

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE SETORIZAÇÃO PARA MANOBRA EM REDE
DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA BASEADO NAS
CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES CONSUMIDORAS.**

TESE SUBMETIDA À UFPE

PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR
POR

MARCELE ELISA FONTANA

Orientador: Prof.^a Danielle Costa Morais, DSc.

RECIFE, JUNHO / 2012

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

F679m

Fontana, Marcele Elisa.

Modelo de setorização para manobra em rede de distribuição de água baseado nas características das unidades consumidoras. / Marcele Elisa Fontana. - Recife: O Autor, 2012.

101 folhas; il., tabs.

Orientadora: Prof^a. Danielle Costa Morais.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2012.

Inclui Referências.

1. Engenharia de produção. 2. Manutenção de redes de distribuição de água. 3. Válvulas de fechamento. 4. Método de agregação multicritério. I. Morais, Danielle Costa. (Orientadora). II. Título.

658.5 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG/2012-189



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE TESE DE
DOUTORADO DE

MARCELE ELISA FONTANA

*“MODELO DE SETORIZAÇÃO PARA MANOBRA EM REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA BASEADO NAS CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES CONSUMIDORAS”*

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera a candidata **MARCELE ELISA FONTANA APROVADA**.

Recife, 13 de junho de 2012.

Danielle Costa Moraes

Profª. DANIELLE COSTA MORAIS, Doutor (UFPE)

Adiel Teixeira de Almeida

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

Caroline Miranda

Profª. CAROLINE MARIA DE MIRANDA MOTA, Doutor (UFPE)

Tatiana Balbi Fraga

Profª. TATIANA BALBI FRAGA, Doutor (UFPE)

Sylvana Melo dos Santos

Profª. SYLVANA MELO DOS SANTOS, Doutor (UFPE)

*A meu esposo **Vilmar Santos Nepomuceno** por
todo apoio, amor, compreensão e pela
companhia ao longo da trajetória que me levou
à concretização deste sonho.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me conceder saúde para enfrentar todas as etapas de estudos e dedicação ao doutorado.

Em segundo lugar a professora *Danielle Costa Moraes*, orientadora, que além das valiosas contribuições aos meus estudos, também foi de grande apoio durante esta jornada.

A todos os professores do PPGEP que direta ou indiretamente contribuíram nas atividades do doutorado, em especial a banca avaliadora composta pelo professor Adiel Teixeira de Almeida e pela professora Caroline Mota que sempre foram prestativos com datas e com valiosas contribuições ao meu trabalho.

A coordenação e secretaria do PPGEP, que sempre, atenciosamente, auxiliaram nas resoluções de questões burocráticas e administrativas.

A CAPES e ao CNPQ pelas bolsas concedidas durante o período do doutorado, que custearam minha permanência na cidade do Recife.

A todos os meus amigos e familiares, em especial aos meus pais, *Inês Maria Fontana* e *Afonso Domingos Fontana*, pelo apoio, encorajamento, amor e pelos ensinamentos que formaram os alicerces de minha história. Também, um agradecimento especial a *Vilmar Santos Nepomuceno*, meu companheiro nos momentos mais difíceis, que positivamente me ajudou, incentivou e apoiou nesta jornada.

“Tudo é ousado para quem a nada se atreve.”

Fernando Pessoa

RESUMO

Devido ao envelhecimento e depreciação dos componentes de uma rede de distribuição de água é comum ocorrerem vazamentos e rupturas na rede, ocasionando perdas e podendo acarretar a contaminação da água e descontinuidade no seu fornecimento pela interrupção do abastecimento de água durante a reparação da infraestrutura, bem como a redução da água disponível no sistema, gerando a insatisfação dos seus usuários. Nestes casos, a setorização da rede torna mais fácil qualquer atividade de manutenção, além de atingir um menor número de unidades consumidoras pela interrupção do abastecimento. Porém, além do elevado custo da alocação de válvulas de fechamento, as Normas Brasileiras sobre setorização das redes dizem respeito apenas a questões técnicas que devem ser obedecidas pelos setores de manobra. Portanto, um modelo de setorização de manobra que leva em consideração as características das unidades consumidoras é proposto. Com ele pretende-se uma setorização que respeite as restrições previstas por lei, busque a maximização dos benefícios gerados pela setorização às unidades consumidoras e a minimização do número de válvulas de fechamento necessárias, ou seja, dos custos. Para medir o impacto da falta de água é gerado um índice de priorização que agrega as características das unidades consumidoras por meio de um método de agregação multicritério, o SMARTER. As simulações realizadas mostram que apenas a alocação inicial das válvulas pela NBR 12218/94 não garante a maximização dos benefícios gerados pela setorização da rede aos usuários. Neste caso, com o modelo proposto pode-se encontrar soluções melhores.

Palavras-chave: Manutenção de redes de distribuição de água; Setor de manobra; Válvulas de fechamento; Características das unidades consumidoras; Método de agregação multicritério.

ABSTRACT

Due to aging and depreciation of the water distribution network components, leaks and ruptures are common on the water network. These cause the water loss, sometimes the water contamination and the discontinuity in water supply, due the supply interruption during the infrastructure repair, as well as reduction of available water in the system, causing the users' dissatisfaction. In these cases, network segmentation makes any maintenance activity easy and this achieves a smaller number of consuming units by water supply interruption. However, besides the high valves allocation cost, the Brazilian norms about network segmentation relate only technical issues that must be followed. Therefore, a network segmentation model, which takes into account the characteristics of consumer units, is proposed. It aims a network segmentation which complied the restrictions provided by law, it seeks the maximum benefit to consumer units, generated by the segmentation, and it seeks minimum number of valves required, i.e., the costs. To measure the impact on water lack is generated a priority index which adds the characteristics of consuming units via a multicriteria aggregation method, the SMARTER. The simulations realized showed that only the initial valves allocation, by the NBR 12218/94, does not guarantee the maximization of the benefits generated by the network segmentation for users. In this case, with the proposed model, better solutions can be found.

Keywords: Water distribution networks maintenance; Network segmentation; Valves; Characteristics of consumer units; multicriteria aggregation method.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE QUADROS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Justificativa	3
1.3. Metodologia	4
1.4. Estrutura do trabalho	4
2. BASE CONCEITUAL E REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1. Prestação de serviços em Sistema de Abastecimento de Água (SAA)	6
2.1.1. Componentes de um sistema de abastecimento de água	7
2.1.1.1. Componentes principais em redes de distribuição de água	8
2.2. Perdas de água no SAA	11
2.2.1. Perdas de água na rede de distribuição de água	13
2.2.1.1. Métodos de detecção e localização de vazamentos	16
2.2.1.2. Métodos de avaliação de perdas	18
2.2.1.3. Métodos de controle e monitoramento de vazamentos.....	19
2.2.1.4. Métodos de reabilitação da rede de distribuição	20
2.3. Manutenção em redes de distribuição de água	22
2.3.1. Setor de manobra	22
2.3.1.1. Válvulas de fechamento	24
2.3.1.1.1. Localização de válvulas de fechamento	25
2.3.1.1.2. Isolamento dos trechos de tubulação	25
2.4. Busca heurística em redes de distribuição de água	27
2.4.1. Algoritmos Genéticos (GAs)	28
2.5. Apoio multicritério a decisão	34
2.5.1. Problemática de ordenação	35
2.5.1.1. Método SMARTER	37
2.6. Síntese conclusiva	40
3. MODELO DE SETORIZAÇÃO PARA MANOBRA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	42
3.1. Modelo geral de setorização para manobra	42
3.1.1. Coleta de dados	44
3.1.2. Proposta de um índice de priorização	44
3.1.2.1. Levantamento das alternativas e critérios.....	45
3.1.2.2. Escolha do método multicritério	47
3.1.3. Modelo matemático para setorização da rede	49
3.1.3.1. Fluxo de água em setores de manobra.....	52
3.1.3.2. Cálculo da área dos trechos de tubulação	53
3.1.4. Análise do conjunto de soluções admissíveis	55
3.1.5. Trade-off entre custos e benefícios da setorização de manobra proposta.....	56
3.1.6. Decisão final	58
3.2. Algoritmo determinístico do modelo de setorização para manobra	58
3.3. Síntese conclusiva	61

4. APLICAÇÃO DO MODELO DE SETORIZAÇÃO PARA MANOBRA DESENVOLVIDO.....	62
4.1. Aplicação do SMARTER para a obtenção do índice de priorização	63
4.2. Aplicação do algoritmo determinístico do modelo proposto.....	66
4.3. Algoritmo Genético (GA) para setorização de manobra.....	71
4.3.1. Descrição do software desenvolvido.....	74
4.3.2. Aplicação do modelo desenvolvido com GA.....	74
4.3.2.1. Resultados	79
4.3.2.2. Análise dos resultados	82
4.3.3. Discussões da aplicabilidade do software	83
4.4. Síntese conclusiva.....	84
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	85
5.1. Vantagens	86
5.2. Limitações.....	87
5.3. Sugestões de trabalhos futuros	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Concepção de um sistema de abastecimento de água	7
Figura 2.2. Rede ramificada	10
Figura 2.3. Tipos de rede ramificada	11
Figura 2.4. Rede malhada	11
Figura 2.5. Ciclo de vida de um vazamento	16
Figura 2.6. Exemplo- Delimitação do setor de manobra	23
Figura 2.7. Esquema de isolamento para o trecho 1	27
Figura 2.8. Ilustração da busca da solução ótima em programação matemática	29
Figura 2.9. Esquema de um Algoritmo Genético	31
Figura 2.10. <i>Crossover</i> uniforme	32
Figura 2.11. Exemplo de ponto de corte com 1-partição	33
Figura 2.12. <i>Crossover</i> com 1-partição	33
Figura 2.13. <i>Crossover</i> com 2-partição	33
Figura 3.1. Sumarização geral do modelo de setorização	43
Figura 3.2. Sumarização da geração do índice de priorização	44
Figura 3.3. Ilustração para setorização	51
Figura 3.4. Fluxo de água em uma rede malhada	52
Figura 3.5. Cálculo da área da rede malhada	54
Figura 3.6. Cálculo da área da rede ramificada	55
Figura 3.7. Sumarização do algoritmo determinístico do modelo proposto	59
Figura 4.1. Ilustração da rede malhada para obtenção dos índices de priorização	63
Figura 4.2. Exemplo da localização das válvulas iniciais	67
Figura 4.3. Verificação do fluxo de água nos setores	67
Figura 4.4. Análise custo vs benefício	71
Figura 4.5. Exemplo de geração de novos cromossomos	72
Figura 4.6. Entrada de dados	75
Figura 4.7. Carregar dados de entrada	75
Figura 4.8. Mapa de interesse	76
Figura 4.9. Simulação da rede ramificada	76
Figura 4.10. Parâmetros do modelo	77
Figura 4.11. Output do modelo	79

Figura 4.12. Custo vs benefício: cenário '01'	81
Figura 4.13. Custo vs benefício: cenário '02'	81
Figura 4.14. Comparação entre as melhores soluções.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparativo do índice de perdas entre as capitais do Brasil em 2008	14
Tabela 2.2 – Exemplo de população vs aptidão	32
Tabela 3.1 - Classificação dos setores	45
Tabela 3.2 – Tarificação (em reais) por mês	46
Tabela 3.3 – Método compensatório <i>versus</i> não compensatório.....	48
Tabela 3.4 – Exemplo da geração dos valores dos trechos da tubulação	63
Tabela 3.5 – Matriz de avaliação das alternativas vs. critérios.....	64
Tabela 3.6 – Resultado final	66
Tabela 3.7 – Cálculo da área da rede malhada	54
Tabela 3.8 – Cálculo da área da rede ramificada.....	55
Tabela 4.1 – Exemplo: Aplicação do algoritmo do modelo de setorização de manobra em Rede malhada	66
Tabela 4.2 – Resumo das soluções possíveis adicionando 01 válvula- Rede malhada.....	68
Tabela 4.3 – Resumo das soluções possíveis adicionando 02 válvulas - Rede malhada	69
Tabela 4.4 – Resumo das melhores soluções por intervalo do parâmetro w	70
Tabela 4.5 – Análise custo vs benefício	70
Tabela 4.6 – Dados da simulação da rede ramificada	77
Tabela 4.7 – Soluções pelo software	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Componentes do balanço hídrico	12
Quadro 2.2 - Perdas físicas por subsistema - Origem e Magnitude	13
Quadro 2.3 – Nomenclatura em GAs	29

1. INTRODUÇÃO

O objetivo principal de todos os sistemas de distribuição de água é o fornecimento de água para atender à demanda. No entanto, um dos principais desafios para os gestores de abastecimento de água é a minimização das perdas de água causadas por vazamentos, principalmente decorrentes de problema de uma infraestrutura envelhecida. O controle de perdas tem se tornado de grande interesse mundial devido à crescente tendência internacional para a sustentabilidade, a eficiência econômica e a proteção do ambiente. No âmbito deste objetivo, um elevado investimento é realizado anualmente pelas companhias abastecedoras de água em detecção e reparos de vazamentos (CHRISTODOULOU & DELIGIANNI, 2010; DELGADO-GALVÁN *et al.*, 2010; KIM & MAYS, 1994; LAMBERT & HIRNER, 2002; MOUNCE *et al.*, 2010).

Em sistemas de abastecimento de água, do ponto de vista operacional, as perdas de água são relacionadas considerando os volumes não contabilizados. Esses englobam tanto as perdas físicas, que representam a parcela não consumida, como as perdas não físicas, que correspondem à água consumida e não registrada (MOURA *et al.*, 2004). Com um enfoque nas perdas físicas, na maioria dos casos, a maior parte da perda de água nos sistemas de abastecimento é através de vazamentos nas redes de distribuição (GEORGIA, 2007; ARREGUÍN-CORTES & OCHOA-ALEJO, 1997). Além disso, muitos sistemas de abastecimento de água vêm apresentando deficiências operacionais sejam pelo elevado incremento na demanda nos últimos anos seja pela falta de manutenção adequada.

Em geral, problemas de abastecimento de água envolvem a sociedade como um todo, não só por se tratar de um recurso escasso, mas pelo grau de importância que tem na vida das pessoas. Por este fato, decisões que envolvem a rede de distribuição de água têm um caráter social. Desta forma, segundo Morais & Almeida (2007) é necessário pesquisar as possíveis soluções para minimizar os problemas na rede, principalmente aqueles ligados a manutenção da rede de distribuição de água, através de uma gestão de perdas adequada. Pois, além dos motivos relatados e dos custos diretos associados, conforme afirmação de Ramos *et al.* (2001), a ocorrência de vazamentos na rede pode levar a redução da água disponível e até à interrupção do abastecimento de água durante a reparação da infraestrutura, gerando a insatisfação dos seus usuários.

Contudo, não é possível realizar uma manutenção eficiente sem uma alocação adequada de válvulas de fechamento. Elas são de grande interesse, pois determinam a extensão do isolamento necessário para as atividades de inspeção ou manutenção de parte do sistema (JUN

et al., 2007; OZGER & MAYS, 2004). Neste sentido, quanto menor a região isolada (setor de manobra), menor será o impacto gerado pelo desabastecimento de água, pois um menor número de unidades consumidoras será atingido.

Porém, a alocação de válvulas eleva substancialmente os custos às empresas abastecedoras de água, tanto pelo custo da implantação das válvulas quanto pela sua manutenção. Além disso, as Normas Brasileiras, que regem à setorização das redes de distribuição de água no Brasil, são insuficientes para a determinação ideal dos setores tendo em vista que não observam as características das unidades consumidoras. Por exemplo, a interrupção do abastecimento de água em um hospital não deveria ser encarada da mesma forma que o desabastecimento de duas ou três residências.

Assim, verifica-se a necessidade de se minimizar o uso de válvulas e ao mesmo tempo garantir um nível de desempenho, ou de benefício, adequado à população com a setorização da rede. Este benefício pode ser medido pelo número de setores gerados, pois, como mencionado anteriormente, quanto mais setorizada for uma rede, menos usuários serão impactados durante a interrupção do abastecimento. Contudo, principalmente em casos de extensas redes de distribuição de água, determinar este número mínimo de válvulas de fechamento e sua localização pode ser uma tarefa difícil, sem o auxílio de um modelo específico.

1.1. Objetivos

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um modelo de setorização de manobra que seja capaz de minimizar o número de válvulas de fechamento e, ao mesmo tempo, maximizar os benefícios gerados pela setorização, baseado nas características das unidades consumidoras. Sumariamente, para atingir o objetivo geral, os objetivos específicos a serem alcançados são:

- ✓ Proposição de um índice de priorização, que leve em consideração as características socioeconômicas dos trechos de tubulação da rede de distribuição, utilizando um método de agregação multicritério;
- ✓ Desenvolvimento do modelo de setorização para manobra, em que a função objetivo é minimizar o número de válvulas de fechamento, sujeito às restrições quanto ao tamanho do setor e a intensidade do impacto da falta da água, medido pelo índice de priorização. Quanto menor for esta intensidade máxima do impacto permitida, um maior número de setores para manobra serão gerados e maior será o benefício à

sociedade, porém maior será a necessidade de válvulas de fechamento e, conseqüentemente, o custo de alocação destas;

- ✓ Desenvolvimento de um *software* para implementação do modelo de setorização, baseado no Algoritmo Genético (GA);
- ✓ Aplicação do modelo por meio de simulação de pequenas redes com o *software* desenvolvido.

1.2. Justificativa

Conforme afirmação de Heller & Pádua (2006), a adequada concepção e delimitação dos setores de manobra, na elaboração de projetos de rede de distribuição de água, é encarada, comumente, como atividade marginal. Contudo, com a crescente preocupação do uso racional da água, os órgãos reguladores e financiadores vêm cobrando a redução de perdas de água em sistemas de abastecimento de água, em que a questão dos setores de manobra, inevitavelmente, passará a ser devidamente considerada na elaboração dos projetos e na construção das redes de distribuição. Isto porque, não é possível realizar um eficaz controle de perdas de água sem a existência de setores de manobra corretamente concebidos, implantados e operados.

Além disso, é importante que além de aspectos técnicos esta setorização considere características das unidades consumidoras para determinar a extensão dos setores, bem como a localização das válvulas de fechamento, pois, embora a falta de água gere problemas a qualquer usuário, existem aqueles em que este impacto tem maior gravidade, como por exemplo, um hospital. Assim, acredita-se que uma setorização da rede que leve em consideração as características das unidades consumidoras poderá minimizar problemas sociais gerados pelo desabastecimento durante uma manutenção.

Alguns autores já estudaram as conseqüências no déficit da demanda de água durante uma interrupção do abastecimento em redes de distribuição para determinação da localização ótima das válvulas de fechamento. Contudo, não foram encontrados estudos que utilizem outras características das unidades consumidoras, tal como o setor econômico que elas estão inseridas no município, para a setorização de rede. Tão pouco a geração destas características, por meio de uma abordagem multicritério, em um índice que consiga, assim, medir o impacto da falta de água nos setores para manobra.

1.3. Metodologia

A metodologia utilizada nesta pesquisa é descritiva e exploratória. A formulação do modelo matemático considera um modelo não linear. Os modelos não lineares, quando em problemas de maior complexidade, podem ficar presos em locais do espaço de soluções e não encontrar a solução ou levar muito tempo e esforço computacional. Assim, propõe-se a busca pela solução através de um Algoritmo Genético (GA).

Para a geração do índice que representará as características de cada trecho da tubulação, aqui denominado ‘*índice de priorização*’, é utilizada uma abordagem de agregação multicritério, o SMARTER.

Para estudar os processos em diferentes cenários, através da análise de comportamentos e de resultados virtuais, realiza-se a simulação para obtenção de respostas efetivas para a tomada de decisão em casos reais. Esta simulação é usada para verificar a aplicabilidade do modelo desenvolvido.

As ilustrações de redes deste trabalho foram realizadas com o auxílio do Software EPANET 2.0. (CESEC, 2010; ROSSMAN, 1994). Um software foi desenvolvido, por meio do programa NetBeans IDE, versão 6.8, para ilustrar o modelo de setorização de manobra proposto. A linguagem escolhida foi JAVA. Para o funcionamento do software é imprescindível a instalação do aplicativo JAVA, disponível gratuitamente pelo site: www.java.com.

1.4. Estrutura do trabalho

Além desta introdução, o trabalho é dividido em outras quatro partes principais. O Capítulo 2 traz um arcabouço da literatura dos temas gerais, como: sistema de abastecimento de água, perdas de água no sistema e metodologias já estudadas a respeito do tema “perdas de água”. Estas informações foram necessárias para o levantamento da problemática de setorização de manobra na realização de manutenção na gestão de perdas em redes de distribuição de água. Assim, outros conceitos importantes foram apresentados, tais como: uma descrição de setor para manobra, uma noção geral de métodos de agregação multicritério e Algoritmo Genético. Estes temas são importantes para o desenvolvimento do modelo proposto.

Na sequência (Capítulo 3), o modelo de setorização de manobra é desenvolvido. As normas previstas por lei, levantadas no Capítulo 2, são consideradas pelo modelo, bem como as características das unidades consumidoras atendidas pela rede. Para tanto, estas

características são levantadas e agregadas, pelo método multicritério SMARTER, em um índice de priorização, conforme proposta deste trabalho.

Após a modelagem do problema, no Capítulo 4, alguns cenários de redes de distribuição de água são gerados e simulados com o objetivo de analisar a aplicabilidade do modelo. Um software para redes ramificadas foi desenvolvido para ilustrar o modelo por meio de uma resolução heurística.

Por último (Capítulo 5), são apresentadas as conclusões críticas do modelo, bem como as possíveis evoluções envolvendo o tema e as limitações encontradas durante a fase de elaboração deste trabalho.

2. BASE CONCEITUAL E REVISÃO DA LITERATURA

Com a crescente tendência internacional para a sustentabilidade, a eficiência econômica, escassez de água e a proteção do ambiente, o problema das perdas dos sistemas de abastecimento de água é de grande interesse a nível mundial, que afeta empresas de água e seus clientes no mundo inteiro (FERRANTE & BRUNONE, 2003; HOLNICKI-SZULC *et al.*, 2005; LAMBERT & HIRNER, 2002; PUUST *et al.*, 2010; WU, 2009).

Assim, este capítulo inicia-se com uma extensa pesquisa bibliográfica sobre perdas de água no sistema de abastecimento de água (SAA), e em seguida, foca nas perdas em redes de distribuição de água. A partir desta pesquisa observa-se a necessidade de abordar a manutenção nas redes de distribuição, sendo, então, relevante uma revisão da literatura sobre setores de manobra e alocação e localização de válvulas de fechamento. Posteriormente, conceitos de agregação multicritério e heurísticas são analisados, pois serão importantes na formulação do modelo de setorização proposto neste trabalho.

2.1. Prestação de serviços em Sistema de Abastecimento de Água (SAA)

O aumento da pressão sobre os recursos hídricos e a crescente ênfase na prática empresarial sustentável nos últimos anos, levaram os prestadores de serviços de água a considerar a perda de água nos SAA como uma chave de indicadores de desempenho do sistema (MOUNCE *et al.*, 2010). A gestão das perdas é reconhecida como um dos principais desafios para as empresas abastecedoras de água e sua quantificação, detecção e localização é fundamental para uma gestão eficiente (GIUSTOLISI *et al.*, 2008; NICOLINI & ZOVATTO, 2009; PUUST *et al.*, 2010; WU & SAGE, 2006; WU, 2009).

