos Operacionais	Quantifica o custo de energia el�trica e da equipe operacional necess�ria para a implanta�o da medida escolhida.	
Custos com Manuten�o	Refere-se ao tempo gasto durante a execu�o da alternativa escolhida, quantificando o tempo que o sistema fica fora de opera�o para a realiza�o do servi�o e ou tempo de reincid�ncia do servi�o.	
Custos Indiretos	S�o os custos relativos a reformas de patrim�nios prejudicados, indeniza�es por danos causados a estabelecimentos residenciais, comerciais ou industriais.	
Custos Sociais	Considera os prej�zos sociais provocado pela medida adotada tais como; transtornos no tr�nsito devido a interrup�es parcial ou total das ruas, aumento no tempo gasto no deslocamento gerando aumento de combust�vel, interrup�es das cal�adas e vias p�blicas dificultando o acesso a �reas comerciais e aumento do estresse na comunidade local.	
Custos Ambientais	Refere-se ao impacto ambiental em rela�o a medida adotada. Avalia os aspectos negativos , principalmente os danos ambientais ocasionados por fatores diretos e indiretos � medida tais como: aumento de despejos de produtos qu�micos nos rios, polui�o sonora, polui�o do ar, polui�o do solo e etc. Considera o custo com a recupera�o de �reas degradadas e a�es mitigadoras no reparo de danos ambientais.	
Custos de Capital	Refere-se a quantifica�o econ�mica da medida adotada. � feita an�lise comparativa em termos de custo / grau de comprometimento da receita da empresa, considerando as taxas de juros envolvidas e o per�odo de amortiza�o do financiamento.	
Efici�ncia	Refere-se a um indicador que expressa em termos percentuais a melhoria que o sistema atingiu por meio da medida adotada reduzindo diretamente os custos envolvidos na opera�o do sistema e/ ou permitindo maior flexibilidade na opera�o do mesmo.	
Vida �til da Solu�o de Reabilita�o	Considera o tempo em anos que a medida adotada � eficiente na resolu�o do problema.	
Tempo de Execu�o	Refere-se ao tempo gasto na execu�o do servi�o. Conforme a medida adotada, o tempo de execu�o representa horas, semanas ou at� meses para a conclus�o.	
Flexibilidade	Expressa o grau de flexibilidade proporcionado pela medida adotada em rela�o as outras medidas vi�veis para a resolu�o do problema.	
Confiabilidade	Expressa o grau de seguran�a na t�cnica a ser empregada e ou servi�os adotados para a reabilita�o do sistema , em fun�o do hist�rico de solu�es comprovadamente eficazes.	
Aceitabilidade	Expressa o grau de sacrif�cio para a implanta�o da medida adotada em termos de tempo gasto na execu�o considerando tamb�m os transtornos causados durante a execu�o da medida.	
Qualidade dos Servi�os	Refere-se a um indicador que expressa a percep�o do consumidor e termos percentuais a qualidade do servi�o de �gua, vaz�o, press�o, qualidade da �gua servida, regularidade no abastecimento e etc., em decorr�ncia da medida adotada.	
Imagem	H� preocupa�o com a proje�o pol�tica associada � medida adotada. Medidas como investimentos na cultura de manuten�o dos equipamentos dentro do sistema de abastecimento de �gua e investimento em marketing ambiental.	
Sugest�es	_____ _____ _____	

Tabela 1: Notas atribuídas aos critérios pelos consumidores de sistemas de abastecimento de água

Consumidores																				
Critérios	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9	DM10	DM11	DM12	DM13	DM14	DM15	DM16	DM17	DM18	DM19	DM20
C1	1	3	4	4	10	2	8	6	8	10	6	6	9	7	9	8	9	10	7	10
C2	10	5	7	5	10	2	8	8	8	9	8	7	10	7	9	9	9	9	8	10
C3	9	8	9	7	10	3	10	8	8	9	10	7	8	9	7	8	9	7	9	8
C4	9	10	10	10	10	10	9	5	6	8	5	7	7	7	6	7	7	6	8	5
C5	10	8	10	9	5	10	10	9	6	10	5	6	8	10	5	6	9	7	9	5
C6	10	8	10	9	4	10	10	10	9	7	10	10	10	10	9	9	7	8	10	8
C7	9	8	8	8	5	4	8	5	6	10	10	7	9	5	8	8	10	7	9	5
C8	10	10	8	9	5	5	9	6	7	8	10	9	9	10	8	9	10	5	9	10
C9	10	9	9	9	5	6	5	5	6	6	5	10	9	10	8	9	8	4	9	10
C10	9	9	10	9	3	7	10	8	8	8	10	8	8	6	5	9	9	2	8	8
C11	8	9	8	8	5	5	7	5	6	8	10	8	8	5	7	8	8	1	9	8
C12	10	10	10	10	5	5	7	6	5	6	10	10	9	10	8	10	10	8	7	10
C13	9	6	2	5	4	5	9	8	5	8	7	7	8	5	7	8	9	8	8	10
C14	10	9	10	10	5	10	9	8	8	9	10	9	9	10	10	9	9	5	10	10
C15	9	8	9	8	2	2	9	7	4	5	9	6	9	7	6	8	5	8	6	8

C1: Custos Direto
 C2: Custos Operacionais
 C3: Custos de Manutenções
 C4: Custos Indiretos
 C5: Custos Sociais
 C6: Custos Ambientais
 C7: Custos de Capital

C9: Vida Útil da Reabilitação
 C10: Tempo de Execução
 C11: Flexibilidade
 C12: Confiabilidade
 C13: Aceitabilidade
 C14: Qualidade dos Serviços
 C15: Imagem