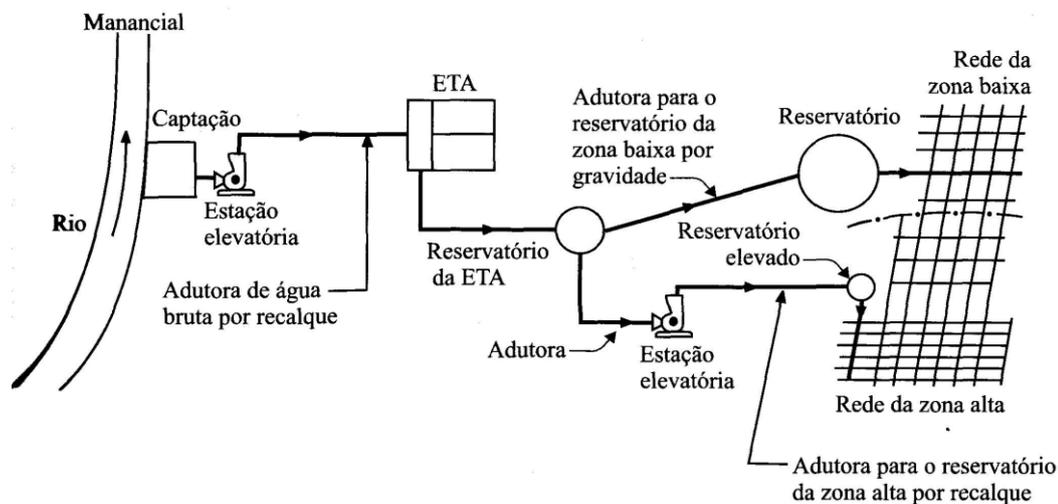
Um atendimento adequado aos usuários deste sistema de abastecimento terá bons resultados apenas quando as empresas de saneamento conseguirem, entre outros fatores, minimizar o *déficit* de água, maximizar a segurança e a confiabilidade do sistema, maximizar a qualidade do serviço prestado e empregar tarifas adequadas na cobrança dos serviços (MORAIS & ALMEIDA, 2006).

Embora grandes rupturas no sistema de abastecimento de água, em geral, são encontradas e corrigidas muito rapidamente, devido ao contato dos clientes (via *call centers*), nem toda ruptura resulta em águas superficiais visíveis e podem passar despercebidas (MOUNCE *et al.*, 2010). Assim, as estratégias de gestão de perdas e ferramentas que auxiliam

no gerenciamento integrado e automatizado das redes deverão ajudar os proprietários de rede a avaliar a condição da rede de distribuição de água, avaliar dados de incidentes históricos (vazamento ou ruptura) e risco de fracasso, visualização de áreas de alto risco, propor as estratégias de “reparo ou substituição” e priorizar o trabalho com base em riscos inerentes e os custos da ação (CHRISTODOULOU *et al.*, 2007). Antes de relatar as características das perdas de água em sistemas de abastecimento é importante entender seus componentes principais, como segue.

2.1.1. Componentes de um sistema de abastecimento de água

Segundo Gomes (2004 *apud* GIROL, 2008) um SAA é o conjunto de equipamentos, obras e serviços voltados para o suprimento de água a comunidades, para fins de consumo doméstico, industrial e público. Este sistema constitui-se basicamente da captação de água de algum manancial, do seu tratamento e posterior distribuição aos consumidores, como define Tsutiya (2005 *apud* GIROL, 2008). A Figura 2.1 mostra a configuração geral de um sistema de abastecimento de água.



Fonte: Girol (2008).

Figura 2.1. Concepção de um sistema de abastecimento de água

O manancial é o local onde é captada água para o abastecimento, que pode ser de uma fonte subterrânea ou superficial e deve ser suficiente para atender a demanda de projeto. As estações elevatórias podem ser utilizadas na captação, adução, tratamento e na distribuição propriamente dita (TSUTIYA, 2005 *apud* GIROL, 2008). A captação é o conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto a um manancial, para a retirada de água destinada a um SAA (ABNT, 1992a).

As adutoras são canalizações dos sistemas de abastecimento de água com o propósito de conduzir água para as unidades que antecedem a rede de distribuição do sistema. As adutoras, em geral, não distribuem água aos consumidores e são responsáveis pela interligação da captação, estação de tratamento e reservatórios (TSUTIYA, 2005 *apud* GIROL, 2008). Seu projeto é regido pela NB 591/91. Enquanto, a Estação de Tratamento de Água (ETA) é o conjunto de unidades destinado a adequar as características da água aos padrões de potabilidade antes de ser distribuída aos consumidores. Uma unidade de estação de tratamento é cada um dos elementos da ETA em que certo processo de tratamento se realiza (ABNT, 1992b).

Os reservatórios de distribuição de água são elementos do sistema de abastecimento de água destinados a regularizar a variação entre a vazão de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição (ABNT, 1994a). Já as redes de distribuição de água são o conjunto de peças especiais destinadas a conduzir a água potável até os pontos de tomada das instalações prediais, ou os pontos de consumo público, sempre de forma contínua, em quantidade e pressão recomendadas (ABNT, 1977; 1994b).

2.1.1.1. Componentes principais em redes de distribuição de água

Uma rede de distribuição de água consiste em várias partes que estão interligadas, criando uma rede constituída por nós e ramos (condutos ou trechos de tubulação). Toda vez que a pressão e/ou a vazão muda em uma tubulação é caracterizado um nó. Por exemplo: uma tubulação de diâmetro 75 mm muda para uma de 32 mm, através de uma conexão chamada “redução”, ocorre uma variação na pressão e vazão, então, considera-se um nó, mesmo que ele esteja em linha reta. Nas conexões que unem trechos de tubulações como ‘TEs’ ou ‘CRUZETAS (X)’ também é comum a diferença de vazão, pois ela será dividida para alimentar várias áreas, então, também serão considerados nós.

Grilo (2007) destaca os condutos, bombas hidráulicas, válvulas e ventosas, como segue:

- ✓ Os *condutos* dos sistemas de abastecimento de água têm como função o transporte do fluido (água). Podem ser constituídas por diversos tipos de materiais: fibrocimento (FC), aço carbono, ferro fundido dúctil (FFD), policloreto de vinilo (PVC), polietileno de alta densidade (PEAD) e poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV).
- ✓ As *bombas hidráulicas* têm o objetivo de ‘impulsionar’ a água na tubulação, as bombas diferenciam-se pelas temperaturas máximas de líquido que podem transportar, pela sua profundidade de implantação e pelos diferentes fins para as quais podem ser

projetadas além do abastecimento de água (e.g. irrigação, tratamento de águas residuais e drenagem de terrenos).

- ✓ As *válvulas* e *ventosas* têm o objetivo de melhorar o funcionamento e a operação dos sistemas hidráulicos em pressão, existe uma vasta gama de válvulas e ventosas que se adequam a sistemas de abastecimento de água. Para cada tipo de válvula e ventosa, apresentam-se as suas aplicações e as suas características principais (GRILO, 2007; SOUSA, 2001 *apud* GRILO, 2007; YSUSI, 2000).
 - As *ventosas* têm como funções: (i) permitir a saída de ar (pequenas quantidades) acumulado nos pontos altos; (ii) permitir a entrada e (iii) saída de grandes quantidades de ar durante o enchimento e esvaziamento dos condutos; e (iv) permitir a entrada de ar durante a ocorrência de depressões nos condutos.
 - As *válvulas de retenção* têm como função impedir a inversão do escoamento e, normalmente, elas são colocadas imediatamente à jusante de grupos elevatórios. Existem outras situações em que se utilizam este tipo de válvulas, também com função de evitar a inversão do caudal, como sejam na extremidade de montante de condutos de aspiração, quando o grupo elevatório se encontra a uma cota superior, e no conduto de saída de reservatórios unidirecionais de proteção contra o golpe de aríete¹.
 - As *válvulas redutoras de pressão* (VRP) têm como função principal reduzir a pressão à jusante sempre que esta exceda um determinado valor. As VRP podem ser controladas mecânica ou eletronicamente, de modo a funcionarem, não apenas para um único valor de pressão, mas para diversos patamares de pressão definidos em função da variação de consumo, permitindo, assim, uma gestão mais eficiente dos níveis de serviço e um melhor desempenho hidráulico do sistema.
 - As *válvulas de fechamento* (manobra) têm a função de permitir o isolamento de determinados condutos quando nelas se verificam avarias, quando é necessário proceder a remodelação/substituição de uma ou mais condutos do sistema, ou de órgãos acessórios, ou ainda para a execução de ramais de ligação.

¹ Por *golpe de aríete* se denominam as variações de pressão decorrentes de variações da vazão, causadas por alguma perturbação, voluntária ou involuntária, que se imponha ao fluxo de líquidos em condutos, tais como operações de abertura ou fechamento de válvulas, falhas mecânicas de dispositivos de proteção e controle, parada de turbinas hidráulicas e ainda de bombas causadas por queda de energia no motor, havendo, no entanto, outros tipos de causas (Camargo, 1989).

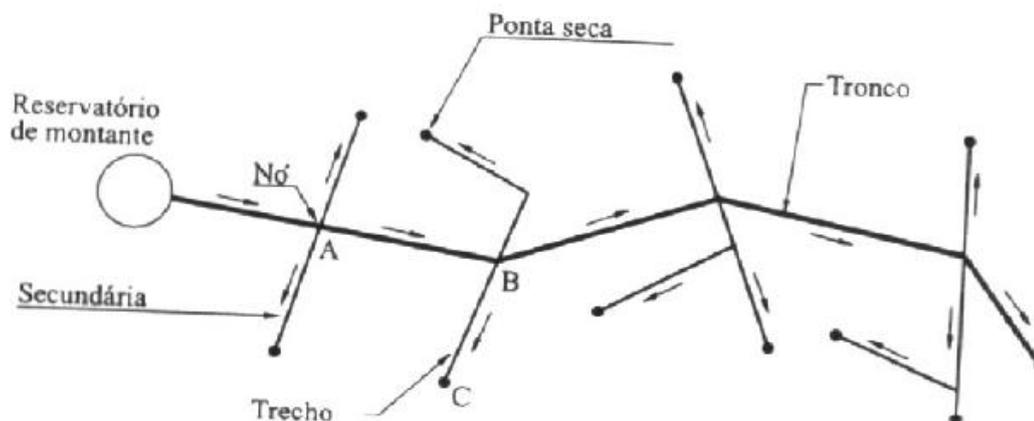
Assim, uma válvula pode ser definida como um dispositivo mecânico, através da qual o fluxo de fluido pode ser iniciado, parado ou regulado por uma parte móvel que se abre ou se fecha obstruindo a passagem da água (OZGER & MAYS, 2004).

Em relação aos condutos, de acordo com NB 594/77, em uma rede de distribuição de água distinguem-se dois tipos de condutos (tubulações):

- 1) **Condutos principais:** também chamados troncos ou mestres, são as canalizações de maior diâmetro, responsáveis pela alimentação dos condutos secundários, destinados ao abastecimento de extensas áreas da cidade.
- 2) **Condutos secundários:** (de menor diâmetro) são os condutos que estão intimamente em contato com os prédios a abastecer e cuja alimentação depende diretamente deles. A área servida por um conduto desse tipo é restrita e está nas suas vizinhanças.

Conforme a disposição dos seus condutos principais, em geral, três tipos principais de redes de distribuição podem ser definidos: ramificada, malhada ou mista.

A **rede ramificada** possui um padrão em que a distribuição da vazão é condicionada a um conduto principal denominado tronco. Os pontos de derivação de vazão e/ou mudança de diâmetro são denominados de *nós* e o conduto entre dois nós de *trecho* (ver Figura 2.2). O sentido do escoamento é do tronco para os condutos secundários até as *extremidades mortas* ou *pontas secas* (CESEC, 2010; ROSSMAN, 1994).



Fonte: CESEC (2010).

Figura 2.2. Rede ramificada

O inconveniente deste traçado é que a manutenção interrompe o abastecimento, mas é economicamente mais atrativa. Segundo a NB 594/77, pode ser tipo ‘espinha de peixe’ ou ‘grelha’.

Rede em “espinha de peixe”: em que os condutos principais são traçados, a partir de um conduto principal central, com uma disposição ramificada que faz jus aquela denominação

(ver Figura 2.3a). É um sistema típico de cidades que apresentam desenvolvimento linear pronunciado.

Rede em “grelha”: em que os condutos principais são sensivelmente paralelos, ligam-se em uma extremidade a um conduto principal e têm os seus diâmetros decrescendo para a outra extremidade (ver Figura 2.3b).

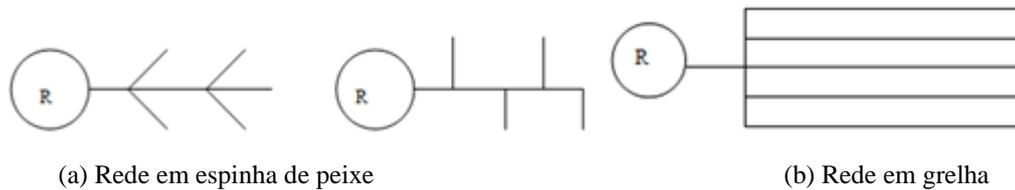
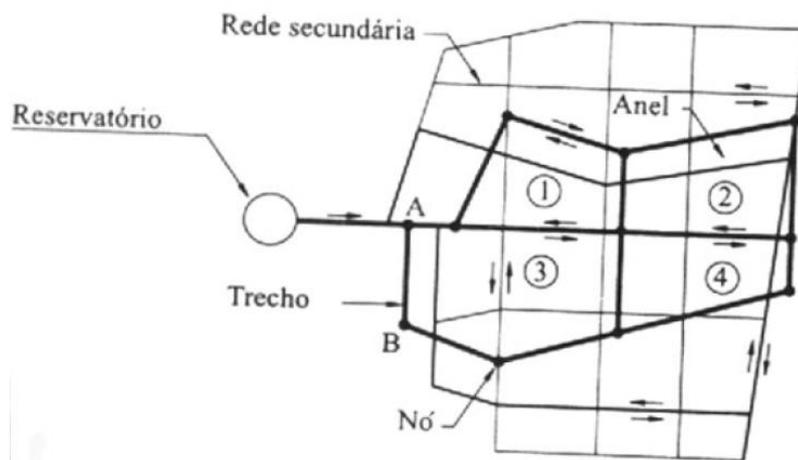


Figura 2.3. Tipos de rede ramificada

A **rede malhada** é constituída por condutos tronco que formam *anéis* ou *malhas*, onde há possibilidade de reversibilidade no sentido das vazões em função da demanda (ver Figura 2.4). Nesta disposição, pode-se abastecer qualquer ponto do sistema por mais de um caminho, o que permite uma grande flexibilidade no abastecimento e manutenção, mas é mais dispendiosa devido às conexões e acessórios (CESEC, 2010; ROSSMAN, 1994).



Fonte: CESEC (2010).

Figura 2.4. Rede malhada

Uma rede mista pode surgir com a junção das características das redes ramificada e malhada.

2.2. Perdas de água no SAA

Qualquer discussão relativa a perdas de água deve ser precedida por uma definição clara dos componentes do balanço hídrico. No final da década de 1990, a *International Water Association* (IWA) propôs uma matriz de balanço hídrico para os sistemas de abastecimento

de água, que procura uniformizar os conceitos e os entendimentos sobre perdas de água em todo o mundo, como mostra o Quadro 2.1 (LAMBERT, 2002).

Quadro 2.1 – Componentes do balanço hídrico

Sistema Entrada Volume	Consumo Autorizado	Faturado	Consumo faturado medido (Incluindo a água exportada)	Água faturada	
			Consumo faturado não medido		
	Perda de água	Não faturado		Consumo não faturado medido	Água não faturada
				Consumo não faturado não medido	
		Perda aparente (não físicas)		Consumo não autorizado	
				Medição Imprecisa	
		Perda real (físicas)		Vazamento na transmissão e/ou Redes de distribuição	
				Vazamentos e extravasamento nos reservatórios de adução ou distribuição	
	Vazamento em conexões (ramais) até o ponto de medição do cliente				

Adaptado de Lambert (2002).

Assim, o consumo autorizado diz respeito a todo o volume anual de água consumido, medido ou não medido, faturado ou não, fornecido a consumidores registrados, a outros que estejam implicitamente ou explicitamente autorizados a fazê-lo para uso doméstico, público ou industrial e à própria entidade gestora. Sendo que o consumo autorizado pode incluir água para combate a incêndio, lavagem de condutos e coletores, lavagem de ruas, irrigação de praças públicas, alimentação de fontes, etc. (ALEGRE *et al.*, 2005).

As perdas de água podem ser físicas e não físicas. As perdas não físicas dizem respeito ao consumo não autorizado e a medição imprecisa do consumo autorizado. A redução destas perdas permite que a empresa abastecedora aumente a receita tarifária. Já as perdas físicas dizem respeito, principalmente, aos vazamentos no sistema de abastecimento de água. Sua redução permite diminuir os custos de produção - mediante redução do consumo de energia - e utilizar as instalações existentes para aumentar a oferta, sem expansão do sistema produtor (MOURA *et al.*, 2004).

Fazendo uma discussão a cerca dos vazamentos, existem diferentes tipos de vazamentos, incluindo aqueles em tubulações e acessórios (como válvula), mas na maioria dos vazamentos são decorrentes das rupturas nas tubulações. Além disso, existem muitas causas possíveis para os vazamentos e muitas vezes uma combinação de fatores leva à sua ocorrência, tais como: material, composição, idade e métodos de junção de componentes do sistema de distribuição de água. Outro fator relacionado é a qualidade da instalação inicial dos componentes do sistema de distribuição. As condições da água são também um fator, incluindo a temperatura, velocidade e pressão (GEORGIA, 2007; ARREGUÍN-CORTES &

OCHOA-ALEJO, 1997; WANG *et al.*, 2002). O Quadro 2.2 sintetiza as principais origens e magnitude das perdas físicas em cada subsistema.

Quadro 2.2 - Perdas físicas por subsistema - Origem e Magnitude

Subsistema	Origem	Magnitude
Adução de Água Bruta	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção*	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional.
Tratamento	Vazamentos estruturais Lavagem de filtros* Descarga de lodo*	Significativa, função do estado das instalações e da eficiência operacional.
Reservação	Vazamentos estruturais Extravasamentos Limpeza*	Variável, função do estado das instalações e da eficiência operacional.
Adução de Água Tratada	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção* Descargas	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional.
Distribuição	Vazamentos na rede Vazamentos em ramais Descargas	Significativa, função do estado das tubulações e principalmente das pressões.

Nota:*Considera-se perdido apenas o volume excedente ao necessário para operação.

Fonte: Moura *et al.* (2004).

Além dos custos diretos, a ocorrência de ruptura tem sempre outras consequências sociais associadas, pois envolve a interrupção do abastecimento de água durante a reparação de infraestrutura, bem como a redução da água disponível no sistema (RAMOS *et al.*, 2001). Contudo, as consequências imprevisíveis de perdas em grande escala podem ser muito graves.

2.2.1. Perdas de água na rede de distribuição de água

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) adota duas fórmulas de cálculo para o índice de perdas de água em redes de distribuição de água, que são: (1) o índice de perdas de faturamento, corresponde à comparação entre o volume de água disponibilizado para distribuição e o volume faturado; e (2) o índice de perdas na distribuição, faz a comparação entre o volume de água disponibilizado para distribuição e o volume consumido (SNIS, 2010).

Segundo o SNIS, em 2010 o valor médio das perdas de faturamento para todo o conjunto de prestadores de serviços foi de 35,9%. Em comparação com o ano anterior ocorreu uma diminuição de 1,2%. O índice de 2010 é o menor valor de toda a série histórica de 16 anos do SNIS, iniciada em 1995. Da mesma forma, o valor médio das perdas na distribuição foi 38,8%, inferior a 2009 em que se observou 41,6% de perdas. Entre outros motivos, um impulsionador desta redução é a crescente preocupação e cobrança, principalmente por parte do Governo, quanto ao uso adequado de um recurso cada vez mais escasso como é a água.

Tabela 2.1 apresenta um comparativo dos índices de atendimento urbano e os índices de perdas de faturamento e por distribuição, no ano de 2010, entre as capitais brasileiras.

Tabela 2.1 - Comparativo do índice de perdas entre as capitais do Brasil em 2010

<i>Capital/Estado</i>	Prestador de serviço	<i>Atendimento urbano (%)</i>	<i>Perdas faturamento (%)</i>	<i>Perdas na distribuição (%)</i>
Aracaju/SE	Cia de Saneamento de Sergipe	88,4	52,07	59,04
Belém/PA	Cia de Saneamento do Pará	50,9	41,85	46,89
	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém	16,3	46,55	46,55
B. Horizonte/MG	Cia de Saneamento de Minas Gerais	98,3	29,2	32,97
Boa Vista/RR	Cia de Águas e Esgotos de Roraima	99,2	64,29	56,21
Brasília/DF	Cia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal	100	23,12	24,93
Campo Grande/MS	Águas Guariroba S/A	99	1,38	27,95
	Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul S/A	99	28,15	35,63
Cuiabá/MT	Cia de Saneamento da Capital	100	58,82	58,82
Curitiba/PR	Cia de Saneamento do Paraná	99,4	20,47	32,36
Florianópolis/SC	Cia Catarinense de Águas e Saneamento	93,6	18	35,41
Fortaleza/CE	Cia de Água e Esgoto do Ceará	74,8	20,15	32,65
Goiânia/GO	Saneamento de Goiás S/A	90,4	35,9	32,16
João Pessoa/PB	Cia de Águas e Esgotos da Paraíba	91,4	35,08	44,71
Macapá/AP	Cia de Água e Esgoto do Amapá	41,2	74,16	77,34
Maceió/Al	Cia de Saneamento de Alagoas	80,4	60,67	65,9
Manaus/AM	Cia de Saneamento do Amazonas	56,3	79,58	62,29
	Águas do Amazonas S.A.	96,5	59,5	59,5
Natal/RN	Cia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte	91,5	52,68	60,48
Palmas/TO	Cia de Saneamento do Tocantins	91,2	22,77	32,98
Porto Alegre/RS	Cia Rio-Grandense de Saneamento	88,5	22,59	41,13
	Departamento Municipal de Água e Esgotos	100	30,26	23,22
Porto Velho/RO	Cia de Águas e Esgotos de Rondônia	49,4	62,22	63,84
Recife/PE	Cia Pernambucana de Saneamento	81,3	57,03	66,19
	Serviço de Água e Esgoto de Rio Branco	81,9	64,05	68,4
Rio Branco/AC	Departamento Estadual de Pavimentação e Saneamento	60,6	62,01	49,13
Rio de Janeiro/RJ	Cia Estadual de Águas e Esgotos	86,7	49,11	31,23
Salvador/BA	Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.	97,1	28,57	37,06
São Luís/MA	Cia de Saneamento Ambiental do Maranhão	68,2	68,17	67,88
São Paulo/SP	Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo	97,9	27,79	34,51
Teresina/PI	Águas e Esgotos do Piauí S/A	92,6	46,17	53,62
Vitória/ES	Cia Espírito-Santense de Saneamento	96,7	27,09	34,67

Fonte: SNIS, 2010.

Inúmeros fatores podem levar às elevadas porcentagens de perdas de água, tanto por faturamento quanto por distribuição, tais como: falhas na detecção de vazamentos; redes de distribuição funcionando com pressões muito altas; elevados problemas na qualidade da

operação dos sistemas; dificuldade no controle das ligações clandestinas e na aferição/calibração dos hidrômetros; ausência de programa de monitoramento de perdas; dentre outras hipóteses (SNIS, 2010).

É importante destacar que as perdas por faturamento tratam-se da água consumida, mas não faturada. Do ponto de vista social, do uso racional do recurso natural a 'água', a perda de água na distribuição tem um carácter de maior relevância, uma vez que além do não faturamento, esta se perdeu antes do consumo. Assim, dentre as empresas analisadas, pode-se destacar a Companhia de Água e Esgoto do Amapá, a Companhia de Saneamento do Amazonas e a Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia que apresentam um baixo percentual de atendimento urbano e estão entre os cinco maiores índices de perdas por distribuição.

Assim, devido às características levantadas até o momento, este trabalho tem interesse nas perdas físicas (por distribuição) que ocorrem ou podem ocorrer nas redes de distribuição de água. Por este motivo, deste ponto em diante, o conteúdo do trabalho estará intrinsecamente ligado à rede de distribuição e não mais no sistema de abastecimento de água (SAA) como um todo. É importante ressaltar que as perdas físicas em redes de distribuição estão relacionadas aos vazamentos na rede.

Assim, o problema de redução das perdas na distribuição de água como um todo é complexo e exige ações coordenadas em diferentes áreas da gestão de rede de água, como a detecção direta e reparo de vazamentos, os programas de reabilitação geral de tubulações e controle da pressão operacional (MORAIS & ALMEIDA, 2007).

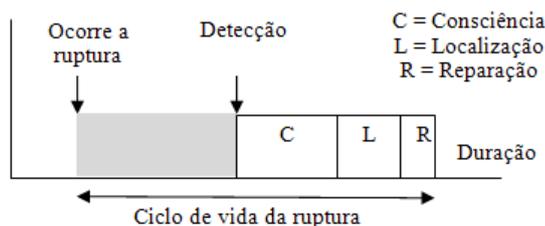
De acordo com Puust *et al.* (2010), a maioria dos métodos relacionados à gestão de perdas desenvolvidos até agora podem ser classificados da seguinte forma: (1) métodos de detecção e localização de vazamentos (2) métodos de avaliação de perdas que estão se concentrando em medir a quantidade de água perdida; e (3) métodos de controle de vazamento que são voltados para o controle eficaz dos níveis corrente e futuro de perdas.

Segundo Hunaidi *et al.* (2005), a gestão de perdas é composta por quatro componentes principais: (i) quantificação da perda total de água, (ii) monitoramento de vazamento, (iii) localização e reparação de vazamentos, e (iv) gestão de pressão da tubulação.

Neste trabalho procurou-se classificar os trabalhos encontrados na literatura conforme a abordagem de Puust *et al.* (2010), uma vez que a maioria dos artigos encontrados a respeito de gestão de pressão objetiva, na verdade, a avaliação e controle das perdas. Porém, adiciona-se a esta classificação aqueles artigos que abordam a reabilitação de rede de abastecimento enfatizando que esta atividade é realizada após a detecção de um vazamento de água.

2.2.1.1. Métodos de detecção e localização de vazamentos

Uma questão importante em relação a vazamentos e rupturas na rede é a detecção oportuna destes, minimizando as perdas físicas de água. Em geral, há um tempo considerável entre o início do vazamento de água e seu conhecimento (detecção). Um dos principais objetivos é minimizar o tempo anterior à consciência deste vazamento (MOUNCE *et al.*, 2010), como mostrado na Figura 2.5.



Adaptado de Mounce *et al.* (2010).

Figura 2.5. Ciclo de vida de um vazamento

Se não for detectada, tubulações com perdas podem comprometer a integridade do sistema de distribuição de água potável e levam a sérios problemas operacionais, como por exemplo, aumento das despesas com energia, diminuição das receitas de serviço público, do compromisso e da qualidade da água (BUCHBERGER & NADIMPALLI, 2004).

Embora as razões para esses vazamentos sejam bem conhecidas, alguns dos métodos atuais de detecção e localização são complicados ou imprecisos, a maioria deles são demorados (TAGHVAEI *et al.*, 2006). A simulação computacional de sistemas de distribuição de água emerge como uma ferramenta importante para tanto, uma vez que a acurácia na detecção de vazamentos, permitindo uma resposta rápida, é necessária para minimizar as perdas e, consequentemente, os custos (VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2000; WANG *et al.*, 2002).

Atividades de detecção de vazamento podem ser classificadas em dois grupos: reativas e proativas. A reativa é realizada por pessoal da empresa de água, uma vez que se considere que um problema é suficientemente grave, identificado através de contatos com o cliente, ou através de outras informações (MOUNCE *et al.*, 2010). Enquanto a pró-ativa é com base na subdivisão dos sistemas de distribuição em zonas distintas pelo fechamento permanente de válvulas e da medição dos fluxos dentro de cada zona. Através do monitoramento dos fluxos médios da noite, alterações anormais no volume de água podem ser detectadas. Se o fluxo da noite, menos o fluxo legítimo é perto de zero, a perda é considerado como próximo de zero. Em contraste, um resíduo positivo vai significar perda na ausência de quaisquer outros

fatores. A identificação e quantificação de perdas na distribuição, desta forma, dependem da estimativa precisa do esperado fluxo noturno (MCKENZIE & SEAGO 2005).

Existe atualmente uma variedade de técnicas comerciais disponíveis para detecção de vazamentos. Sua utilização depende das propriedades do local do vazamento, o que implica na interrupção da integridade do material do tubo, liberação de água e a emissão de um ruído característico ou a manifestação de algum outro sinal. Sem um programa de detecção de vazamentos, a empresa abastecedora somente encontrará os vazamentos quando estes tornarem-se visíveis na superfície, ou quando ocorrer algum colapso na infraestruturas (COLOMBO *et al.*, 2009; GEORGIA, 2007). Algumas ferramentas de análise da detecção de perdas podem ser encontradas em periódicos internacionais, tais como:

- ✓ Estatística [Correlação cruzada, mínimos quadrados ponderados, Bayes e desequilíbrio de massa] (ANDERSEN & POWELL, 2000; BECK *et al.*, 2005; GAO *et al.*, 2004; GAO *et al.*, 2005; GAO *et al.*, 2009; HUNAIDI & CHU, 1999; KAPELAN *et al.*, 2004; POULAKIS *et al.*, 2003; ROUGIER, 2005; YANG *et al.*, 2007; YANG *et al.*, 2008);
- ✓ Frequência Doppler, método de resposta de impulso e frequência (BIMPAS *et al.*, 2010; FERRANTE & BRUNONE, 2003a; GAO *et al.*, 2006; LEE *et al.*, 2005a; LEE *et al.*, 2005b; LEE *et al.*, 2006; LEE *et al.*, 2007; LIOU, 1997; MPESHAA *et al.*, 2001);
- ✓ Programação matemática [modelo não linear, Liapunov, modelo de estabilidade Lagrangeano] (ABHULIMEN & SUSU, 2004; BRUNONE, 1999; VERDE, 2001; WU, 2009);
- ✓ Transformada de Fourier, transformada Wavelet, e análise transiente inversa (BRUNONE & FERRANTE, 2004; BRUNONE *et al.*, 2008; COVAS *et al.*, 2005a; COVAS *et al.*, 2005b; COVAS & RAMOS, 2010; FERRANTE & BRUNONE, 2003b; FERRANTE *et al.*, 2007; FERRANTE *et al.*, 2009a; FERRANTE *et al.*, 2009b; MENICONI *et al.*, 2010b; MPESHA *et al.*, 2002; MUGGLETON *et al.*, 2002; MUGGLETON & BRENNAN, 2005; TAGHVAEI *et al.*, 2007; VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2007; WANG *et al.*, 2002);
- ✓ Método Fuzzy (GABRYS & BARGIELA, 2000; MAMLOOK & AL-JAYYOUSI, 2003; MOUNCE *et al.*, 2010);
- ✓ Métodos de gradiente e técnicas heurísticas [Levenberg-Maquardt, Algoritmos Genéticos, Prize-Collecting Steiner Arborescence, Branchand-Cut-and-Bound] (COVAS & RAMOS, 2001; KAPELAN *et al.*, 2003; PRODON *et al.*, 2007;

- PRODON *et al.*, 2010; VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2000; VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2003; WU *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2007; YANG *et al.*, 2008); e
- ✓ Redes Neurais Artificiais (RNA) (MOUNCE *et al.*, 2002; MOUNCE *et al.*, 2003; MOUNCE & MACHELL, 2006; MOUNCE *et al.*, 2010).

2.2.1.2. Métodos de avaliação de perdas

A quantidade de água perdida é um indicador importante da evolução positiva ou negativa da eficiência da distribuição de água, tanto em anos específicos, como a tendência ao longo de um período de anos (LAMBERT & HIRNER, 2002).

Quantificar a quantidade total de água perdida é conseguido através da realização de uma auditoria de água de todo o sistema, conhecido internacionalmente como balanço hídrico. Auditorias oferecem uma valiosa imagem geral sobre os vários componentes do consumo e da perda, que é necessário para avaliar a eficiência de um serviço público no que diz respeito a entrega da água, finanças e operações de manutenção. Além disso, auditorias de água são necessárias para o planejamento de outras práticas de gestão de perdas (HUNAIDI *et al.*, 2005).

O balanço hídrico é baseado em medições ou estimativas de (i) água produzida, (ii) de água importada e exportada, (iii) água consumida, e (iv) água perdida. O cálculo do balanço hídrico fornece um guia para estimar o quanto se perde em vazamentos na rede (“perda real”) e quanto é devido às perdas não físicas (perda “aparente”) (WINARNI, 2009).

Segundo Puust *et al.* (2009), os métodos de avaliação desenvolvidos até agora podem ser classificados nos seguintes dois grandes grupos: (a) *top-down* e (b) *bottom-up*. Numa abordagem *top-down* considera-se inicialmente o sistema como um todo para, em seguida, considerar-se uma especificação genérica dos módulos que compõem o sistema. Por outro lado, numa abordagem *bottom-up* considera-se inicialmente a descrição detalhada dos elementos básicos que compõem o sistema, que são agregados em vários níveis para uma descrição completa.

Existem diferentes soluções para a redução de vazamentos em redes de distribuição de água. Algumas são soluções estruturais, tais como a utilização de válvulas redutoras de pressão nos locais apropriados, e outras não estruturais que são tratadas através de sistemas de gestão e são muito eficazes e não necessitam de investimento de capital (NAZIF *et al.*, 2010).

Uma técnica para redução das perdas é o gerenciamento de pressão, que considera a relação direta entre o vazamento e pressão (NAZIF *et al.*, 2010; NICOLINI & ZOVATTO,

2009; SAVIC & WALTERS, 1995; WALSKI *et al.*, 2006a). Quanto menor a pressão, menor a frequência de ruptura da tubulação. Além disso, a pressão pode danificar as tubulações e danificar suas articulações. Frequentes flutuações de pressão podem causar falhas por fadiga em tubos, especialmente aqueles de material plástico (HUNAIDI *et al.*, 2005).

As principais ferramentas encontradas nos artigos para avaliar as perdas foram: Programação matemática [teoria linear, o método Simplex, o modelo não linear] (ALONSO *et al.*, 2000; JOWITT & XU, 1990; SAVIC & WALTERS, 1995; STERLING & BARGIELA, 1984); Técnicas de Meta-heurística (ARAUJO *et al.*, 2006; LIBERATORE & SECHI, 2009; NAZIF *et al.*, 2010; NICOLINI & ZOVATTO, 2009; REIS *et al.*, 1997; SAVIC & WALTERS, 1995; TUCCIARELLI *et al.*, 1999); Controle on-line (ULANICKI *et al.*, 2000; XU & POWELL, 1993); Redes neurais artificiais – RNA (HO *et al.*, 2009; HO *et al.*, 2010; NAZIF *et al.*, 2010); Estatística (BUCHBERGER & NADIMPALLI, 2004; CARPENTIER & COHEN, 1991;); e software EPANET (ALONSO *et al.*, 2000; ARAUJO *et al.*, 2006; CHEUNG *et al.*, 2010; TABESH *et al.*, 2009)

2.3.1.3. Métodos de controle e monitoramento de vazamentos

As consequências das rupturas de tubulações podem apresentar elevado custo devido à interrupção do serviço, ao custo da reparação e danos à propriedade e infraestruturas. Os custos associados com as quebras de tubulações podem ser reduzidos minimizando as pausas na detecção e o tempo de localização por abordagem de monitoramento contínuo (MISIUNAS *et al.*, 2005). A detecção de perdas é considerada como uma “despesa de poupança de dinheiro” e programas de controle de perdas sistemático são implementados com objetivos de minimizar estas perdas (FERRANTE & BRUNONE, 2003a; 2003b).

Atualmente, o monitoramento contínuo dos sistemas de distribuição de água é um pré-requisito para a detecção rápida e eficiente de qualquer situação anormal (RAMOS *et al.*, 2001). O monitoramento é um dos passos mais importantes no controle avançado de sistemas dinâmicos complexos (DUZINKIEWICZ *et al.*, 2008). A gestão eficiente das perdas somente pode ser alcançada com a implementação de um sistema integrado de controle de vazamentos, que inclui a detecção e localização de vazamentos, reparação destes e, finalmente, a implementação de um monitoramento contínuo do sistema de abastecimento (COVAS & RAMOS, 1999).

Monitoramento de vazamento implica na divisão do sistema de distribuição em áreas bem definidas, que são conhecidas como *Distrito Metering Areas* (DMAs). Perdas nos DMAs

podem ser monitoradas através da medição da vazão mínima noturna mensal, ou trimestral, ou em base contínua. A análise das taxas de vazão mínima noturna pode também ser usada para refinar (ou checar) a precisão das auditorias de água (HUNAIDI *et al.*, 2005).

As ferramentas mais importantes encontradas em periódicos internacionais sobre o controle e monitoramento de vazamentos foram: Wavelet (AL-SHIDHANI *et al.*, 2003); Inverse análise transiente (LIGGETT & CHEN, 1994); Soma cumulativa - CUSUM (MISIUNAS *et al.*, 2005; MISIUNAS *et al.*, 2006); Modelo estocástico (ANDREOU *et al.*, 1987a; ANDREOU *et al.*, 1987b; JANKOVIC-NISIC *et al.*, 2007); Regressão polinomial evolutiva (BERARDI *et al.*, 2008); Bursts and background estimates - BABE (LAMBERT, 1994; LAMBERT & MORRISON, 1996); Modelo não linear (VAIRAVAMOORTHY & LUMBERS, 1998; VERDE, 2005); Tecnologia de sistema expert (COULBECK *et al.*, 1996); e software EPANET (MARUNGA *et al.*, 2006; MISIUNAS *et al.*, 2006).

2.2.1.4. Métodos de reabilitação da rede de distribuição

Ao invés de manter o ativo existente, grandes quantidades de capital são gastos nos projetos de novos sistemas de distribuição de água e na reabilitação (ou melhoria) das redes existentes em países desenvolvidos e em desenvolvimento (UGARELLI & FEDERICO, 2010; WU & SIMPSON, 2001). O problema de decisão é o de escolher quais componentes adicionar ou melhorar (e como melhorá-los) para maximizar os benefícios resultantes das mudanças no sistema e ao mesmo tempo minimizando os custos (HALHAL *et al.*, 1997; MAMLOOK & AL-JAYYOUSI, 2003).

Devido a estes custos, as empresas de SAA devem explorar estratégias de médio e longo prazo de reabilitação da rede e melhoria do sistema (HERZ, 1998). Uma parte integrante de qualquer suporte para o planejamento de longo prazo de reabilitação para um sistema de distribuição de água deve ser a análise da deterioração da tubulação e correspondente aumento na perda de água (GIUSTOLISI *et al.*, 2007).

Segundo um relatório da *Environmental Protection Agency* - EPA (2007), “a reabilitação do sistema é a aplicação da reparação das infraestruturas, renovação e tecnologias de substituição, em um esforço para voltar à funcionalidade um sistema de distribuição de água potável ou de um sistema de coleta de esgoto”.

Segundo Alegre *et al.* (2004; 2005) a Reabilitação (*Rehabilitation*) é qualquer intervenção física que prolongue a vida de um sistema existente e/ou melhore o seu desempenho estrutural, hidráulico e/ou de qualidade da água, envolvendo uma alteração da

sua condição ou especificação técnica. Em geral, refere-se a todo o sistema de abastecimento, ou a um setor, ou um subsetor, mas não a um componente individual (como válvulas). Os autores dizem ainda que em relação ao objectivo pretendido, a reabilitação pode ser dividida em estrutural, hidráulica e de qualidade da água. Já quanto à metodologia utilizada, esta inclui a renovação, a substituição e, em alguns casos como na reabilitação hidráulica, o reforço de componentes do sistema.

A empresa abastecedora de água deve escolher a adequada gama de opções de reabilitação para qualquer projeto. Além do desempenho e o custo do método de reabilitação, tais decisões derivam fortemente da estratégia global da gestão de ativos, tecnologias de reabilitação disponíveis e prevê taxa de deterioração na estrutura em consideração.

Os principais objetivos para aplicação de métodos de reabilitação nas redes de distribuição de água são: (1) manter a capacidade hidráulica; (2) evitar futuros problemas de qualidade da água e; (3) evitar futuras rupturas e vazamentos (HADZILACOS *et al.*, 2000). Escolhas entre a reabilitação, reparação e substituição também precisam considerar o custo do ciclo de vida útil estimada da instalação em cada opção.

Estudos sobre a avaliação da infraestrutura e modelagem de deterioração têm a intenção de auxiliar os proprietários e operadores das redes de distribuição de água na decisão de “reparação ou substituição” sobre uma base mais científica. Os estudos geralmente são uma tentativa de identificar relações estatísticas entre as taxas de ruptura e fatores de risco influentes, como a idade da tubulação, diâmetro e material, a corrosividade do solo, a pressão e temperatura, possíveis cargas externas, incluindo tráfego da estrada e dados históricos registrados de rupturas de tubulações (CHRISTODOULOU *et al.*, 2007).

Nos periódicos internacionais encontrados sobre reabilitação da rede, que estão relacionados de alguma forma com as perdas de água, podem-se destacar as seguintes ferramentas: Programação não linear inteira mista (KIM & MAYS, 1994); Métodos heurísticos como algoritmo genético multiobjetivo, modelo de algoritmo genético Messy e algoritmo *Branch and Bound* (ALVISI & FRANCHINI, 2009; HALHAL *et al.*, 1997; WALTERS *et al.*, 1999; WU & SIMPSON, 2001); além de Software, tais como KANEW e REDES (KLEINER *et al.*, 1998); e Sistemas de apoio à decisão (DSS) (HADZILACOS *et al.*, 2000; MORAIS & ALMEIDA, 2007).

2.3. Manutenção em redes de distribuição de água

Para realizar uma manutenção adequada, a empresa abastecedora de água precisa formular seu plano de manutenção no qual são estabelecidas as possíveis ações a serem tomadas quando for realizar a manutenção de acordo com o tipo da não conformidade encontrada, bem como são estabelecidos os procedimentos legais necessários, tais como os procedimentos adotados para comunicar aos usuários atingidos pelo desabastecimento durante a manutenção, que pode ser dividida em: preventiva, corretiva ou paliativa; e o plano da empresa deve contemplar estes três tipos para cada problema ou não conformidade encontrada.

O objetivo deste plano é manter toda a rede de distribuição de água em perfeito funcionamento, ou seja, um trabalho feito no sentido de preservar as características originais das instalações e equipamentos, tanto no que se refere à estrutura, como ao acabamento e à funcionalidade, tudo com o propósito de garantir a qualidade da água e o seu fornecimento na quantidade adequada, minimizando as perdas no processo.

É comum confundir reabilitação com operações de manutenção. Contudo, a reabilitação das redes de distribuição de água deve ser entendida como uma manutenção preventiva, em que por meio da melhoria da rede busca-se prevenir a ocorrência de rupturas que ocasionarão perdas de água. Porém, a manutenção também é constituída por atividades realizadas para corrigir os problemas na rede após sua ocorrência. A ação para corrigir esse problema pode ser paliativa (momentânea, apenas para ‘minimizar’ os efeitos gerados naquele momento) ou corretiva (ação duradoura, com o intuito de ‘eliminar’ o problema). Assim, optou-se por usar o termo ‘manutenção’ por este ser mais amplo que reabilitação.

2.3.1. Setor de manobra

Com as informações levantadas sobre perdas de água em redes de distribuição percebe-se uma necessidade crescente de se investigar novas soluções no que tange a manutenção eficiente das redes em prol da minimização e gestão eficiente das perdas. Contudo, não se pode falar em manutenção adequada das redes sem uma correta setorização para manobra destas.

As interrupções programadas (manutenção preventiva, por exemplo) e não programadas (manutenção corretiva, por exemplo) ocorrem regularmente em redes de distribuição de água,

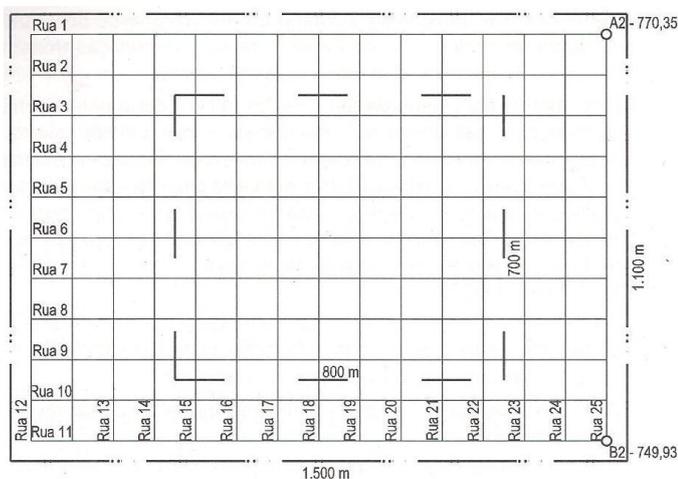
tornando-se necessário isolar os trechos de tubulações (GIUSTOLISI & SAVIC, 2010), e um fracionamento da rede pode tornar mais fácil qualquer atividade de manutenção.

Walski, em 1993, definiu um setor (segmento) como a porção da rede de distribuição de água que pode ser isolada por válvulas de fechamento. Tal setor será um único tubo se este possuir duas válvulas localizadas em suas extremidades. Caso contrário, o isolamento de um tubo irá requerer o fechamento das válvulas em outros tubos, bem como, o setor assim formado pode ser constituído por tubos adjacentes e nós. Mais tarde, Walski *et al.* (2006 b) identificaram os setores críticos de um sistema real com base em válvulas existente.

Estes segmentos ou ‘setores’ nas redes de distribuição de água são, frequentemente, usados em trabalhos científicos, como dos autores Soares *et al.*(2004) e Silva *et al.* (2007), por permitirem uma melhor parametrização de alguns fatores necessários para avaliar as perdas de água na distribuição, por exemplo, sejam estes setores manobra ou de medição (geralmente uma área maior que o setor de manobra).

Conforme NBR 12218 um setor de manobra é a menor divisão da rede de distribuição, cujo abastecimento pode ser isolado, sem afetar o abastecimento do restante da rede. Este setor deve abranger uma área que apresente uma *ou* mais das seguintes características: (a) Extensão de rede = 7.000 a 35.000 metros (*m*); (b) Número de economias (*ou* unidades consumidoras, *ou* ligações) = 600 a 3.000 unidades; (c) Área = 40.000 a 200.000 metros quadrados (m^2). Além disso, o isolamento do setor deve ser feito com o menor número de válvulas de manobra (ABNT, 1994b).

Com base nestes limites propostos pela NBR 12218, os autores Heller & Pádua (2006) propõem um exemplo de dimensionamento de uma rede de distribuição para a área na Figura 2.6, em que uma das etapas para isto é o dimensionamento do setor de manobra.



Fonte: Heller & Pádua (2006).

Figura 2.6. Exemplo- Delimitação do setor de manobra

Note que a área é composta por ruas na coordenada x e na coordenada y . Os autores relatam que a população abastecida por esta rede é de 16.030 habitantes. Sendo a densidade populacional desta 4,4 habitantes/economia (unidade consumidora), a área em questão apresenta os seguintes valores:

- ✓ Extensão de rede: $11 \text{ ruas} * 1.400 \text{ metros} + 15 \text{ ruas} * 1.000 \text{ metros} = 30.400 \text{ metros}$;
- ✓ Número de economias (unidades consumidoras): $16.030 \text{ habitantes} / 4,4 \text{ habitantes/economia} = 3.643 \text{ economias}$;
- ✓ Área: $1.500 \text{ metros} * 1.000 \text{ metros} = 1.650.000 \text{ m}^2$.