Tabela 2: Notas atribuídas aos critérios pelos acadêmicos que atuam na área de recursos hídricos

Acadêmicos																			
Critérios	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9	DM10	DM11	DM12	DM13	DM14	DM15	DM16	DM17	DM18	DM19
C1	8	7	9	10	8	9	3	6	7	8	8	10	6	7	8	7	6	10	7
C2	9	10	10	10	5	9	4	6	5	7	8	6	4	6	7	8	8	7	8
C3	8	10	8	10	4	9	8	8	7	6	6	10	7	5	8	8	8	8	7
C4	9	7	8	7	7	8	8	6	7	6	7	6	6	3	7	6	10	6	7
C5	10	5	6	7	5	9	3	10	5	8	5	8	8	3	7	7	10	10	9
C6	10	7	6	8	8	10	10	10	7	9	5	9	7	4	9	8	10	8	9
C7	9	7	7	7	5	9	8	7	10	7	8	10	4	5	8	7	7	7	6
C8	9	10	9	7	8	8	10	10	10	8	9	10	8	6	9	10	10	9	8
C9	9	5	7	7	7	8	10	5	10	9	9	8	7	7	7	7	7	7	6
C10	8	5	3	8	3	7	3	3	7	9	6	9	6	5	7	7	8	5	5
C11	7	9	2	7	5	8	5	7	7	8	6	8	5	7	8	8	8	8	6
C12	9	10	7	7	6	9	9	7	10	10	9	8	6	9	10	9	8	10	9
C13	9	8	5	6	4	6	7	6	7	10	6	7	6	6	7	8	9	3	6
C14	8	10	8	7	8	7	8	8	10	10	9	9	9	8	8	9	10	8	7
C15	7	5	7	1	5	7	7	6	7	8	7	7	5	4	7	6	7	5	7

C1: Custos Direto
 C2: Custos Operacionais
 C3: Custos de Manutenções
 C4: Custos Indiretos
 C5: Custos Sociais
 C6: Custos Ambientais
 C7: Custos de Capital
 C8: Eficiência

C9: Vida Útil da Reabilitação
 C10: Tempo de Execução
 C11: Flexibilidade
 C12: Confiabilidade
 C13: Aceitabilidade
 C14: Qualidade dos Serviços
 C15: Imagem

Tabela 3: Notas atribuídas aos critérios pelos decisores das empresas de saneamento

Empresas de Abastecimento de Água																				
Critérios	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9	DM10	DM11	DM12	DM13	DM14	DM15	DM16	DM17	DM18	DM19	DM20
C1	5	10	8	7	7	10	8	10	8	9	10	9	7	7	10	10	8	8	9	2
C2	7	10	3	7	4	10	8	6	6	7	9	9	6	7	8	8	6	8	9	8
C3	9	10	8	8	9	10	8	5	6	7	9	9	9	10	8	7	7	8	8	7
C4	7	10	7	9	8	8	8	7	8	6	5	7	6	5	9	8	5	7	8	5
C5	3	7	6	7	6	8	10	1	7	7	3	7	8	10	6	10	7	7	8	9
C6	7	10	9	8	9	10	9	10	10	6	5	10	6	7	10	10	8	9	6	7
C7	9	8	10	10	9	10	10	10	7	5	7	6	6	3	10	10	6	9	10	8
C8	9	10	10	10	9	10	10	10	10	8	10	10	8	10	8	8	7	10	9	7
C9	9	10	9	9	8	9	7	5	9	8	5	9	6	10	6	8	7	10	9	9
C10	5	10	10	8	9	9	8	4	5	7	3	9	8	6	8	7	7	8	9	8
C11	2	8	10	9	8	8	8	8	9	4	2	7	5	5	8	5	7	7	7	5
C12	9	10	10	10	9	10	10	8	10	9	5	8	9	10	10	10	8	9	8	10
C13	4	7	7	7	7	8	10	3	9	8	2	8	7	8	6	10	8	8	8	8
C14	9	10	7	5	6	9	10	10	10	9	9	10	10	8	10	9	7	10	9	10
C15	6	6	7	5	6	8	7	6	8	6	8	7	5	7	10	7	6	7	8	8

C1: Custos Direto
 C2: Custos Operacionais
 C3: Custos de Manutenções
 C4: Custos Indiretos
 C5: Custos Sociais
 C6: Custos Ambientais
 C7: Custos de Capital
 C8: Eficiência

C9: Vida Útil da Reabilitação
 C10: Tempo de Execução
 C11: Flexibilidade
 C12: Confiabilidade
 C13: Aceitabilidade
 C14: Qualidade dos Serviços
 C15: Imagem

Tabela 4: Notas atribuídas por profissionais de serviços

Empresas Prestadoras de Serviços						
Critérios	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6
C1	6	7	7	5	6	7
C2	8	6	6	7	8	6
C3	8	8	10	8	9	10
C4	9	10	8	9	8	8
C5	9	10	10	10	9	10
C6	9	8	10	8	8	10
C7	8	8	7	7	8	9
C8	7	10	7	6	7	8
C9	10	9	9	10	8	9
C10	10	8	7	8	7	10
C11	9	10	6	9	10	7
C12	8	10	9	9	8	10
C13	9	10	10	9	10	9
C14	9	10	7	8	8	9
C15	9	10	8	9	8	8

- C1: Custos Direto
- C2: Custos Operacionais
- C3: Custos de Manutenções
- C4: Custos Indiretos
- C5: Custos Sociais
- C6: Custos Ambientais
- C7: Custos de Capital