Portanto, com base na sua extensão de rede, a área em questão pode constituir apenas um setor de manobra, se tal localidade constituir uma única zona de pressão². Esta setorização é subótima quando se pensa nos inconvenientes que a interrupção de água causa à população durante atividades de manutenção, por exemplo.

2.3.1.1. Válvulas de fechamento

As válvulas de fechamento servem para isolar as partes da rede (segmentos), contendo um ou mais trechos de tubulação em que o trabalho de manutenção pode ser realizado sem interromper o serviço em toda a rede ou em grandes porções da mesma (CREACO *et al.*, 2010).

Ao contrário das válvulas de controle de vazão, pouca atenção tem sido dada para o layout e a operação de válvulas de fechamento. No entanto, de um ponto de vista da confiabilidade, estas válvulas são de grande interesse porque elas determinam a extensão do isolamento necessário para inspeção ou manutenção de parte do sistema (OZGER & MAYS, 2004).

Para Giustolisi & Savic (2010), para fins de gestão, é importante identificar a associação entre cada subconjunto de válvulas e os trechos de tubulação diretamente isolados com o fechamento destas válvulas. Além disso, é também importante melhorar a concepção do sistema de válvula, a fim de aumentar a confiabilidade da rede.

² Zona de pressão em redes de distribuição é a área abrangida por uma subdivisão da rede, na qual as pressões estática e dinâmica obedecem a limites prefixados (ABNT, 1994b).

2.3.1.1.1. Localização de válvulas de fechamento

Os estudos sobre localização de válvulas de fechamento em redes de distribuição de água ainda são escassos. É consensual que o uso de métodos heurísticos é ideal para sua aplicabilidade em redes reais. Contudo, em geral, segundo Ysusi (2000) os autores utilizam as regras “N e N-1” para alocação das válvulas. A partir desta alocação eles estudam a confiabilidade do sistema, bem como medem o impacto da interrupção de água nas redes durante uma atividade de manutenção.

Para Ozger e Mays (2004) as válvulas de fechamento são normalmente localizadas em torno de junções em um sistema de distribuição de água e recomendam uma “regra de ouro” para sua localização, em que no máximo quatro válvulas devem ser requeridas para isolar um trecho de tubulação.

Já a norma NBR 12218 diz que nos condutos secundários deverá ser prevista uma válvula junto ao ponto de ligação a condutos principais (ABNT, 1994b). Contudo Heller & Pádua (2006) argumentam que estas regras e normas pode demasiar a utilização de válvulas na rede de distribuição.

Para otimizar a localização das válvulas autores como Giustolisi & Savic (2010) utilizaram a variável ‘número de válvulas’, enquanto Creaco *et al.* (2010) utilizaram a variável ‘custo’, uma vez que estes associaram o custo das válvulas com seu diâmetro. Heller & Pádua (2006), também afirmam que o custo das válvulas pode alterar com seu diâmetro.

2.3.1.1.2. Isolamento dos trechos de tubulação

O ideal, ao isolar um trecho de tubulação na rede, é fechar apenas um subconjunto de válvulas que separam diretamente uma pequena porção da rede (setor), isto é, causando a interrupção mínima possível. Contudo, isto nem sempre é fácil, pois o sistema de válvula, normalmente, não é concebido para isolar cada trecho de tubulação separadamente (isto é, possuindo duas válvulas no final de cada trecho). Portanto, para fins de gestão, é importante identificar a associação entre cada subconjunto de válvulas e os segmentos diretamente isolados com o fechamento destas válvulas. Além disso, é também importante melhorar a concepção do sistema de válvula de isolamento, a fim de aumentar a confiabilidade da rede (GIUSTOLISI & SAVIC, 2010).

Além disso, para Jun (2007), normalmente, quando uma válvula não funcionar corretamente, um subsistema não poderá ser isolado e trechos de tubulação adjacentes também terão de ser isolados, fechando as válvulas nesses trechos. O impacto total desta falha da válvula deve ser avaliado e as seguintes medidas podem ser usadas: (1) número total de clientes fora de serviço; (2) comprimento total de trechos de tubulação, e (3) quantidade de água que deixou de circular na rede (JUN *et al.*, 2007).

Segundo Mays (2000) as válvulas que permanecem na mesma posição por longos períodos de tempo tornam difícil sua operação, a menos que sejam “exercidas” de vez em quando. Heller & Pádua (2006) afirmam que, além do custo significativo dessas válvulas e de suas caixas de acionamento e proteção, também exige um esforço sobre-humano dos operadores para fechar (e posteriormente abrir) as válvulas. Isto quando ele consegue localizar, acessar ou acionar todas as válvulas, visto que não raro diversas delas costumam apresentar um dos seguintes problemas:

- ✓ Omissão de sua localização no cadastro da rede existente ou impossibilidade de seu acionamento, motivadas pela falta de atualização cadastral ou ocultação das tampas das caixas de acionamento das válvulas devido a sucessivas obras de calçamento;
- ✓ Dificuldade de acesso às válvulas para seu concerto, não apenas pelo motivo já mencionado, mas também devido à própria concepção dessas caixas, na maioria das vezes constituídas por simples tubos verticais que permitem tão somente o seu acionamento.

Para evitar esses problemas deve-se fazer uso racional das válvulas, bem como, a adoção de caixas que permitam não somente o acionamento das válvulas, mas seu acesso fácil e permanente identificação (HELLER & PÁDUA, 2006). Os argumentos destes autores vêm de encontro com a opinião de Ozger & Mays (2004) que dizem haver pouco conhecimento sobre a confiabilidade das válvulas de isolamento. Jun (2005) afirma que a colocação de válvulas eficiente melhora a confiabilidade da rede de distribuição de água. Para tanto, este autor propôs um algoritmo para identificar setores de um sistema de distribuição de água. Afirma ainda que, como a confiabilidade da válvula em si não é 100%, as consequências da falha de válvulas devem ser exploradas na determinação dos locais destas válvulas.

Um sistema de apoio à decisão em setorização de redes de distribuição de água foi desenvolvido por Li & Kao (2008) para ajudar os gerentes e engenheiros na análise da vulnerabilidade das redes. Os impactos da escassez de água e hidráulicos em todos os segmentos ou setores, resultantes de um evento de falha, são avaliados usando o programa de

simulação de falhas. O gerente pode identificar os segmentos críticos e executa a manutenção adequada para garantir a confiabilidade da rede de distribuição.

Contudo, o efeito de válvulas em termos de confiabilidade do sistema de distribuição tem dois aspectos importantes, conforme colocação de Ozger & Mays (2004), que são: conectividade dos trechos de tubulação e atendimento ao consumidor. O efeito do isolamento sobre a conectividade do sistema pode ser entendido pelo exemplo da Figura 2.7. Note que quando o trecho 1 falhar a conectividade entre os segmentos de trecho 2, 3 e 4 seria preservado na Figura 2.7 (a), mas seria perdido no caso da Figura 2.7 (b). O mesmo vale para os trechos 5, 6 e 7.

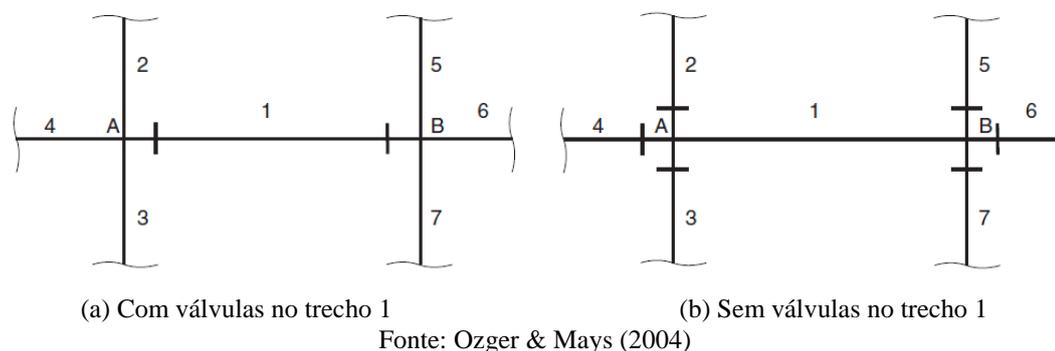


Figura 2.7. Esquema de isolamento para o trecho 1

Além disso, quando uma ruptura em um trecho de tubulação ocorre, alguns consumidores ficarão sem abastecimento de água. E a extensão espacial de isolamento é principalmente determinada pelas localizações de válvulas no sistema.

2.4. Busca heurística em redes de distribuição de água

Decisões de manutenção da rede de distribuição de água de curto e longo prazo têm sido estudadas, aplicando-se muitas técnicas de otimização diferentes, incluindo os métodos heurísticos (WU & SIMPSON, 2001).

No que se refere a gestão de perdas, Vítkovský *et al.* (2000) usaram um Algoritmo Genético (GA) em conjunto com um método inverso transiente para detectar vazamentos e factores de fricção. Enquanto, Wu *et al.* (2010) usaram um GA também para resolver o problema de detecção de vazamento localizados em nós e os seus coeficientes emissores associados tais que as diferenças entre o modelo preditivo e o valores de pressão e fluxo observados sejam minimizados. Já Yang *et al.* (2007) utilizaram um GA avançado para identificação do sistema cego na detecção de vazamentos. Halhal *et al.* (1997), Walters *et al.*

(1999) e Wu & Simpson (2001) propõem um Algoritmo Genético Messy com o objetivo de aplicar na concepção ótima do projeto de rede de distribuição de água e sua reabilitação.

Voltando as atenções na setorização para manobra de redes de distribuição de água. Segundo Ozger & Mays (2004), na formulação do problema de localização ótima da válvula, uma variável de decisão pode ser definida para cada nó que liga um trecho com o resto do sistema como. Assim, o número total de variáveis de decisão é o dobro do número de trechos de tubulação na rede analisada. Uma solução para este problema é uma sequência binária, resultando em um problema de otimização combinatória. Devido à complexidade do problema as técnicas de otimização heurísticas são muito eficientes em encontrar uma solução ‘quase ótima’ para problemas tão complexos. Estes autores propuseram o uso do *Simulated Annealing* para o problema de localização das válvulas.

Geem (2006) apresentou um modelo de minimização de custos para o projeto de redes de distribuição de água que usa um algoritmo de busca harmônica. O modelo também interage com um simulador hidráulico, o EPANET, para verificar as restrições hidráulicas.

Segundo Bouchart & Goulter (1991), as implicações de cada tipo de falha nos trechos podem ser avaliadas pela insuficiência de fornecimento causada por um evento de falha em conjunto com a probabilidade de ocorrência do evento, e pode ser representado por o volume esperado de déficit, ou seja, a demanda não suprida às unidades consumidoras após isolar um setor.

Assim, Giustolisi & Savic (2010) propuseram um Algoritmos Genéticos multiobjetivo, para identificar a associação entre as válvulas de fechamento e os setores fechados por estas. Os objetivos utilizados são: (i) minimizar o número de válvulas alocadas e (ii) e minimizar a demanda total de água não entregue. A abordagem baseia-se na utilização de matrizes topológicas de uma rede cuja topologia é modificada a fim de explicar a existência do sistema de válvula. O objetivo dos autores é minimizar os custos associados à implantação das válvulas e, simultaneamente, garantir a confiabilidade do sistema.

Por sua vez, Creaco *et al.* (2010) apresentam um modelo semelhante ao de Giustolisi & Savic (2010), porém, ao invés de minimizar o número de válvulas alocadas, eles buscam a minimização dos custos, relacionando este custo ao diâmetro das válvulas alocadas.

2.4.1. Algoritmos Genéticos (GAs)

Segundo Linden (2008) os GAs são um ramo dos algoritmos evolucionários e como tal podem ser definidos como uma técnica de busca ‘aleatória’ baseada numa metáfora do

processo biológico de evolução natural. Os GAs são técnicas heurísticas de otimização global, em que uma vez encontrado um indivíduo que é o melhor de certo grupo (máximo local), não pára de procurar por outros indivíduos ainda melhores (ótimo global). Desta forma, os GAs opõem-se aos métodos de programação matemática que, dependendo do ponto inicial de análise, facilmente acabam presos em máximos locais, como mostra a Figura 2.8.

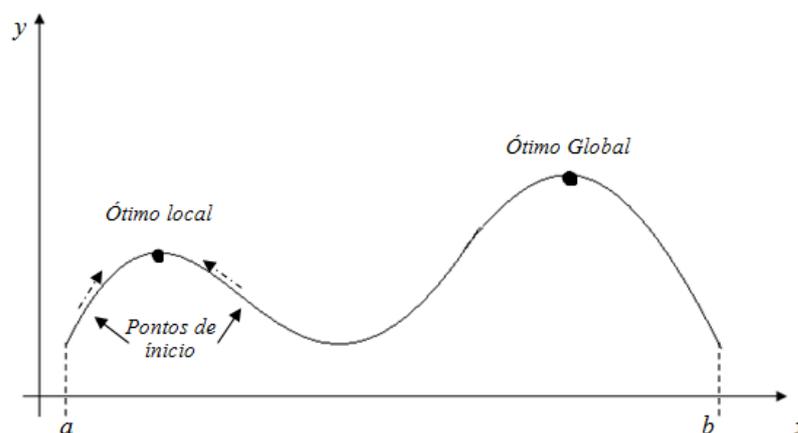


Figura 2.8. Ilustração da busca da solução ótima em programação matemática

Contudo, segundo o mesmo autor, ao contrário do que possa parecer, a evolução natural não é um processo dirigido à obtenção da solução ótima; o processo consiste em fazer competir uma série de indivíduos e pelo processo de sobrevivência do mais apto, os melhores indivíduos tendem a sobreviver.

Uma solução individual para o problema torna-se uma sequência de números, semelhante a um “cromossomo” na natureza. A iteração básica envolve uma população de indivíduos (soluções) que evoluem através de muitas gerações (HALHAL *et al.*, 1997). Assim, a nomenclatura utilizada em algoritmos genéticos é baseada nos termos da genética, mas não necessariamente os mesmos. Assim, é importante defini-los antes do início da explanação sobre o procedimento dos GAs, conforme o Quadro 2.3 (LINDEN, 2008).

Quadro 2.3 – Nomenclatura em GAs

<i>Linguagem natural</i>	<i>GA</i>
Cromossomo	Indivíduo, <i>string</i> , cromossomo, árvore
Gene	Características
Alelo	Valor
<i>Locus</i>	Posição
Genótipo	Estrutura
Fenótipo	Conjunto de parâmetros

Fonte: Linden (2008).

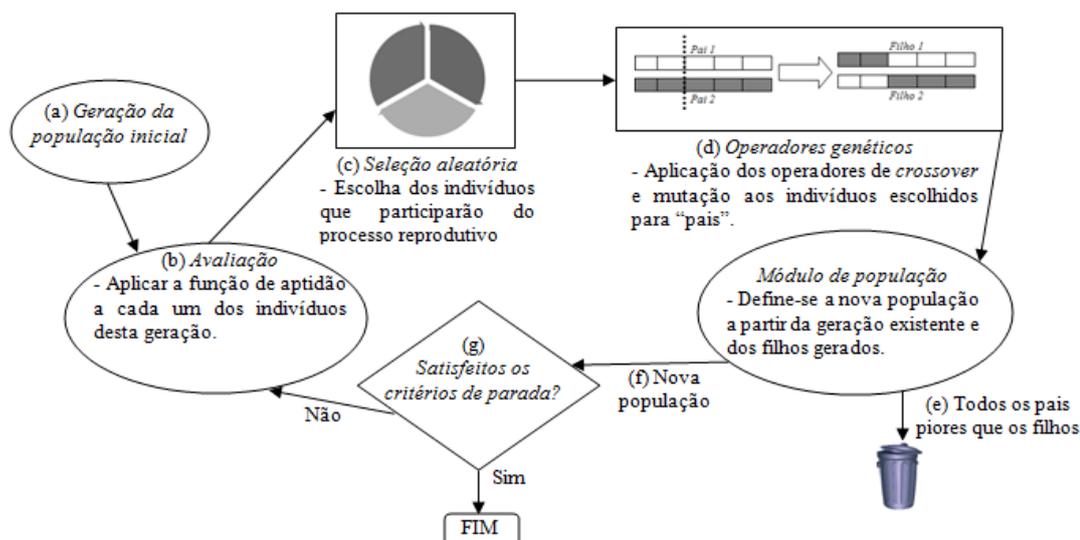
De acordo com Yang *et al.* (2007), basicamente, o algoritmo de GA começa com uma população que consiste de um conjunto de cromossomos ou *string*. Cada uma das soluções

individuais é avaliada quanto à sua aptidão para a resolução da tarefa de minimização/maximização da função objetivo. A cada geração, aos cromossomos pais é permitido cruzar e ter filhos. Estes filhos (novo-cromossomo) então formam a base para a próxima geração. Após uma série de gerações, as soluções viáveis podem ser evoluídas na busca de boas soluções.

A representação cromossomial é fundamental no GA. Cada pedaço indivisível desta representação é chamado de *gene*. A representação mais simples e mais usada é a binária (alelo 0 e 1), isto é, um cromossomo nada mais é do que uma sequência de *bits* (cada gene é um *bit*). Se um indivíduo possui k *bits* todos os demais indivíduos terão o mesmo tamanho. Assim, a quantidade de indivíduos possíveis para esta representação será 2^k (GROSKO *et al.*, 2006; KOZA, 1995; LINDEN, 2008).

Para esta representação, segundo Linden (2008) precisa-se saber: (a) a faixa de operação de cada uma das variáveis; e (b) a precisão desejada. Ao usar n *bits* para uma variável x_i , que trabalha numa faixa $[inf, sup]$, então a precisão máxima desta variável é definida por: $(sup_i - inf_i)/(2^n - 1)$. Por exemplo, se for usado 10 *bits* em uma variável cuja faixa de operação vai de 2 a 10 então a precisão será: $(10-2)/(2^{10} - 1) \approx 0,0078$. Se for necessária uma solução com precisão maior, então será preciso aumentar o número de *bits* por cromossomo.

A Figura 2.9 mostra esquematicamente o procedimento de um GA, que pode ser resumido algoritmicamente através dos seguintes passos: (a) inicialize a população de cromossomos; (b) avalie cada cromossomo da população; (c) selecione os pais para gerar novos cromossomos; (d) aplique os operadores de recombinação e mutação a estes pais de forma a gerar os indivíduos da nova geração; (e) apague os velhos membros da população que são piores soluções que seus filhos; (f) avalie todos os cromossomos resultantes do passo (d) e insira-os na população; (g) se o tempo acabou, ou o melhor cromossomo satisfaz os requerimentos e desempenho, retorne-o; caso contrário, volte ao passo (c).



Fonte: adaptado de Linden (2008).

Figura 2.9. Esquema de um Algoritmo Genético

O tamanho da população inicial é um parâmetro muito sensível para o processo de GA porque, com população muito pequena o GA convergirá rapidamente para um ótimo local, enquanto que, com uma grande haverá um longo tempo de espera para uma melhoria no processo (HALHAL *et al.*, 1997). Segundo Grosko *et al.* (2006) o tamanho da população irá depender do problema. Assim, quanto maior a população, maior é a chance de encontrar a solução para o problema. No entanto, maior será o tempo de processamento. Caso o tamanho da população aumente muito, o processo estará se aproximando de uma busca exaustiva.

Normalmente, em GA a população inicial de *cromossomos* é gerada aleatoriamente – um conjunto com n indivíduos – geralmente, com uma distribuição uniforme pelo espaço de busca, podendo utilizar outro tipo de distribuição conforme o problema estudado. A inicialização aleatória, de maneira geral, gera uma boa distribuição das soluções no espaço de busca e o uso do operador de mutação de forma eficaz garante uma boa exploração de todo o espaço de busca (LINDEN, 2008; VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2000).

Uma solução (*cromossomo*) é avaliada pelo sua aptidão (*fitness*), uma medida substituta da otimalidade da solução, ou seja, a aptidão é como uma medida de desempenho de um cromossomo adaptar-se a um cenário objetivo. (WU & SIMPSON, 2001). A aptidão é determinada pela avaliação da função objetivo (por exemplo, custo ou benefício) a partir dos parâmetros de projeto codificadas do indivíduo (HALHAL *et al.*, 1997). Depois que os cromossomos são mapeados pela função de aptidão, os operadores de seleção, *crossover* e mutação são adotados para reproduzir uma nova geração de cromossomos.

Assim, em primeiro lugar, os cromossomos são selecionados por uma forte estratégia de elite (YANG *et al.*, 2007). O processo de seleção garante que os indivíduos mais adaptados

tenham maiores chances de sobreviver (GROSKO *et al.*, 2006). Assim, o método de seleção de pais deve simular o mecanismo de seleção natural que atua sobre as espécies biológicas, em que os pais mais capazes geram mais filhos, ao mesmo tempo em que os pais menos aptos também podem gerar descendentes. Consequentemente, devem-se privilegiar os indivíduos mais aptos, sem desprezar completamente aqueles com avaliação baixa. Por exemplo, na Tabela 2.2 tem-se uma população com sua avaliação de aptidão (LINDEN, 2008).

Tabela 2.2 – Exemplo de população vs aptidão

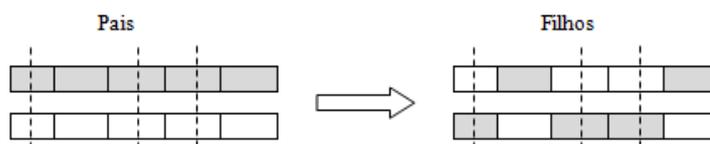
Indivíduo	Avaliação de aptidão	Porcentagem %
0001	1	$1/62 = 1,613$
0011	9	$9/62 = 14,516$
0100	16	$16/62 = 25,806$
0110	36	$36/62 = 58,065$
Total	62	100

Fonte: Linden (2008).

Pode-se ver (Tabela 2.2) que o indivíduo 0001 tem aptidão baixa, porém apresente uma característica interessante que é o '1' na última posição; característica essa que não está presente nos melhores indivíduos (0100 e 0110). Ao utilizar apenas os melhores indivíduos a reprodução nunca avançará para um indivíduo melhor que 0110.

Segundo Dias & Barreto (1998), existem basicamente, duas formas de seleção dos indivíduos para realizar *crossover*: roleta simples e roleta ponderada. Na simples todos os indivíduos tem uma mesma probabilidade de serem selecionados, aleatoriamente. Na roleta ponderada cada indivíduo tem essa probabilidade ponderada pela sua aptidão. Na Tabela 2.2 a última coluna apresenta a porcentagem de chances que cada indivíduo tem de ser selecionado, aleatoriamente, a partir de sua aptidão.

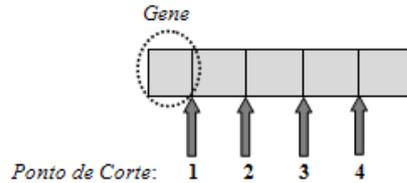
Após a seleção dos pais, o *crossover* descreve o processo pelo qual as cadeias de pais de dados codificados são combinadas para formar novas cadeias codificadas para a sua descendência. Segundo Dias & Barreto (1998), existem várias formas de *crossover*, tais como: *crossover* uniforme, *crossover* com 1-partição, *crossover* com 2-partições e *crossover* com (n)-partições. O *crossover* uniforme consiste no emparelhamento dos dois cromossomos pais e cada *gene* do cromossomo tem 50% de chance de ser trocado (ver Figura 2.10).



Fonte: adaptado de Dias & Barreto (1998).

Figura 2.10. *Crossover* uniforme

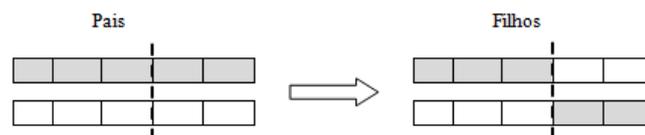
O *crossover* com 1-partição consiste na escolha aleatória de somente um ponto de corte ao longo da cadeia codificada e as sequências de código de dois pais são quebrados neste ponto, como mostra a Figura 2.11 (DIAS & BARRETO, 1998; HALHAL *et al.*, 1997; LINDEN, 2008).



Fonte: adaptado de Linden (2008).

Figura 2.11. Exemplo de ponto de corte com 1-partição

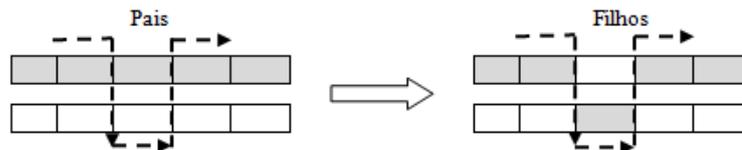
Cada indivíduo de n genes contém $n-1$ pontos de corte. Depois de sorteado o ponto de corte os pais são separados em duas partes: uma à esquerda e outra à direita do ponto de corte. O cruzamento (*crossover*) consiste em juntar a parte esquerda de um pai com a direita do outro pai formando dois novos cromossomos (YANG *et al.*, 2007), conforme Figura 2.12.



Fonte: adaptado de Dias & Barreto (1998).

Figura 2.12. *Crossover* com 1-partição

No caso do cruzamento com 2-partições, há a escolha aleatória de dois pontos de corte. Todo o material genético, dos pais, existente entre os dois pontos de corte são trocados, e o restante é mantido inalterado. Já o cruzamento com n -partições consiste de n cruzamentos com 2 partições (DIAS & BARRETO, 1998) conforme Figura 2.13.



Fonte: adaptado de Dias & Barreto (1998).

Figura 2.13. *Crossover* com 2-partição

Em terceiro lugar, a mutação é aplicada para evitar a convergência prematura. Sem um operador de mutação é possível que os filhos sejam iguais aos pais, o que diminui a diversidade da população (LINDEN, 2008). O operador de mutação altera o gene para um novo valor dentro de uma gama de valores abaixo ou acima do valor atual (VÍTKOVSKÝ *et al.*, 2000; YANG *et al.*, 2007).

O processo inicia-se com a escolha de um ponto aleatório (*gene*) de um indivíduo, depois é aplicada uma taxa de probabilidade muito pequena, na ordem de 1%, de troca deste ponto (*bit*) por outro (*bit*) (KOZA, 1995; WHITLEY, 1994). Contudo, na prática pode-se trabalhar com taxas maiores, dependendo do objetivo, topologia da superfície de erro e até mesmo se será ou não empregado o elitismo no processo de busca de uma solução. Para minimizar a perda de diversidade, pode-se usar uma taxa de mutação em níveis mais altos que sugeridos na literatura (GROSKO et al., 2006).

Após a seleção, *crossover* e mutação uma nova geração de cromossomos pode ser construída. A nova geração de cromossomos é avaliada pela função de aptidão e, então, uma nova iteração começa (YANG et al., 2007). Com a nova população o algoritmo é novamente executado, com base nesta população atual, até atingir o critério de parada. O critério da parada do sistema pode ser pelo número de gerações estabelecidas, pelo tempo de execução ou algum outro indicador (GROSKO et al., 2006). O número de gerações é função do comprimento de cadeia e sua utilização deixa o GA menos moroso do que a um estado estacionário para resultados semelhantes (HALHAL et al., 1997).

2.5. Apoio multicritério a decisão

A grande vantagem da abordagem multiobjetivo reside no fato de que, de uma só vez, vários *trade-offs* entre as alternativas são encontrados, proporcionando assim o conjunto de soluções ótimas, com um nível diferente de compromisso entre os objetivos conflitantes (NICOLINI & ZOVATTO, 2009). A escolha do método vai depender de vários fatores-chaves, tais como: o tempo disponível; o esforço requerido por uma dada abordagem; o conhecimento sobre o ambiente; a importância de uma decisão mais precisa; a necessidade de justificar a decisão para outros; o desejo de minimizar conflitos. Além destes, pode-se destacar outros fatores, tais como: o problema analisado; o contexto considerado; as informações disponíveis e o seu grau de precisão; a racionalidade requerida (compensatório ou não compensatório); a estrutura de preferências do decisor e a problemática do problema (ALMEIDA, 2011; ALMEIDA & COSTA, 2003).

Neste sentido, há basicamente quatro diferentes problemáticas, ou abordagens de problemas, em que se podem usar métodos de apoio multicritério a decisão, que são (BELTON & STEWART, 2002; ROY, 1996):

- ✓ **Problemática de escolha (P.α):** dado um conjunto *A* de alternativas, esta problemática apresenta o problema em termos de escolher uma “melhor” alternativa,

ou seja, orientar a investigação para encontrar um subconjunto de alternativas pertencentes ao conjunto A , tão pequeno quanto possível.

- ✓ **Problemática de classificação (P.β):** dado um conjunto A de alternativas, esta problemática apresenta o problema em termos de colocação das alternativas em classes que são previamente definidas com base em normas relativas ao valor intrínseco das ações.
- ✓ **Problemática de ordenação (P.γ):** dado um conjunto A de alternativas, apresenta o problema em termos de ordenação das ações em A (ou de algumas destas ações) em ordem decrescente de preferência.
- ✓ **Problemática de descrição (P.δ):** dado um conjunto A de alternativas, descreve as alternativas e suas consequências em um modo sistemático e formalizado, de modo a que os decisores possam avaliar estas alternativas. É essencialmente uma problemática da aprendizagem, em que o decisor pretende simplesmente a ganhar maior compreensão do que pode ou não ser viável.

2.5.1. Problemática de ordenação

Almeida (2011) apresenta uma interessante classificação dos métodos que trabalham a problemática de raqueamento, que é: métodos ordinais, métodos de sobreclassificação e métodos de agregação aditivos.

Os *métodos ordinais* são típicos modelos para escolhas sociais. A função de escolha social é uma regra que atribui a cada conjunto de preferências individuais e alternativas, um subconjunto de alternativas viáveis (NURMI, 1983). Destacam-se os métodos: lexicográfico, Borda, Condorcet e Copeland (BLACK, 1958; KLAMLER, 2005a; KLAMLER, 2005b; NURMI, 1983; YOUNG, 1988; YOUNG, 1990). Para utilizá-los em problemas de avaliação alternativa *vs.* critérios deve-se abrir mão de atribuir importâncias relativas ou pesos diferentes a estes critérios. Além disso, os métodos de lexicográfico e Condorcet apresentam apenas um ranque das alternativas sem qualquer avaliação numérica associada;

Nos *métodos de sobreclassificação* as preferências do decisor são modeladas utilizando relações binárias de superação, S , que significa “pelo menos tão bom quanto” (FIGUEIRA *et al.*, 2006). Nesta abordagem encontram-se os métodos das famílias ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*) (ROY & BERTIER, 1973; VINCKE, 1992) e da família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) (BELTON & STEWART, 2002). Segundo Macharis *et al.* (2004), estes métodos não fornecem

diretrizes específicas para determinar os pesos dos critérios. Na verdade, eles supõem que o decisor seja capaz de pesar os critérios de forma adequada, pelo menos, quando o número de critérios não é muito grande. Este ponto pode dificultar o processo elicitatório com a insegurança ou dificuldade do decisor expressar suas preferências de maneira intuitiva. Outro ponto relevante, segundo Mareschal *et al.* (2008), é que os métodos de sobreclassificação fazem comparações entre pares de alternativas, sendo considerados como métodos não compensatórios, ou seja, a perda de uma alternativa em um critério não pode ser compensada com o ganho desta alternativa em outro critério. Contudo, nessa comparação par a par, com a adição ou remoção de alternativas, pode ocorrer uma reversão na avaliação das demais alternativas analisadas.

Com relação aos *métodos de agregação aditivos*, eles consideram uma função valor $v_j(a)$ para cada critério j , para a obtenção da função valor global $v(a)$ (ALMEIDA, 2011), ou seja, o valor global da alternativa 'a'. Destacam-se os métodos: MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) (BANA e COSTA & VANSNICK, 1994), SMARTS (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*), SMARTER (*Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking*) (EDWARDS & BARRON, 1994) e AHP (*Analytic Hierachy Process*) (SAATY 1980; SAATY 1996). Os métodos aditivos são vistos como métodos compensatórios, em que existe a ideia de compensar um menor desempenho de uma alternativa em um dado critério por meio de um melhor desempenho em outro critério. Isto significa que nos métodos compensatórios a avaliação de uma alternativa considera os *trade-offs* entre os critérios, ou compensações. Já nos métodos não compensatórios não há *trade-offs* entre os critérios (ALMEIDA, 2011).

Contudo, métodos como o AHP e MACBETH também realizam um procedimento de comparação par a par entre alternativas para cada critério. Estes utilizam escala semântica para as avaliações, considerando que pode haver hesitação do decisor em atribuir valores quantitativos sobre diferenças de atratividade entre alternativas (BANA e COSTA *et al.*, 2004; ALMEIDA, 2011). Porém, em casos específicos, como por exemplo, em problemas que envolvem dados técnicos nas avaliações das alternativas *versus* critérios, ou seja, quando partem de um levantamento de dados e não das preferências dos decisores, uma escala semântica não resultará benefícios como os métodos se propõe.

Já o SMARTS e o SMARTER foram propostos por Edwards & Barron (1994) com a finalidade de corrigir um erro intelectual no SMART. No entanto, embora muito semelhantes, o método SMARTER pode ser considerado uma simplificação do SMARTS porque torna mais fácil a obtenção das constantes de escala, principalmente se o decisor não desejar efetuar

elicitação da magnitude destas. Este método utiliza um procedimento chamado de “peso por *swing*” para a obtenção das constantes de escala, além de considerar funções valor lineares para avaliação intracritério, simplificando as hipóteses no processo de análise (ALMEIDA, 2011).

2.5.1.1. Método SMARTER

A primeira etapa do uso do SMARTER é definir os critérios e alternativas. Na sequência, é necessário que todas as avaliações estejam na mesma escala de medida. Por este motivo é importante realizar um procedimento de normalização. De acordo com Almeida (2011), a função valor $v_j(a_i)$ fornece a avaliação de cada alternativa i para cada critério j , em que todos os valores de $v_j(a_i) > 0$. Assim, destacam-se, basicamente, três procedimentos de normalização, que são:

- ✓ **Procedimento 1:** $v'_j(a_i) = v_j(a_i) / [\text{Max } v_j(a_i)]$, pode ser interpretado como uma percentagem do valor máximo de $v_j(a_i)$. Indica a distância da principal alternativa.
- ✓ **Procedimento 2:** $v'_j(a_i) = [v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)] / [\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]$, pode ser interpretado como uma percentagem da faixa $\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)$. Observa-se que o zero significa apenas o mínimo.
- ✓ **Procedimento 3:** $v'_j(a_i) = v_j(a_i) / [\sum_i v_j(a_i)]$, pode ser interpretado como uma percentagem do total $\sum_i v_j(a_i)$.

Estas escalas desejam maximizar o resultado; nos casos que se deseja a minimização deve ser fazer $v'_j(a_i) = 1/v_j(a_i)$. A proporcionalidade é mantida nos procedimentos 1 e 3 (escala de razão). No segundo procedimento (escala intervalar), a proporcionalidade não é mantida, ou seja, $v'_j(a_i)/v'_j(a_k)$ não é necessariamente igual a $v_j(a_i)/v_j(a_k)$. A ordenação das alternativas para cada critério será o mesmo para qualquer um dos três procedimentos de normalização. No entanto, para a comparação geral entre as alternativas (considerando todos os critérios, com avaliação intercritérios) não. Portanto, quando se muda o procedimento de normalização, devem-se avaliar as constantes de escala para esta nova situação (ALMEIDA, 2011).

Para definir qual procedimento de normalização adotar é preciso entender melhor as escalas de medida. Os termos nominal, ordinal, intervalar e razão são usados para descrever uma hierarquia de escalas de medida. Resumidamente e na ordem desta hierarquia, podem-se

definir as escalas como segue (MURAVYOV & SAVOLAINEN, 2001; STEVENS, 1946; VELLEMAN & WILKINSON, 1993):

- ✓ **Escala nominal** é o nível mais elementar de representação, com base na classificação e agrupamento de elementos para a formação de conjuntos distintos. Os números atribuídos às variáveis servem como identificação ou para associar membros de uma determinada categoria. Exemplo: animais podem ser classificados em mamíferos, répteis, anfíbios, etc.
- ✓ **Escala ordinal** surge a partir da operação de ordem hierárquica. Ou seja, cada observação é a associação do indivíduo medido a uma determinada classe, sem, no entanto, quantificar a magnitude da diferença em relação a outros indivíduos. Exemplo: A ordem de preferência por cores, dado $A = \{Amarelo > Azul > Verde\}$, quer dizer que amarelo é preferível ao azul, que por sua vez é preferível ao verde. Contudo não existe qualquer quantificação desta preferência, apenas uma ordem.
- ✓ **Escala de intervalar** mede a diferença entre dois valores subsequentes. No entanto, o ponto zero é apenas uma questão de convenção ou de conveniência. Exemplo: As escalas de temperatura Celsius e Fahrenheit. Intervalos iguais de temperatura são fechados observando volumes iguais de expansão; um zero arbitrário é acordado para cada escala, e um valor numérico em uma das escalas pode ser transformado para a outra escala por meio de uma equação da forma $x' = ax + b$.
- ✓ **Escalas de razão** são caracterizadas por um objeto bem definido cuja intensidade de zero natural (zero absoluto - ausência total de uma característica ou propriedade) é a unidade de medida. Em outras palavras, os dados de escala de razão tem um zero definido, que não pode ser mudado. Todos os outros objetos que possuem a propriedade são medidos em relação ao objeto bem definido, que atua como o padrão de medição. Exemplo: os números reais $\{\dots, -2, -0,5, 0, 30, \dots\}$.

Existe a possibilidade de se transformar dados que foram registrados num determinado tipo de escala numérica em dados de outro tipo de escala, desde que se respeite a hierarquia e os atributos básicos de cada uma, Assim, os dados de uma escala de razão podem ser transformados em dados intervalares, os intervalares pode ser transformados em ordinais e os ordinais podem ser transformados em nominais. Naturalmente, tais transições envolvem, necessariamente, uma perda de informação. Apenas em certas situações muito específicas, com base em procedimentos axiomático-dedutivos, é possível se fazer a trajetória no sentido

inverso, porém isso deve ser feito sempre com extremo cuidado, sob a pena da perda de significado (CAMPELLO DE SOUZA, 2007).

Posteriormente à normalização, é importante determinar a importância de cada critério. É fundamental observar que nos métodos de agregação aditivos o grau de importância de um critério depende de sua dispersão (valores possíveis). *Por exemplo*, o déficit na demanda de água em um trecho de tubulação é importante, mas deveriam ainda ser importante se o déficit em todos os trechos considerados estiver entre $2.000m^3$ e $2.050m^3$? (Edwards & Barron, 1994). Em tal caso, fala-se em constantes de escala e sua estimativa é equivalente à taxa de substituição: as questões a serem colocadas são em termos de “ganho no que diz respeito a um critério que permita compensar a perda com relação a outro” e não em termos de ‘importância’ do critério (VINCKE, 1992).

Assim, o processo chamado de “*swing* dos pesos” consiste em incluir uma alternativa hipotética que tem o pior desempenho em todos os critérios. Então, algumas perguntas são feitas ao decisor, tal como: “Dada a oportunidade de substituir a avaliação desta alternativa em apenas um critério, em qual critério você escolheria?” O DM responde ‘*x*’ (consequência de maior valor), por exemplo, (FONTANA *et al.*, 2011). Este processo é continuado até que todos os critérios tenham sido avaliados e seja possível ordená-los por meio desta avaliação das consequências resultantes do “*swing* dos pesos”.

Após este processo, o SMARTER utiliza valores predeterminados chamados de *Rank Order Centroid weights* (ROC) para eliminar a etapa de julgamento mais difícil do SMARTS. Esta curva foi desenvolvida após uma série de estudos psicológicos que envolvem as preferências dos decisores. Com estes, Edwards & Barron (1994) relatam muito pouca perda de precisão na determinação do valor das constantes de escala. Eles afirmam que uma decisão baseada nestas, o SMARTER, em média, apresenta ganhos de 98 a 99% na função valor obtida através do levantamento completo das constantes de escala. Então, dado m critérios, tal que $j=\{1,2,3,\dots,m\}$, e uma ordem dos critérios determinada pelo DM no procedimento anterior igual a: $w_1 \succ w_2 \succ w_3 \succ \dots \succ w_m$. As constantes de escala pela curva ROC são calculadas da pela equação 2.1.

$$\begin{aligned} w_1 &= (1 + 1/2 + 1/3 + \dots + 1/m) / m; \\ w_2 &= (1/2 + 1/3 + \dots + 1/m) / m; \\ w_3 &= (1/3 + \dots + 1/m) / m; \\ &\dots \\ w_m &= (1/m) / m. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Por fim, o SMARTER compreende na soma da ponderação entre as avaliações das alternativas em cada critério pela sua constante de escala (chamada de ‘peso’ pelos desenvolvedores do método). Assim, a função valor global para uma alternativa ‘A₁’ é expressa por: $U_{A1} = [w_{Cr1} * u_{A1}(x_{A1Cr1})] + [w_{Cr2} * u_{A1}(x_{A1Cr2})] + [w_{Cr3} * u_{A1}(x_{A1Cr3})] + \dots + [w_{Crm} * u_{A1}(x_{A1Crm})]$.

2.6. Síntese conclusiva

Uma vez que as perdas de água por vazamento nas redes de distribuição são frequentemente altas, neste capítulo abordaram-se os principais pontos relevantes à temática de perdas, em especial as perdas em redes de distribuição de água. Esta pesquisa permitiu verificar que, em suma, os trabalhos que tratam da gestão de perdas objetivam avaliar, detectar e localizar os vazamentos, monitorar as perdas e melhorar a rede de distribuição com técnicas de reabilitação.

Contudo, não é possível realizar uma gestão de perdas adequada sem um plano de manutenção e, por consequência, uma setorização da rede adequada. A setorização da rede de distribuição de água torna mais fácil as atividades de manutenção necessárias para a resolução de problemas de perdas de água, e, conseqüentemente, seu controle.

As informações levantadas neste capítulo permitiram um conhecimento sobre os componentes de uma rede de distribuição de água, mais especificamente sobre setores de manobra. O exemplo de setorização apresentado por Heller & Pádua (2006), apesar de cumprir as normas brasileiras previstas por lei, não consideram os inconvenientes gerados a população em casos de desabastecimento para execução de manutenção na rede. Com isso, verifica-se que apenas as normas não são suficientes para que um projeto de rede de distribuição de água setorize adequadamente esta rede.

Na prática verifica-se uma setorização, de certa forma, intuitiva por parte dos técnicos. Contudo, em casos de desabastecimento da rede, para a realização de uma manutenção, será que se pode considerar um trecho com um hospital com o mesmo grau de relevância que um trecho com algumas residências? Desta forma verifica-se a necessidade de se realizar uma setorização baseada em características socioeconômicas das unidades consumidoras.

A maioria dos trabalhos encontrados que buscam otimizar o número e localização da válvula de fechamento preocupam-se com a confiabilidade do sistema e a mensuração dos impactos gerados pela interrupção de água nas redes durante uma atividade de manutenção após sua setorização. Os trabalhos de Creaco *et al.* (2010) e Giustolisi & Savic (2010), por

exemplo, que buscam soluções de setorização da rede considerando um impacto social na função objetivo. Este impacto é o déficit na demanda de água no sistema. Porém existem outras características que podem medir o impacto social da falta de água durante uma interrupção do fornecimento, que são importantes para a avaliação da setorização de manobra.

Portanto, como proposta este trabalho busca agregar diferentes aspectos das unidades consumidoras, por meio de uma abordagem multicritério, que seja capaz de mensurar esse impacto da falta de água e utilizar este valor, bem como outras restrições previstas nas Regulamentações Brasileiras, para encontrar as soluções mais adequadas de setorização da rede e, em seguida, analisar os custos e benefícios das soluções encontradas.

3. MODELO DE SETORIZAÇÃO PARA MANOBRA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Algumas intervenções na rede de distribuição de água, necessárias para a sua manutenção, podem acarretar em prejuízos sociais devido à interrupção momentânea do abastecimento de água. Portanto, neste capítulo é apresentado um modelo de setorização de manobra que leva em consideração as características das unidades consumidoras. Com o objetivo de buscar a minimização dos impactos negativos gerados pelo desabastecimento de água durante uma manutenção é proposta a geração de um índice de priorização.

Assim, o capítulo inicia apresentando o modelo geral de setorização para manobra. O modelo é composto pelas seguintes partes, devidamente relatadas na sequência do trabalho: (1) coleta de dados; (2) proposta de um índice de priorização; (3) modelo matemático para encontrar as soluções; (4) análise do conjunto de soluções admissíveis; (5) *trade-off* entre custos e benefícios da setorização de manobra proposta; e (6) tomada de decisão final. Para compreender o modelo foi definido como é verificado o fluxo de água em setores de manobra, bem como o cálculo da área dos trechos de tubulação. Por fim, é apresentado um algoritmo determinístico para resolução do modelo de setorização de manobra

3.1. Modelo geral de setorização para manobra

Este modelo de setorização para manobra foi motivado pela necessidade de ser considerado os impactos gerados pela interrupção do abastecimento de água durante uma manutenção em redes de distribuição de água. Para tanto, busca-se levantar algumas características das unidades consumidoras que, por meio de sua agregação, seja capaz de medir um impacto da falta de água. Para sua aplicabilidade este impacto é medido por trecho de tubulação.

Assim, isolando trechos de tubulação pode-se determinar um máximo impacto desejado, setorizando com o mínimo de válvulas possível. O objetivo disto é minimizar custos com as válvulas e minimizar o impacto gerado pela falta de água nos setores. Isto se justifica, pois, em geral, as setorizações são realizadas focando as características técnicas da rede. Contudo, uma região com maior concentração de unidades consumidoras pode apresentar um impacto superior à outras regiões, por exemplo, necessitando de um número maior de válvulas para, então, tornar os setores menores e, assim, minimizar o impacto da falta de água. A ideia não é

medir a quantidade de água deixada de ser consumida, como em muitos trabalhos na literatura, mas sim, atribuir um valor numérico (índice de priorização) para a sensibilidade de cada unidade consumidora à falta de água.

Quanto mais restrito for o impacto máximo permitido, menores deverão ser os setores para manobra, maior será o número de setores gerados e, conseqüentemente, maiores serão os benefícios gerados à sociedade. Porém, maiores serão os custos com esta setorização. Desta forma, a Figura 3.1 resume o modelo geral proposto para setorização de manobra em redes de distribuição de água.

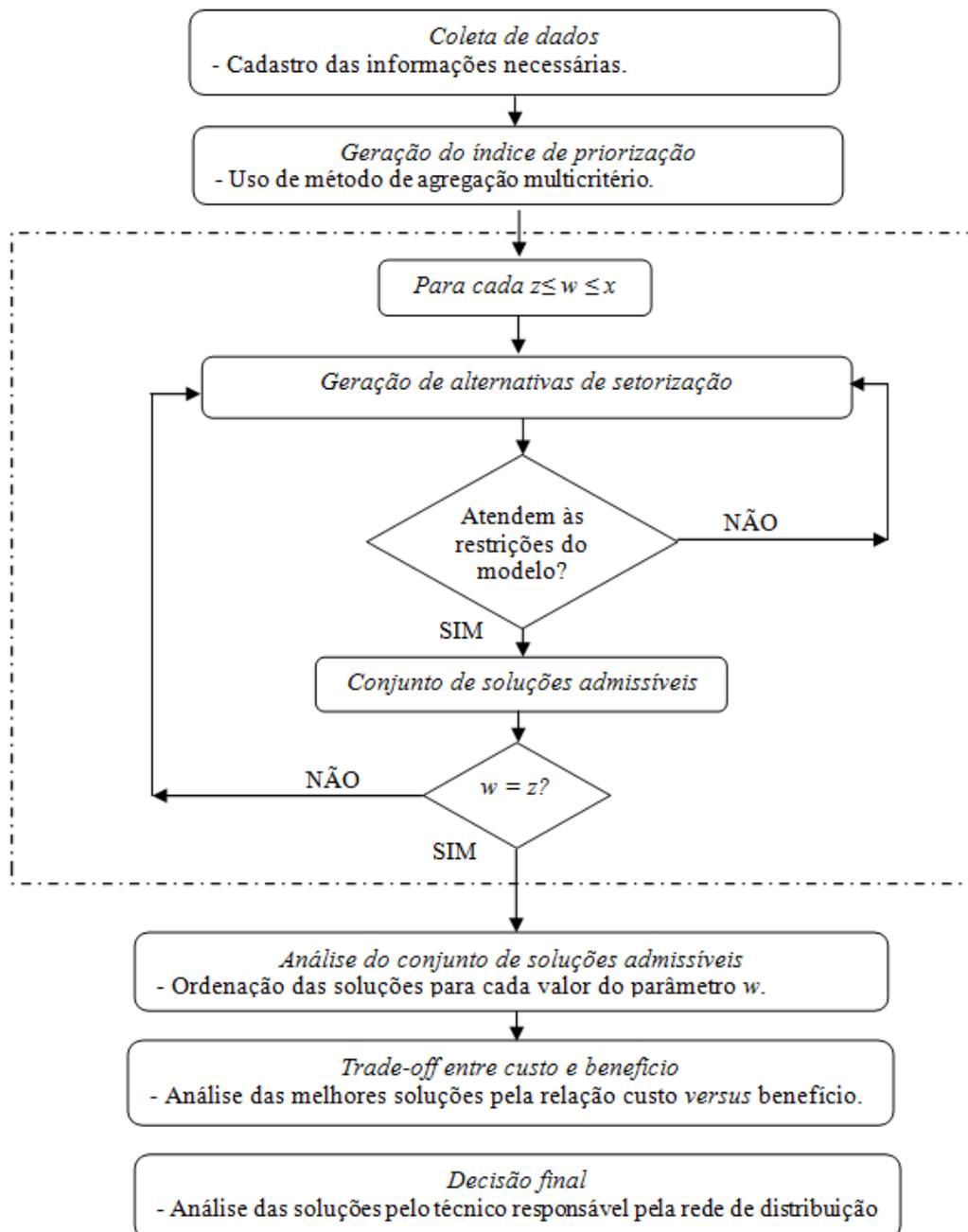


Figura 3.1. Sumarização geral do modelo de setorização

3.1.1. Coleta de dados

Pode-se ver que a primeira etapa é a coleta de dados. Em geral, as empresas abastecedoras disponibilizam dos dados necessários. Porém, caso não os tenham, estes são facilmente conseguidos pelos funcionários que realizam a leitura dos hidrômetros. É necessário definir, para a rede analisada, o ponto de origem da água (trecho interligado ao reservatório), o número de trechos constituintes da rede e defini-los em termo de seus nós inicial (i) e final (j). Para cada trecho os dados necessários são: área, comprimento, se já existem válvulas e a direção do fluxo de água. Para os trechos secundários é preciso definir ainda: número de unidades consumidoras, setor econômico destas, consumo médio de água, tarifa média paga pela água consumida.

3.1.2. Proposta de um índice de priorização

Para realizar a manutenção da rede de distribuição de água, na maioria das vezes, é necessário interromper momentaneamente o fornecimento de água. Assim, verificou-se a necessidade de criar um índice de priorização dos trechos de tubulação que represente o sensibilidade ou impacto da falta da água nas unidades consumidoras. Busca-se assim, um fator adicional no que tange à geração de setores de manobras. A Figura 3.2 apresenta a sumarização da geração do índice de priorização.

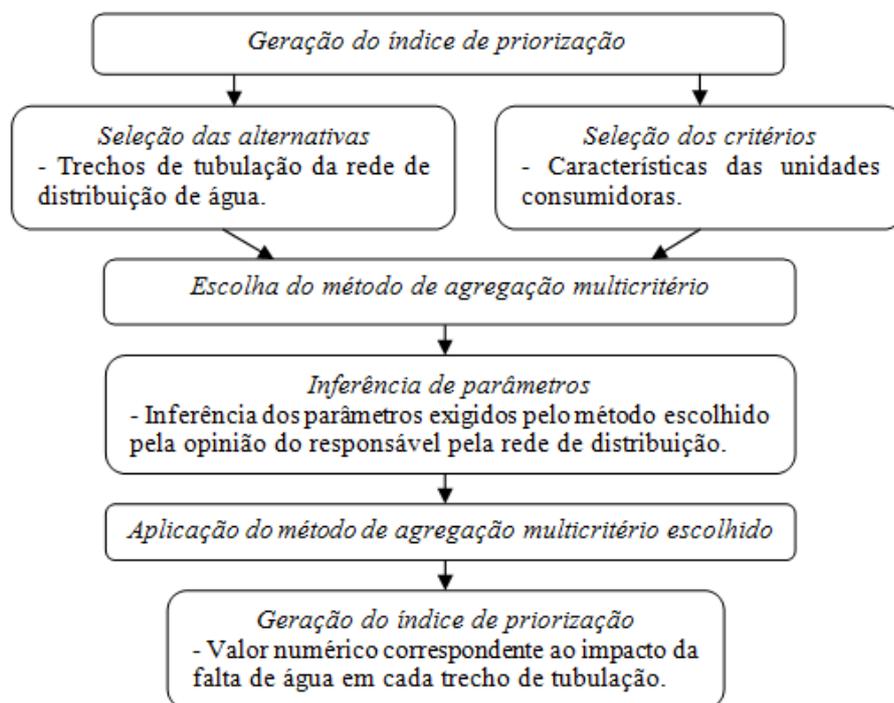


Figura 3.2. Sumarização da geração do índice de priorização

Note que para a geração do índice as características levantadas (apresentadas na sequência) de cada trecho de tubulação devem ser agregadas em um único valor. Ao considerar cada característica como um critério de avaliação do trecho de tubulação, os métodos de agregação multicritérios são ideais para agregar estas avaliações. As etapas apresentadas na Figura 3.2 são descritas na sequência.

3.1.2.1. Levantamento das alternativas e critérios

Para a geração do índice de priorização as alternativas são todos os trechos de tubulação pertencentes à rede de distribuição de água analisada. Os critérios são algumas características relevantes das unidades consumidoras. Neste trabalho quatro características foram levantadas, que são: número de unidades consumidoras (economias); tipo de setor de cada economia; valor médio da tarifa paga por cada economia; e taxa de consumo médio da economia.

- ✓ **Cr₁ - Número de economias:** este mede o número de unidades consumidoras em cada trecho de tubulação. Quanto maior o número de economias em um trecho maior deve ser sua valoração no índice de prioridade, ou seja, menor deve ser o setor de manobra no qual se encontra este trecho.
- ✓ **Cr₂ - Tipo de setor:** este examina o tipo de estabelecimento ou unidade consumidora existente no conduto. Os setores são classificados neste trabalho de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação dos setores

<i>Setor</i>	<i>Descrição</i>	<i>Setor</i>	<i>Descrição</i>
(1) Tarifas sociais	1.1-Residências; 1.2-Lote Vago; 1.3-Hidrantes; 1.4-Parques e praças; 1.5-Templos igrejas e instituições religiosas; 1.6-Condomínio.	(5) Outros serviços	5.1-Posto de gasolina c/ lavagem; 5.2-Bar/ Restaurante/ Supermerc.; 5.3-Escolas Particulares; 5.4-Escolas Publicas.
		(6) Turismo	6.1-Hotéis, Pensão, Motéis, Saunas, Similares; 6.2-Clubes e recreações.
(2) Serviços públicos ou sem fins lucrativos	2.1-Entidade mantida pelo Estado; 2.2-Organizações Cívicas, Políticas; 2.3-Entidade de classe e sindicais; 2.4-Entidades assistenciais; 2.5-Demais ativ.de utilidade pública;	(7) Industrial	7.1-Construções p/ fins Residenciais; 7.2-Construções p/ fins Comerciais; 7.3-Benef. de Madeir/Serrar/Lamin.; 7.4-Ind. de Bebidas e Fab. de gelo; 7.5-Construções p/ fins Industriais;
(3) Comércio	3.1-Instituições Financeiras; 3.2- Serviços, lojas e escritórios; 3.3-Demais atividades comerciais; 3.4-Micro/pequeno comercio.		7.6-Ind. e Fab.(Eletron/Mec/Metal); 7.7-Frigorífico / Abatedouro / Matadouro; 7.8-Ind. Química/ Farmacêutica/ Velas/ papel; 7.9-Demais atividades Industriais
(4) Residencial	4.1-Prédio ou residência s/ piscina; 4.2-Prédio ou residência c/ piscina; 4.3-Conjuntos Habitacionais.	(8) Serviços de saúde	8.1-Hospitais particulares; 8.2-Hospitais públicos.

Esta classificação é baseada na categorização cedida por uma empresa brasileira de distribuição de água. A ordem de importância de cada setor muda dependendo das características de cada município a qual a rede de distribuição pertence. Esta categorização foi baseada em uma cidade costeira onde o turismo, por exemplo, tem grande relevância. Em cada trecho de tubulação considera-se a classificação mais alta encontrada. Quanto maior a classificação do setor, menor deve ser o setor de manobra no qual se encontra este trecho. Isto se justifica, pois os impactos gerados pela falta de água em uma residência são consideravelmente menores do que a mesma falta em um hospital, por exemplo.

- ✓ **Cr₃ - Valor da tarifa:** montante total pago pelos usuários pela utilização da água. Para determinar o valor em cada conduto é utilizado o consumo médio de água de cada estabelecimento constituinte deste trecho de tubulação. A Tabela 3.2 apresenta as classes de tributação (em reais – R\$), baseada em valores cedidos por outra empresa brasileira de distribuição de água. Neste critério, quanto maior o valor, pior são as consequências da falta de água (do ponto de vista do fornecedor).

Tabela 3.2 – Tarifação (em reais) por mês

Consumo	$x \leq 10 \text{ m}^3$	Superior a 10 m^3				
		$10 < x \leq 20 \text{ m}^3$	$20 < x \leq 30 \text{ m}^3$	$30 < x \leq 50 \text{ m}^3$	$50 < x \leq 90 \text{ m}^3$	$x \geq 90 \text{ m}^3$
Residencial Social	5,25	+2,81/ m^3	+ 3,35/ m^3	+4,60/ m^3	+5,46/ m^3	+10,48/ m^3
Normal	24,52					
Comercial	36,07	+7,15/ m^3	+7,15/ m^3	+7,15/ m^3	+7,15/ m^3	+7,15/ m^3
Industrial	45,20	+9,58/ m^3	+9,58/ m^3	+9,58/ m^3	+9,58/ m^3	+9,58/ m^3
Pública	34,86	+5,29/ m^3	+5,29/ m^3	+5,29/ m^3	+5,29/ m^3	+5,29/ m^3

* Dado 'x' como a quantidade consumida de água.

- ✓ **Cr₄ – Consumo:** quantidade total média de água consumida no conduto. Quanto maior o consumo de água, maior é a insatisfação pela falta de água durante a interrupção do fornecimento, e, portanto, menor deve ser o setor de manobra no qual se encontra este trecho.

Embora o valor da tarifa e a quantidade consumida de água possam estar correlacionados, aqui estas características serão tratadas como independentes. Isto porque a informação que se deseja de ambos não são diretamente relacionadas. Sobre o valor da tarifa se está interessado em saber qual o montante monetário que a empresa arrecada naquele trecho em análise. Por ser uma empresa capitalista, esta vai priorizar o não desabastecimento de áreas onde as receitas são maiores. Enquanto sobre a taxa de consumo deseja-se saber o

volume de água consumido no trecho, pois quanto maior o volume, maiores são as chances da falta de água aos estabelecimentos durante uma manutenção.

Note que o número de pessoas atendidas pelo abastecimento de água em cada trecho de tubulação não foi considerado diretamente por ser difícil sua mensuração em setores tais como comerciais, hospitalares ou industriais. Contudo, sua influência é verificada, indiretamente, pelo consumo de água de cada estabelecimento.

3.1.2.2. Escolha do método multicritério

Como mencionado anteriormente, a escolha do método depende de vários fatores destacando-se as características do problema analisado, do contexto considerado, da estrutura de preferências do decisor e da problemática em si; as informações disponíveis e o seu grau de precisão; e a racionalidade requerida (compensatório ou não compensatório). (ALMEIDA, 2011; ALMEIDA & COSTA, 2003). Desta forma, deve-se analisar o cenário do problema em questão.

O processo de tomada de decisão pode ser realizado por um único decisor ou por um grupo de decisores. “A agregação em grupo envolve um procedimento analítico para agregar preferências de um grupo de decisores” (ALMEIDA *et al.*, 2012). Embora em ambientes como abastecimento de água as decisões sejam tomadas normalmente por um grupo de pessoas, tais como engenheiros, administradores, etc. Na aplicação deste modelo proposto considera-se apenas um decisor.

Neste caso, o primeiro ponto observado é que o método escolhido deve ser capaz de atribuir um peso ou constantes de escala aos critérios, pois, os critérios podem representar um fator de impacto diferente na decisão final de setorização. Além disso, para que o índice seja utilizado no modelo matemático de setorização para manobra é importante que o método multicritério utilizado seja capaz de resultar em um valor numérico, à agregação das características, para cada trecho de tubulação. Desta forma, os métodos que realizam seleção e classificação das alternativas não são adequados, restando os métodos de ranqueamento das alternativas. Porém apenas aqueles que, além de ranquear, também apresentam um valor final a cada alternativa (trecho de tubulação).

Outra questão relevante é sobre o processo de elicitação de parâmetros. Todos os métodos têm algum(s) parâmetro(s) à ser(em) elicitado(s), como por exemplo, as constantes de escala. É importante que o método escolhido tenha um processo de elicitação estruturado para facilitar ao decisor (ou grupo de decisores) a expressão de suas preferências. Além disso, é importante que este procedimento não demande do decisor conhecimentos específicos sobre

o método escolhido, pois a grande maioria dos decisores envolvidos na tomada de decisão, em redes de distribuição, tem apenas uma visão ampla sobre estes métodos.

Além disso, como as redes de distribuição de água não são estáticas, sofrendo constantes alterações e/ou ampliações, os métodos que realizam uma comparação entre pares de alternativas podem não ser apropriados, pois quando adicionado ou removido um trecho de tubulação a avaliação numérica dos demais trechos pode se alterar.

Além disso, das características levantadas, até o momento, há aquelas que privilegiam mais aos usuários (por exemplo, o número de unidades consumidoras atingidas – Cr_1) e aquelas que privilegiam mais a empresa (por exemplo, tarifação da água – Cr_3). Assim, parece interessante que haja uma compensação (*trade off*) entre estas características em cada trecho de tubulação, ou seja, um método de agregação compensatório pode ser mais apropriado neste caso. Para melhor compreensão, suponha os valores exemplificados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Método compensatório *versus* não compensatório

Matriz avaliação*			Método NÃO compensatório**					Método compensatório***	
Alternativas	Cr_1	Cr_3		T_1	T_2	T_3	Ganho (a)		$a-b=c$
T_1	0,50	0,95	T_1	-	1	1	2	0	$0,50*0,5 + 0,95*0,5 = 0,725$
T_2	0,60	0,50	T_2	1	-	2	3	2	$0,60*0,5 + 0,50*0,5 = 0,550$
T_3	0,55	0,45	T_3	1	0	-	1	-2	$0,55*0,5 + 0,45*0,5 = 0,500$
			Perda (b)	2	1	3			

*Os valores das avaliações estão normalizados entre 0 (pior valor) e 1 (melhor valor). ** O ganho representa o número de alternativas que são piores que aquela alternativa analisada, caso contrário é uma perda. *** Consiste na ponderação da avaliação pela constante de escala (0,5 para ambos os critérios).

Em um método não compensatório a perda em um critério não pode ser compensada com o ganho em outro critério. Assim, comparando T_1 com T_3 e T_1 com T_3 , a alternativa T_1 pode ser considerada indiferente às demais, pois cada alternativa ganha em apenas um dos critérios; enquanto, T_2 é melhor que T_3 , pois ganha em ambos os critérios. Comparando os ganhos com as perdas a ordem de preferência é $T_2 > T_1 > T_3$. Note, porém, que a diferença da preferência entre as alternativas T_1 e T_2 no segundo critério é maior que no primeiro critério. Sem compensação essa diferença não é considerada. Alguns métodos consideram limiares que tornam indiferentes as alternativas dentro de uma faixa de valores, mas, não há compensação das diferenças de preferências superiores à estas faixas. Já um método compensatório leva em consideração essa diferença entre as avaliações (preferências), realizando um *trade-off* entre os ganhos e as perdas. Neste caso, uma alternativa T_1 é preferível, uma vez que a perda no primeiro critério é menor do que o ganho no segundo.

Voltando as atenções ao caso do abastecimento de água, o decisor sempre irá preferir aquelas alternativas com maior tarifação àquelas com maior número de unidades consumidoras. Portanto, este *trade-off* é interessante, pois permite que o decisor admita que

um trecho de tubulação com baixa tarifação seja compensado pelo número de unidades consumidoras, devido ao carácter social relacionado. Ou seja, um *trade-off* entre o que é melhor para a empresa abastecedora e o que é melhor para os usuários, permitindo que a empresa seja bem quista pela sociedade por esta visão, sem contudo considerar os benefícios para ela.

Por fim, é de fundamental importância a verificação e a exploração de determinadas propriedades de independência que podem existir entre as preferências do decisor para várias quantidades em critérios diferentes (Keeney & Raiffa, 1976). No caso analisado é considerável que o decisor sempre irá preferir mais tarifação independentemente da quantidade de unidades consumidoras, ou seja, a quantidade destas não altera a preferência do decisor no critério tarifação da água.

Portanto, a partir das reflexões acima, destaca-se o método SMARTER (*Simple Multi-Attribute Rating Technique Extended to Ranking*) na agregação as avaliações para a geração do índice de priorização proposto, uma vez que ele atende a todos os requisitos levantados. É importante deixar claro que outros métodos podem ser considerados, a depender das características específicas de cada rede de distribuição de água, bem como das preferências dos decisores envolvidos.

3.1.3. Modelo matemático para setorização da rede

No modelo proposto assume-se que uma válvula de fechamento somente poderá ser colocada nos trechos de tubulação (t_{ij}) no ponto mais próximo de um nó i ou j . Isto para evitar, tanto quanto possível, seccionamentos nos trechos de tubulação ou mudança de vazão ou pressão em outras partes das tubulações. As alternativas são geradas, verificado um conjunto de possíveis combinações de válvulas em nós dos trechos de tubulações da rede de modo que atendam as restrições do problema com a mínima utilização destas. Logo, o modelo de setorização de manobra é definido como:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.1)$$

s.a.

$$V_i \leq \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad \forall t_{ij} \neq \text{trecho principal} \quad (3.2)$$

$$T_1 \leq (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} * a_{ij}) \leq T_2 \quad \forall t_{ij} \quad (3.3)$$

$$\begin{matrix} e/ou \\ T_1 \leq (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} * d_{ij}) \leq T_2 \end{matrix} \quad \forall t_{ij} \quad (3.4)$$

$$\begin{matrix} e/ou \\ T_1 \leq (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} u_{ij}) \leq T_2 \end{matrix} \quad \forall t_{ij} \quad (3.5)$$

$$\sum \sigma_{ij} \leq w \quad \forall t_{ij} \neq \text{trecho principal} \quad (3.6)$$

Em que:

V_i – Número de válvulas no nó i ;

T_1 – Limite inferior para aquele parâmetro;

T_2 – Limite superior para aquele parâmetro;

t_{ij} – Trecho que liga o nó i ao j (informa se existe ligação entre i e j);

a_{ij} – Área de abastecimento compreendida pelo trecho t_{ij} ;

d_{ij} – Comprimento do trecho t_{ij} ;

u_{ij} – Número de unidades consumidoras (ou economias) que estão entre o nó i ao j ;

σ_{ij} – Índice de priorização do trecho t_{ij} ;

w – Limite superior ao somatório dos σ_{ij} .

A função objetivo (3.1) pretender minimizar o número de válvulas de fechamento endereçadas ao nó i , tal que $i = \{1, 2, \dots, n\}$. Significa dizer que se deseja o mínimo de válvulas, para minimizar os custos da empresa abastecedora de água, que seja capaz de setorizar a rede, atendendo às restrições do modelo, localizadas na realidade antes ou após o nó i (antes do nó i significa o nó j do trecho de tubulação que precede o nó). Assim, a função objetivo generaliza a localização das válvulas como sendo no nó ' i '.

A restrição (3.2) estabelece que o número de válvulas no nó i deve ser menor ou igual ao número de tubulações que se interligam naquele nó. Ou seja, dados quatro trechos de tubulações interligados em um nó i (união tipo cruzeta X), por exemplo, o número de válvulas endereçadas a este nó deve ser $V_i \leq 4$.

A restrição (3.3) estabelece um limite para a área total de um setor de manobra. A restrição (3.4) estabelece um limite para a extensão total de um setor de manobra. A restrição (3.5) estabelece um limite para o número total de unidades consumidoras em um setor de manobra. Estas restrições foram baseadas na NBR 12218/94 que estabelece limites à região setorizada, com o intuito de guiar os técnicos no momento da setorização, conforme descrito no Capítulo 2. É importante que pelo menos uma das restrições seja atendida.

Para tornar o modelo abrangente os limites das restrições (3.3), (3.4) e (3.5) são deixados à cargo da empresa abastecedora, visto que em muitos países não existe este tipo de norma. Além disso, nos limites aconselhados pelas normas brasileiras, não há correlação clara entre o limite superior do tamanho da área e o limite inferior do comprimento dos trechos. Ou seja, a área compreendida por 7.000 metros de trecho, em uma rede malha, por exemplo, será superior a 200.000 m^2 (limite superior da área de um setor pela norma).

Além disso, 7.000 metros de trecho (limite inferior para o comprimento dos trechos de um setor) é uma área muito extensa quando se pensa em benefícios a sociedade. No exemplo de setorização apresentado no Capítulo 2, uma rede de distribuição de água de uma pequena cidade, com ± 16.000 habitantes ou 3.000 unidades consumidoras (ou economias), os limites da NBR 12218/1994 permitem que haja apenas um setor de manobra, se tal localidade

constituir uma única zona de pressão. Assim, verifica-se que os limites da norma são generalistas demais para maximizar os benefícios da setorização de manobra, uma vez que qualquer atividade de manutenção da rede seja necessária, levará ao desabastecimento momentâneo de todas as unidades consumidoras.

Portanto, acredita-se que os limites devem ser revistos. Apesar disso, uma setorização puramente realizada com limites menores poderia elevar os custos da empresa com a setorização de regiões com baixo impacto a falta de água simplesmente pelo tamanho espacial da mesma. Assim, neste trabalho, ao invés de alterar estes limites, propõem-se uma restrição adicional, a restrição (3.6), que estabelece um limite superior ao somatório dos índices de priorização dos trechos constituintes de um setor de manobra. O objetivo desta restrição é restringir o impacto da falta máximo de um setor. Assim, quanto menor o índice de priorização (impacto) dos trechos maior tenderá a ser o setor constituído por estes e *vice-versa*.

Para entender melhor como é realizado o somatório dos índices é preciso antes delimitar o que seriam os setores considerados. Na prática, em redes ramificadas e mistas é comum a presença de setores menores dentro de setores maiores, ou seja, é possível fechar uma área menor dentro de uma região já setorizada. Para exemplificar, considere a Figura 3.3, ao alocar uma válvula após o nó 2 no trecho [3] um setor será gerado com os trechos [3], [4], [5], [6], [7], [8] e [9]. Ao se adicionar uma válvula após o nó 4 no trecho [5] um setor menor será isolado com os trechos [5], [8] e [9]. Ele é considerado setor menor porque sempre que a válvula que isola o setor for acionada, este setor menor será desabastecido também.

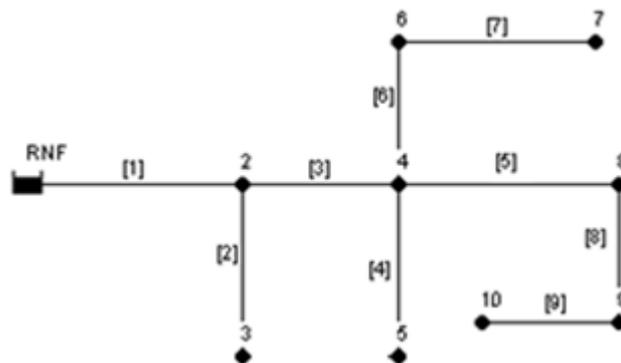


Figura 3.3. Ilustração para setorização

Para o atendimento da restrição (3.6) considere $\sum \sigma_{setor} = \sum \sigma_{total_setor} - \sum \sigma_{setor\ menor}$, ou seja, descontar os índices de priorização dos setores menores ao realizar o somatório do índice de priorização do setor. Em redes malhadas não ocorrer a formação de setores menores.

Contudo, a determinação do limite superior ‘w’ para o somatório dos índices de priorização não é algo intrínseco. Quanto maior o valor de ‘w’ menor tende a ser o número de

setores necessários para atender as restrições e, conseqüentemente, menor será a utilização das válvulas, sendo assim menor o custo à empresa, mas também menor os benefícios gerados às unidades consumidoras. Assim, propõe-se a geração de soluções variando o valor de ‘w’.

Logo, dado um máximo $w = 'x'$, um mínimo $w = z$ e uma variação para o valor igual a ‘y’, em que $y < x$, faça $w = \{x, x-y, x-2y, x-3y, \dots, z\}$. Assim, dado um w , se $\sum \sigma_{ij} \leq w$ para cada setor e, também, para as tubulações não setorizadas a solução é admissível, caso contrário deve-se alterar a setorização.

Porém, para dar continuidade a este trabalho deve-se esclarecer como se comporta o fluxo de água em uma rede de distribuição e como se realiza o cálculo da área de um trecho de tubulação.

3.1.3.1. Fluxo de água em setores de manobra

A Figura 3.4 apresenta uma ilustração do comportamento do fluxo de água em uma rede malhada.

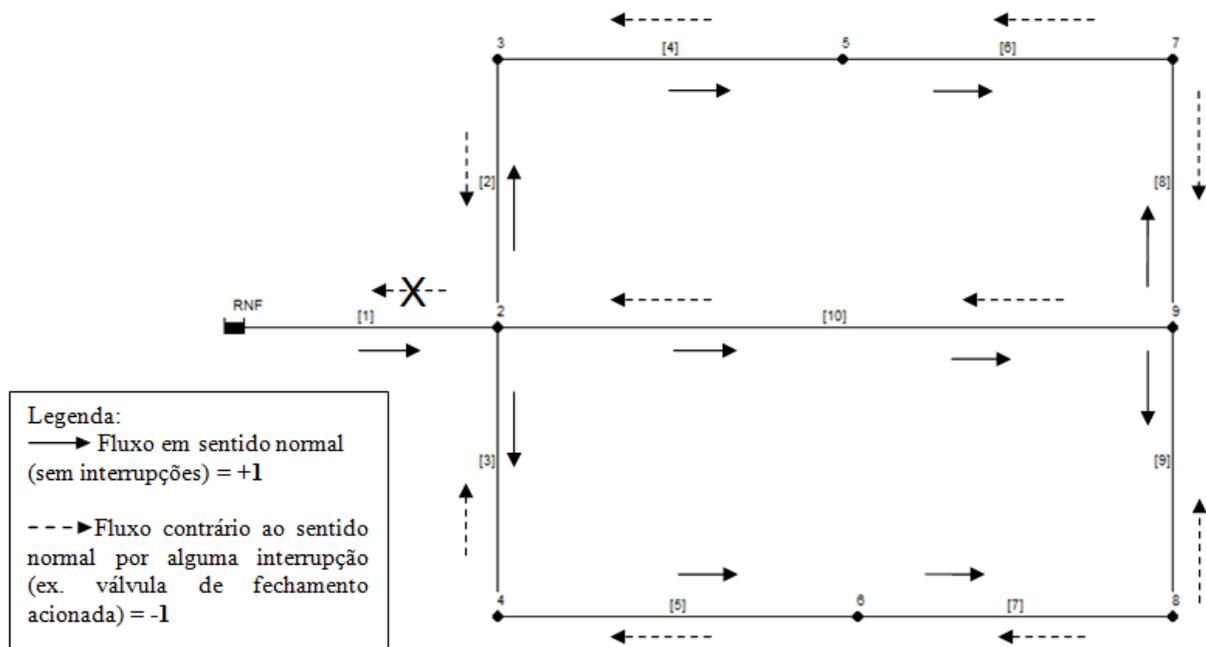


Figura 3.4. Fluxo de água em uma rede malhada

Na Figura 3.4, pode ser ver que o fluxo normal (representado pelo sinal positivo, +1) ocorre no sentido das setas preenchidas, do reservatório (RNF) para os trechos de tubulação. Contudo, quando ocorre algum tipo de interrupção na rede de distribuição de água o sentido do fluxo pode se alterar, fluxo contrário (representado pelo sinal negativo, -1), conforme as setas pontilhadas. Note ainda que não existe reversão do fluxo no trecho [1], isto porque ele

alimenta a rede de distribuição e, portanto, se o fluxo nele for interrompido não haverá fluxo contrário, com exceção de rede com múltiplos reservatórios, em que há chances disso acontecer.

Para que haja um setor de manobra seu fluxo deve ser nulo ao se fechar uma ou mais válvulas. Assim, para que a localização de uma válvula faça sentido na rede seu fechamento isolado, ou em conjunto com outra(s) válvula(s), deve interromper o fluxo de água nos trechos constituintes do setor. Na Figura 3.4, ao alocar uma válvula no nó 4 no trecho [5], o fluxo de água não é interrompido em nenhum trecho devido ao fluxo contrário que a água pode executar. Neste caso, uma solução de setorização que apresente apenas esta válvula não é admissível.

Em redes de distribuição de água ramificadas este fluxo contrário não ocorre, ou seja, o fluxo é unidirecional. Assim, o fluxo de água é sempre fechado após a alocação de uma válvula.

3.1.3.2. Cálculo da área dos trechos de tubulação

No Capítulo 2 foi apresentada uma medição da área de um setor de manobra. No exemplo os autores dimensionaram uma rede malhada, em que, facilmente, pelas coordenadas x e y obtiveram a área do setor.

Contudo, para a aplicação do modelo proposto se faz necessário conhecer a área de um trecho de tubulação. Esta área será entendida aqui como uma área de influência ou de representatividade de um trecho. Primeiramente, pensou-se em somar a área das economias abastecidas diretamente por cada trecho, o que constituiria sua área. Porém, a área do setor de manobra não compreende apenas a área das economias, pois, existem as áreas das ruas, calçadas e, até mesmo, lotes baldios que não constituem uma economia. Além disso, tubulações principais não abastecem diretamente as economias, mas fazem parte da área de abrangência de um setor de manobra.

Desta maneira, para estimar um valor aproximado da área que represente um trecho, primeiramente, deve-se delimitar a área total da rede analisada. A Figura 3.5 apresenta a delimitação para a rede malhada apresentada anteriormente.

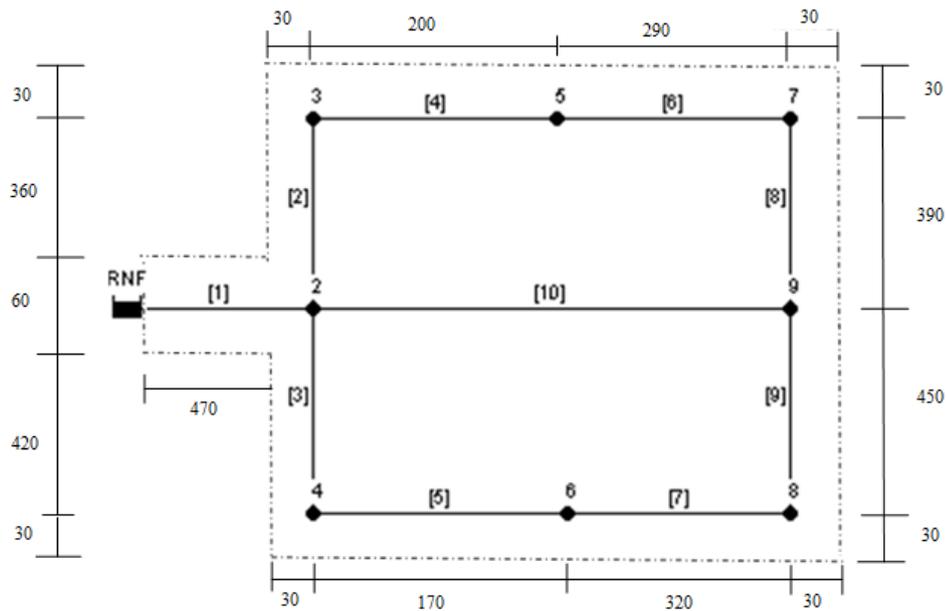


Figura 3.5. Cálculo da área da rede malhada

Com esta configuração a área total da rede será: $A = 470 \cdot 60 + 550 \cdot 900 = 523.200 \text{ m}^2$. Assim, para estipular uma área por trecho, este trabalho fará uma relação de proporcionalidade entre a área total da rede e o tamanho de cada trecho. Portanto, dada a soma dos tamanhos dos trechos, a área proporcional a cada trecho é mostrada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Cálculo da área da rede malhada

Trecho	Comprimento (a)	% (c) = (a) / (b)	$A_{ij} = A \cdot (c)$
[1]	500	13,70%	71.671,23
[2]	390	10,68%	55.903,56
[3]	450	12,33%	64.504,11
[4]	200	5,48%	28.668,49
[5]	170	4,66%	24.368,22
[6]	290	7,95%	41.569,32
[7]	320	8,77%	45.869,59
[8]	390	10,68%	55.903,56
[9]	450	12,33%	64.504,11
[10]	490	13,42%	70.237,81
Total	$\Sigma = 3650 \text{ m (b)}$	100,00%	$523.200,00 \text{ m}^2$

Para uma rede ramificada, apresentada anteriormente, tem-se as medidas apresentadas na Figura 3.6.

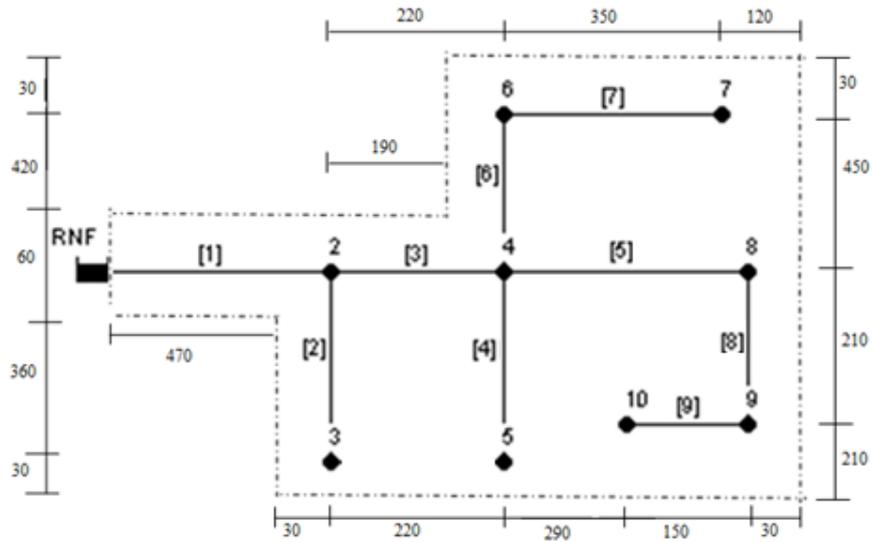


Figura 3.6. Cálculo da área da rede ramificada

Com esta configuração a área total da rede será: $A = 470 \cdot 60 + 220 \cdot 450 + 500 \cdot 900 = 577.200 \text{ m}^2$. Portanto, dado a soma dos tamanhos dos trechos, a área proporcional a cada trecho é conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Cálculo da área da rede ramificada

Trecho	Comprimento (a)	% (c) = (a)/ (b)	$A_{ij} = A \cdot (c)$
[1]	500	16,13%	93.102,36
[2]	390	12,58%	72.611,76
[3]	220	7,10%	40.981,20
[4]	390	12,58%	72.611,76
[5]	440	14,19%	81.904,68
[6]	450	14,52%	83.809,44
[7]	350	11,29%	65.165,88
[8]	210	6,77%	39.076,44
[9]	150	4,84%	27.936,48
Total	$\Sigma = 3100 \text{ m (b)}$	100,00%	$577.200,00 \text{ m}^2$

É importante destacar que a área calculada retrata apenas uma representatividade, aproximação, da área de cada trecho e não a área exata.

3.1.4. Análise do conjunto de soluções admissíveis

Para cada valor de ‘w’ um conjunto de soluções admissíveis será gerado. Deste conjunto, a melhor solução será aquela que apresentar o menor número válvulas utilizadas. Caso duas ou mais soluções apresentarem o menor número de válvulas, deve-se escolher aquela que formou o maior número de setores para manobra.

Persistindo o empate, escolher aquela solução em que a variância da média dos $\sum \sigma_{ij}$ dos setores seja a menor, indicando uma melhor distribuição dos índices de priorização pelos setores formados. Ou seja, além de atender a restrição (3.6) em todos os setores formados a solução apresenta a melhor distribuição dos impactos da falta de água entre estes setores.

Para calcular esta variância, seja o número de setores $a = \{1, 2, \dots, n\}$ e o número de trechos no setor $b = \{1, 2, \dots, m\}$, tem-se:

$$M_a = \frac{\sum_{b=1}^m \sigma_{setor\ a}}{\sum_{b=1}^m t_{setor\ a}} \quad (3.7)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n M_a \quad (3.8)$$

$$Var = \frac{1}{n} \sum_{a=1}^n (M_a - \bar{M})^2 \quad (3.9)$$

Desta forma, a equação (3.7) calcula o índice de priorização médio por trecho de tubulação de um setor; a equação (3.8) calcula a média dos índices de priorização médios; por fim, a equação (3.9) calcula a variância da média dos índices de priorização médios.

Note que, caso haja algum setor menor dentro de um setor, haverá um $\sum \sigma_{setor\ menor}$ (considerado como setor) e um $\sum \sigma_{setor} = \sum \sigma_{seto\ total} - \sum \sigma_{setor\ menor}$. Note ainda que algumas soluções não irão setorizar todos os trechos secundários. Estes trechos serão considerados hipoteticamente como um setor para avaliar a solução (setor dos trechos remanescentes). Os trechos primários não devem entrar na média do somatório dos índices de priorização ($\sum \sigma$), pois eles não apresentam índice de priorização.

3.1.5. Trade-off entre custos e benefícios da setorização de manobra proposta

Na geração do índice de priorização verificou-se que um trecho com índice próximo de 1,0 significa que um abastecimento de água naquele trecho tem um impacto maior do que em um trecho com índice próximo de zero, seja pelos setores econômicos localizados neste trecho, seja pelo elevado consumo de água, por exemplo.

Assim, o valor do parâmetro w estabelece uma relação de nível de serviço oferecido pela setorização. A formação de setores baseados neste parâmetro consegue limitar o número de unidades consumidoras com elevado impacto presentes em um setor. Desta maneira, quando uma interrupção de água for inevitável o impacto total pode ser menor do que em uma setorização que não leve em consideração as características das unidades consumidoras.

Contudo, o estabelecimento do parâmetro w é a etapa mais difícil deste modelo. É complicado para um decisor estabelecer uma limitação para o impacto máximo ($\sum \sigma_{ij}$)

permitido em um setor. Assim, para auxiliar no processo de decisão foi proposto realizar uma variação do valor do parâmetro 'w'. As melhores soluções, resultantes de cada 'w' terão um custo e um benefício. Após isto, o decisor deve fazer um *trade-off* entre estes benefícios gerados pela setorização (quanto maior o número de válvulas, maior o número de setores e, conseqüentemente, maiores serão os benefícios gerados) com os custos (quanto maior o número de válvulas, maiores serão os custos associados á sua implantação e manutenção).

Desta forma, o custo será medido pelo número de válvulas, enquanto o benefício será medido pelo número de setores gerados, uma vez que o impacto já foi considerado como restrição a setorização. Contudo, nem todas as soluções de setorização irão abranger todos os trechos da rede. Assim, seja t_{ij} um trecho de tubulação, o benefício de uma solução de setorização é dado pela multiplicação entre o número de setores gerados e a porcentagem de trechos (t_{ij}) setorizados, conforme equação (3.10).

$$\text{Benefício} = (n^{\circ} \text{setor gerado}) * \left(\frac{\sum t_{ij} \text{setorizados}}{\text{total de } t_{ij}} \right) \quad (3.10)$$

Contudo, quando houver a formação de setores menores deve ser acrescentado um benefício, que embora seja menor do em um setor, ele apresenta um benefício relativo. Desta maneira, dado n setores menores, $i=\{1, 2, 3, \dots, n\}$, o benefício de um setor menor i é ponderado pela porcentagem p_i de trechos do setor maior após a válvula adicionada (setor menor). Por exemplo, dado um setor com 5 trechos, ao adicionar uma válvula subsetorizando dois destes trechos, tem-se: benefício = 1 (setor) + 0,40 (2 trechos /5 trechos). Portanto, o benefício total, na rede de distribuição, neste caso, é calculado como mostra a equação (3.11).

$$\text{Benefício} = (n^{\circ} \text{setor} + (\sum_{i=1}^n \text{setor}_{\text{menor } i} * p_i)) * \left(\frac{\sum t_{ij} \text{setorizados}}{\sum t_{ij}} \right) \quad (3.11)$$

Para que seja possível comparar custo e benefício, estes devem estar na mesma unidade de medida. Desta forma, em ambos os casos o melhor valor receberá o valor 1,0 enquanto que o pior receberá o valor 0,0. Entre o valor máximo e mínimo as alternativas devem ser normalizadas. No caso do custo o pior valor é aquele de maior número de válvulas, assim, a normalização é realizada pela regra $v'_j(a_i)=[v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]/[\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]$, conforme discutido no Capítulo 3. Enquanto, que para o benefício gerado quanto maior o número de setores menor a parcela de pessoas atingidas pelo desabastecimento, portanto, uma relação inversa. Sua normalização será feita pela regra $v'_j(a_i)=[\text{Max } v_j(a_i) - v_j(a_i)]/[\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]$.

Portanto, é possível verificar qual alternativa adotar comparando seu custo com seu benefício pelo ponto de equilíbrio entre estes. Porém, acredita-se que, nem sempre o ponto de equilíbrio constitui exatamente em uma solução, mas este procedimento diminui o

subconjunto de soluções a serem analisadas, tornando o trabalho do decisor menor, ou seja, será mais fácil para ele analisar qual solução adotar.

Além de facilitar o processo decisório esta análise traz uma informação adicional sobre os custos de cada solução. Assim, caso a empresa abastecedora de água apresentar alguma restrição orçamentária, no momento da análise, esta pode adotar aquela alternativa que possa ser implantada com o orçamento disponível e, ao mesmo tempo, que retorne o benefício maior tanto quanto possível.

3.1.6. Decisão final

Dado um grande conjunto de possíveis soluções, o modelo é capaz fornecer um subconjunto destas, facilitando a decisão final. Porém, é importante destacar que o modelo deve ser usado para auxiliar na decisão, ficando a cargo da experiência dos decisores avaliarem a efetivação da solução dada pelo modelo. Por este fato, a última etapa do modelo geral de setorização de manobra é a avaliação do decisor ou grupo de decisores. Neste trabalho considerou-se apenas um decisor.

3.2. Algoritmo determinístico do modelo de setorização para manobra

Considerando-se uma busca por todas as soluções possíveis, as etapas de busca pode ser feito seguindo os passos descritos a seguir. Para dar continuidade é importante definir o que é uma solução inicial para o modelo. Conforme normas da NBR 12218/94, relatadas no Capítulo 2, uma válvula deverá ser prevista junto ao ponto de ligação entre trechos secundários e trechos principais (tronco). Ou seja, se t_{ij} for um tronco e estiver interligado no nó j a um trecho secundário, deve-se prever uma válvula de manobra após o nó j .

Por exemplo, a Figura 3.4, ao considerar apenas o trecho [1] como principal (tronco), três válvulas após o nó 2 nos trechos [2], [3] e [10] seriam inseridas na solução inicial conforme a norma. Esta norma não exige a alocação destas válvulas, apenas sugere este tipo de alocação. Contudo, nenhuma informação sobre as características socioeconômicas das economias abastecidas por cada trecho foi considerada. Em certas redes esta condição pode demorar a utilização de válvulas, ou seja, os benefícios gerados não compensam os custos.

Assim, no modelo proposto considera-se soluções iniciais sem o atendimento prévio desta norma e com o seu atendimento *a priori*. Além disso, em casos reais algumas válvulas já podem existir na rede e devem ser consideradas, pois, se pretende setorizar sem para isto

retirar válvulas já alocadas. Assim, tanto as válvulas existentes quanto as válvulas alocadas pela NBR 12218/94 serão fixas na rede e é verificado se é preciso alocar mais alguma válvula.

Com base nas informações já apresentadas a resolução do problema é resumida pela Figura 3.7.

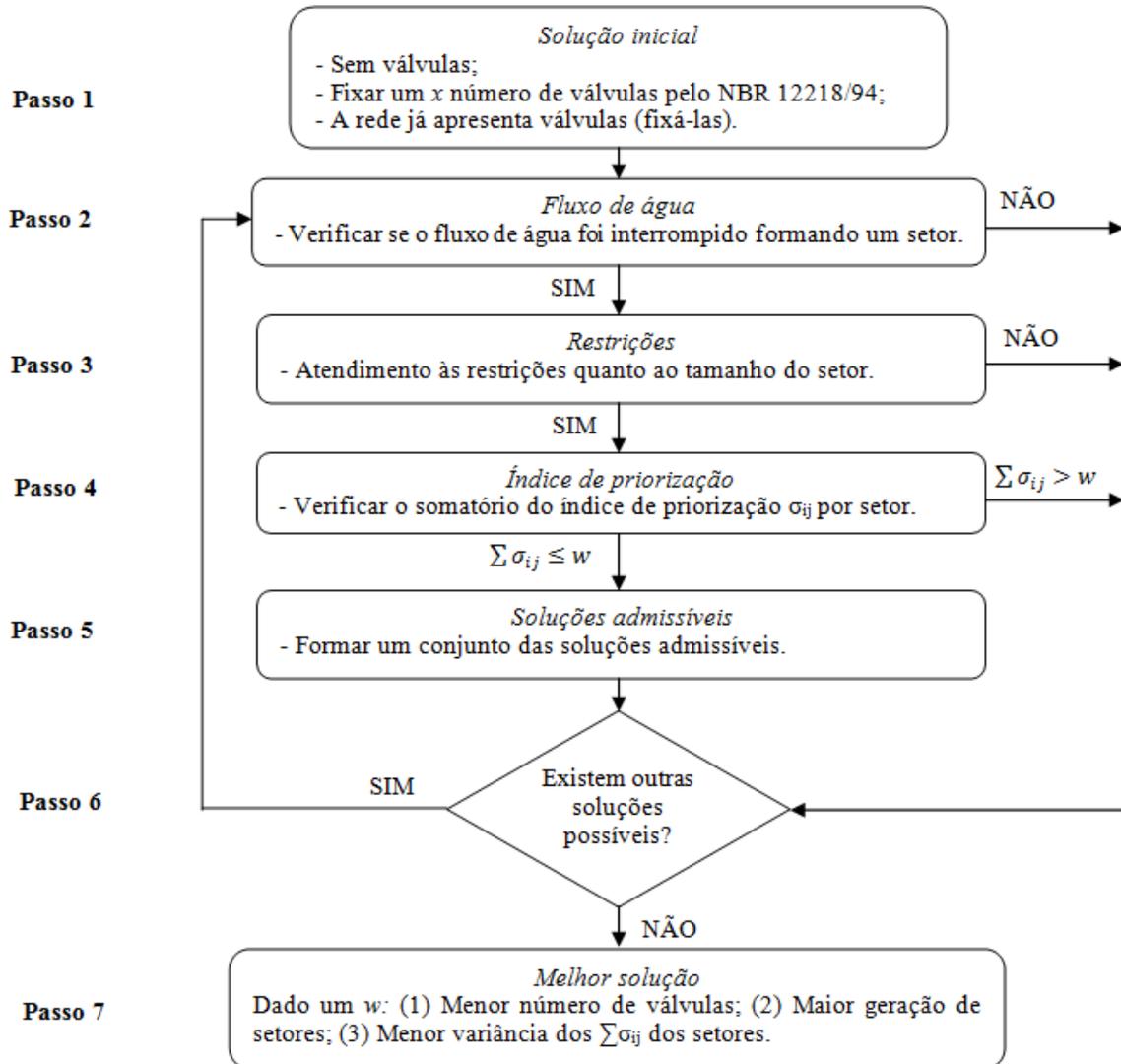


Figura 3.7. Sumarização do algoritmo determinístico do modelo proposto

Passo 1: Para iniciar o procedimento deve-se considerar uma solução inicial, ou seja, uma solução com determinado número de válvulas e sua localização estabelecidos *a priori*. Como explicado, existem três possibilidades para isto:

- ✓ Admitir que não existem válvulas de fechamento na rede;
- ✓ Admitir as normas da NBR 12218/1994, alocando as válvulas à rede e tornando-as fixas no modelo.
- ✓ Considerar as válvulas que possam existir na rede e também fixá-las.

Passo 2: Verificar o fluxo de água.

- ✓ Para um número de válvulas = 0 (ir para o passo 3);
- ✓ Para um número de válvulas > 0:
 - Verifique o fluxo da água após uma válvula ou entre válvulas;
 - Se o fluxo de água é isolado = solução admissível (ir para o passo 3);
 - Caso contrário = solução não admissível (ir para o passo 6).

Passo 3: Dadas as restrições a seguir: (a) Área: $T_1 \leq (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} * a_{ij}) \leq T_2$; (b) Comprimento: $T_1 \leq (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} * d_{ij}) \leq T_2$; e (c) Número de economias: $T_1 \leq (\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} u_{ij}) \leq T_2$. Verifique se pelo menos uma destas é atendida pelo setor formado. Caso (b) e (c) estiverem abaixo do limite inferior (T_1) desconsidere o limite superior (T_2) da área (a).

- ✓ Se sim = setor admissível (passe para o passo 4);
- ✓ Caso contrário = Setor não admissível (ir para passo 6).

Passo 4: Verificar o somatório do índice de priorização σ_{ij} para cada setor formado. Note que, uma vez que cada trecho pode constituir um setor, o valor de w não pode ser menor que o maior dos índices de priorização dos trechos (σ_{ij}).

- ✓ Se $\sum \sigma_{ij} \leq w$ em todos os setores e, também, dos trechos não setorizados = solução admissível (ir para o passo 5).
 - Se existir setores menores, considerar: $\sum \sigma_{setor_maior} = \sum \sigma_{total_setor} - \sigma_{setor_menor}$;
- ✓ Caso contrário ($\sum \sigma_{ij} > w$) = solução não admissível (ir para o passo 6).

Passo 5: Formar um conjunto com todas as soluções admissíveis encontradas.

Passo 6: Verificar a existência de outras soluções que possíveis:

- ✓ Sobre a solução inicial, alocar uma ou mais válvula na rede, alternado sua localização em cada rodada do algoritmo (volte ao passo 2).
- ✓ Após todas as possíveis soluções serem analisadas ir para o passo 7.

Passo 7: A solução do problema será aquela solução admissível que resultar na menor utilização de válvulas de fechamento. Em caso de haver mais de uma solução com o menor número de válvulas:

- ✓ Preferir aquela solução que resultou no maior número de setores;
- ✓ Persistindo o empate, escolher aquela solução em que a variância da média dos $\sum \sigma_{ij}$ dos setores seja a menor, indicando uma melhor distribuição dos índices de priorização pelos setores formados.
- ✓ Por fim, as soluções empatadas serão consideradas tecnicamente indiferentes.

3.3. Síntese conclusiva

Este capítulo foi iniciado com a proposição de um modelo de setorização para manobra que considera as características das unidades consumidoras. Primeiramente foi apresentado o modelo geral proposto. Para sua aplicabilidade fez-se necessário o cálculo aproximado da área de influência de cada trecho sobre a área total da rede de distribuição analisada. Desta forma, foi proposto um cálculo para gerar essa aproximação da área. Esta área não é exata, mas apresenta uma boa representatividade do verdadeiro valor.

A proposta de geração de um índice de prioridade para cada trecho de tubulação constituinte da rede de abastecimento de água foi descrita. Este é utilizado no modelo de setorização de manobra com o objetivo de distribuir o impacto da falta de água entre os setores gerados. Para a geração do índice foi utilizado um método de agregação multicritério, o SMARTER. Embora existam outros métodos de agregação multicritério, este se mostrou adequado ao cenário aqui apresentado.

No modelo proposto uma das restrições refere-se a definição de um parâmetro w que estabelece o limite superior a soma dos índices de priorização dos trechos de cada setor. Contudo, definir este parâmetro não é uma tarefa fácil para os responsáveis da empresa abastecedora de água. Por isto, sugeriu-se a verificação de todas as melhores soluções para diferentes faixas do valor deste parâmetro. A escolha da solução a adotar pode ser feita pela avaliação custo *versus* benefício de cada alternativa. O ponto de equilíbrio entre custo *versus* benefício aponta a melhor ou as melhores soluções para aquela rede, pensando na minimização dos custos e maximização dos benefícios.

Por fim, um algoritmo determinístico foi apresentado para a busca pelas soluções admissíveis.

4. APLICAÇÃO DO MODELO DE SETORIZAÇÃO PARA MANOBRA DESENVOLVIDO

No capítulo anterior foi proposto um modelo de setorização de manobra que utiliza um índice gerado pela agregação de algumas características das unidades consumidoras. Contudo, é importante demonstrar a sua aplicação para verificar as consequências na rede de distribuição de água. Assim, neste capítulo são gerados cenários que serão simulados na sequência, verificado e analisado seus resultados. Contudo, observou-se a necessidade do uso de um método heurístico para geração das soluções e, assim, propõem-se um Algoritmo Genético. Para ilustrar este algoritmo um software para redes ramificadas foi desenvolvido.

As redes apresentadas foram desenvolvidas com o auxílio do software gratuito EPANET 2.0, versão Brasil. Todos os dados apresentados são ilustrativos, sendo alguns deles baseados em dados cadastrados por uma empresa brasileira distribuidora de água. Nos exemplos, aqui relatados, assume-se que exista apenas um reservatório, ou seja, apenas um ponto de origem do abastecimento de água à rede de distribuição. E, ainda, neste reservatório já exista mecanismos de fechamento do fluxo de água para a rede de distribuição, caso seja necessário acioná-lo.

Segundo Heller & Pádua (2006) o diâmetro destas válvulas de fechamento é o mesmo da tubulação em que a válvula é instalada. Além disso, nos diâmetros maiores, seus custos de aquisição e de instalação são bastante significativos, o que é mais uma justificativa para o seu uso em quantidade que seja a mínima indispensável. Creaco *et al.* (2010) também apresentaram, em seu trabalho, que o custo da colocação das válvulas aumenta com o diâmetro das mesmas.

Assim, nos exemplos apresentados neste Capítulo, a alocação de válvulas de manobra em tubulações principais não será permitida, visto que estas apresentam os maiores diâmetros e, conseqüentemente, maior custo. Esta limitação se justifica, também, pelo fato que os trechos primários não apresentam um impacto da falta de água diretamente associado. Além disso, em uma ampliação da rede, aqueles condutos principais, que abastecia certo número de condutos secundários, irão abastecer um número maior de condutos e, assim, a válvula no conduto principal pode não atender às restrições desta rede ampliada. Por estes e outros motivos, que na prática é verificado válvulas inativas ou ineficientes. Desta forma, apenas os condutos secundários poderão ser setorizados.

É importante frizar que em problemas reais uma análise técnica da necessidade de válvulas nos condutos principais deve ser feita antes de limitar sua localização. Quando for admitida esta localização, bem como quando os trechos secundários apresentarem diâmetros diferentes, os custos das válvulas devem ser relacionados ao diâmetro para a análise do custo *versus* benefício. Devido à limitação feita, nas simulações apresentadas na sequência não foi necessária esta diferenciação.

4.1. Aplicação do SMARTER para a obtenção do índice de priorização

Como relatado no Capítulo 3, após a escolha do método de agregação, em que se optou pelo SMARTER, é dada sequência à geração do índice com a aplicação do método SMARTER. A primeira etapa do uso do SMARTER é definir os critérios e alternativas, conforme feito anteriormente (Capítulo 3). As alternativas serão os trechos da rede de distribuição malhada apresentada na Figura 4.1.

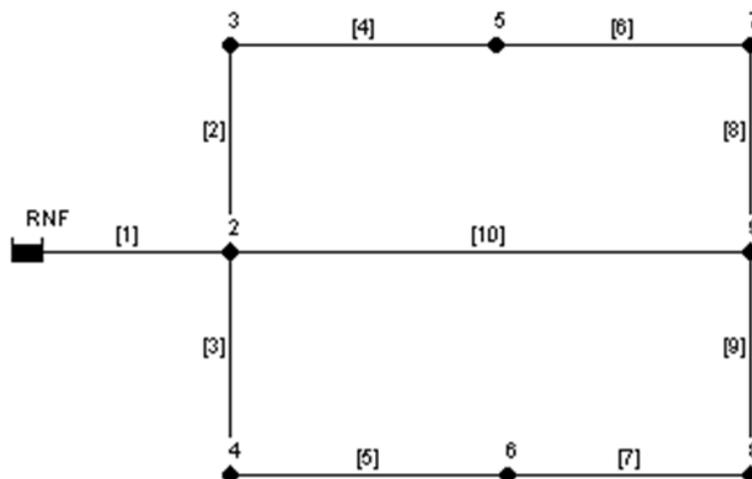


Figura 4.1. Ilustração da rede malhada para obtenção dos índices de priorização

Em seguida, deve-se levantar a avaliação de cada alternativa em cada critério. Para esta avaliação, para cada trecho de tubulação (alternativas), todas as unidades consumidoras presentes no trecho são consideradas. Para os critérios Cr_1 , Cr_3 e Cr_4 é realizada a soma dos valores de referência, enquanto que para o critério Cr_2 é verificado a maior categoria de setor econômico presente no trecho. Para exemplificar, suponha os valores da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Exemplo da geração dos valores dos trechos da tubulação

Trecho	Estabelecimento	Cr_1 - n° economias	Cr_2 - Setor	Cr_3 - Tarifa (R\$)	Cr_4 - Consumo (m^3)
[0]	A ₁	1	1	5,25	10
	A ₂	1	4	24,52	9
	A ₃	1	1	5,25	7
	A ₄	1	3	64,67	14
Total		4	4	99,69	40

Na Tabela 4.1 pode-se ver um trecho [0] com um total de 04 unidades consumidoras, uma quantidade média total de água consumida de $40 m^3$, o valor da tarifa média total do trecho é de R\$ 99,69 e a maior categoria de setor econômico presente é 4. Para aplicar o SMARTER são estes valores totais que representariam um trecho [0].

Além de ilustrar a geração dos valores que representará cada trecho, pode-se ver na Tabela 4.1 uma miscigenação de setores em um mesmo trecho de tubulação. Isto se justifica em muitos municípios brasileiros como, por exemplo, Recife (PE) onde, segundo Koster & Nuijten (2012), abriga muitas favelas, resultantes de ocupações ilegais de terras públicas e privadas. Estas favelas estão localizadas ao longo dos manguezais e canais que cortam a cidade, do centro para a periferia, resultando em uma paisagem urbana em que modernos bairros de classe média estão situados ao lado de favelas carentes.

Lembre-se que trechos primários não abastecem diretamente as unidades consumidoras e, portanto, não será possível calcular o índice de priorização para estes, pois não haverá unidades consumidoras diretamente associadas. Por isto, para aplicar o modelo de setorização de manobra é adotado o valor 0 como índice de priorização das tubulações principais. Uma vez que estas não estão influenciando diretamente nenhuma unidade consumidora na rede de distribuição.

Assim, considerando que todos os trechos apresentados na Figura 4.1 como secundários, exceto o trecho [1], a matriz de avaliação alternativa (trecho) *versus* critérios é resumida na Tabela 4.2. Os dados são ilustrativos, gerados a partir de uma base de cadastros de uma empresa brasileira distribuidora de água.

Tabela 4.2 – Matriz de avaliação das alternativas vs. critérios

Trecho	Nó (i)	Nó (j)	Cr_1 - nº economias (unidades)	Cr_2 – Setor (categoria)	Cr_3 – Tarifa (R\$)	Cr_4 – Consumo* (m^3)
[1]	RNF	2	--	--	--	--
[2]	2	3	11	4	8.970,00	1.430
[3]	2	4	12	4	10.210,00	1.600
[4]	3	5	6	5	3.855,00	700
[5]	4	6	15	4	9.090,00	1.650
[6]	5	7	17	4	15.860,00	2.400
[7]	6	8	18	6	22.240,00	2.450
[8]	9	7	20	5	18.170,00	2.640
[9]	9	8	11	4	8.135,00	1.350
[10]	2	9	12	5	16.500,00	1.850

* Destaca-se que, em geral, prédios residenciais apresentam apenas uma unidade consumidora e, portanto, podem apresentar elevado consumo devido ao número de apartamentos que se abastecem da mesma unidade.

Na sequência, é necessário que todas as avaliações estejam na mesma escala de medida. Por este motivo é importante realizar um procedimento de normalização. Almeida (2011) apresentou três procedimentos de normalização (relatados no Capítulo 2). Para definir qual

procedimento adotar é preciso entender melhor as escalas de medida de cada critério. Analisando os critérios levantados tem-se Cr_1 (número de economias), Cr_3 (tarifas da água) e Cr_4 (consumo) que estão registrados em uma escala de razão, uma vez que o ponto zero é claramente uma ausência de valor. Enquanto o critério Cr_2 (Tipo de setor) registra as alternativas em uma escala intervalar, na qual existe uma ordem clara, com a distância entre as avaliações definidas e o ponto zero é apenas um ponto de referência.

Assim sendo, respeitando a hierarquia das medidas e tornando todas as avaliações na mesma escala (intervalar), o procedimento de normalização adotado será o $(v'_j(a_i)=[v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)]/[\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)])$. Os valores serão expressos entre 0 e 1, em que 0 é a pior alternativa e 1 a melhor alternativa em cada critério, independentemente se o seu objetivo é maximizar ou minimizar naquele critério. No caso deste trabalho busca-se a maximização em todos os critérios.

Depois é importante verificar a linearidade e monotonicidade das preferências (Keeney & Raiffa, 1976). Por exemplo, o decisor sempre preferirá mais tarifação a menos tarifação. Logo, trata-se de uma monotonicidade da preferência e esta preferência é linear com a alteração dos valores. Estes requisitos devem ser verificados para todos os critérios.

Agora, suponha que no procedimento de “*swing dos pesos*” (como relatado na base conceitual) obteve-se a seguinte ordem de preferência dos critérios: Cr_2 - tipo de setor \succ Cr_4 – consumo \succ Cr_3 - tarifas da água \succ Cr_1 - número de economias. Assim, usando a curva ROC, as constantes de escala, para este exemplo e na ordem da preferência, serão: $w_1 = (1+1/2+1/3+1/4)/4 = 0,5208$; $w_2 = (1/2+1/3+1/4)/4 = 0,2708$; $w_3 = (1/3+1/4)/4 = 0,1458$; e $w_4 = (1/4)/4 = 0,0650$.

Por fim, o SMARTER compreende na obtenção de uma função valor para cada alternativa a partir da soma da ponderação entre as avaliações das alternativas em cada critério pela constante de escala deste. Por exemplo, o índice de priorização para o trecho [2] pode ser calculado da seguinte maneira: $\sigma_{[2]} = [w_{Cr1} * u_{A1}(x_{A1Cr1})] + [w_{Cr2} * u_{A1}(x_{A1Cr2})] + [w_{Cr3} * u_{A1}(x_{A1Cr3})] + [w_{Cr4} * u_{A1}(x_{A1Cr4})] = [0,0650 * 0,3571] + [0,5208 * 0,0000] + [0,1458 * 0,3762] + [0,2708 * 0,2782] = 0,1533$.

A Tabela 4.3 apresenta o resultado final da agregação das características pelo método SMARTER para todos os trechos de tubulação.

Tabela 4.3 – Resultado final

<i>Trecho de tubulação</i>	<i>Índice de priorização pelo SMARTER</i>
[1]	0,000
[2]	0,153
[3]	0,188
[4]	0,260
[5]	0,189
[6]	0,354
[7]	0,977
[8]	0,680
[9]	0,134
[10]	0,560

A partir destes valores é possível dar sequência ao modelo de setorização para manobra em redes de distribuição de água de modo a evitar ou minimizar o impacto gerado pelo desabastecimento de água, tanto quanto possível, durante atividades de inspeção ou manutenção.

4.2. Aplicação do algoritmo determinístico do modelo proposto

Para exemplificar a aplicabilidade do algoritmo determinístico do modelo proposto será usada a mesma rede anterior (Figura 4.1). Os limites superior e inferior das equações (3.3), (3.4.) e (3.5) usados são os apresentados pela NBR 12218/94, ou seja: $40.000 \leq \text{área} \leq 200.000$ (metros quadrados – m^2); $7.000 \leq \text{comprimento} \leq 35.000$ (metros – m); número de economias: $600 \leq \text{unidades consumidoras} \leq 3.000$ (unidades – $un.$). Os demais dados necessários para aplicar o modelo são encontrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Exemplo: Aplicação do algoritmo do modelo de setorização de manobra em Rede malhada

<i>Trecho</i>	<i>Nó (i)</i>	<i>Nó (j)</i>	<i>Nº economias (un.)</i> u_{ij}	<i>Índice de priorização</i> σ_{ij}	<i>Área (m²)</i> a_{ij}	<i>Comprimento (m)</i> d_{ij}
[1]	RNF	2	--	0,000	71.671,23	500
[2]	2	3	11	0,153	55.903,56	390
[3]	2	4	12	0,188	64.504,11	450
[4]	3	5	6	0,260	28.668,49	200
[5]	4	6	15	0,189	24.368,22	170
[6]	5	7	17	0,354	41.569,32	290
[7]	6	8	18	0,977	45.869,59	320
[8]	9	7	20	0,680	55.903,56	390
[9]	9	8	11	0,134	64.504,11	450
[10]	2	9	12	0,560	70.237,81	490

Considere o atendimento prévio da NBR 12218/1994 para a solução inicial. Desta forma tem-se a formação do setor (S_0) com uma válvula V_1 após o nó 2 no trecho [2], uma válvula V_2 após o nó 2 no trecho [3] e outra V_3 após o nó 2 no trecho [10], conforme mostra a Figura 4.2.

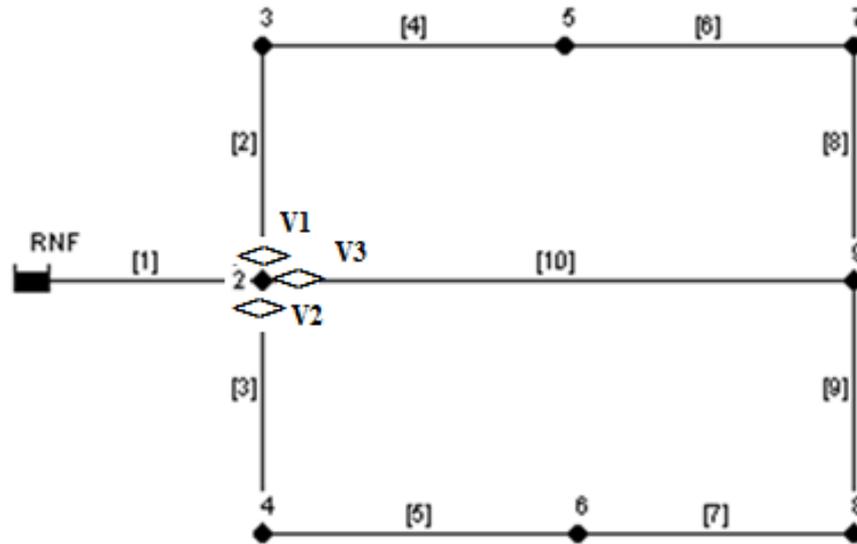


Figura 4.2. Exemplo da localização das válvulas iniciais

Neste caso, o somatório dos índices de priorização para o setor formado é $\sum \sigma_{\text{setor}0} = 3,495$ e para os trechos remanescentes de $\sum \sigma = 0,000$ (conduto principal). Considerando-se fixas as válvulas anteriores, busca-se uma solução para um $w < 3,495$. Seguindo o algoritmo deve-se setorizar as tubulações adicionando uma ou mais válvulas, verificando todas as possíveis formações de setores com estas válvulas adicionadas.

Em seguida, com base nas possíveis soluções deve-se checar o fluxo de água, da seguinte maneira: suponha, como exemplo, a adição de duas válvulas no trecho [9] próximas ao nó 8 (V_4) e ao nó 9 (V_5), conforme Figura 4.3. Depois disso, deixe estas válvulas permanentemente fechadas e observe se somente os trechos entre as válvulas estão desabastecidos.

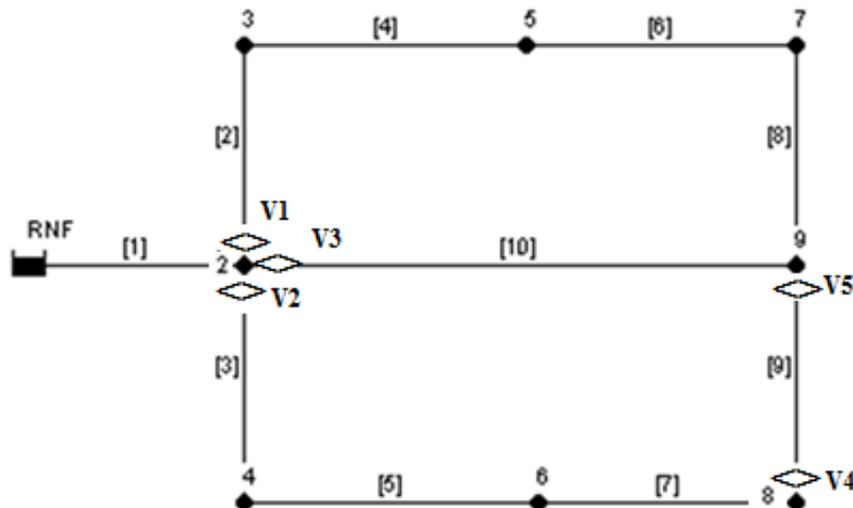


Figura 4.3. Verificação do fluxo de água nos setores

Neste exemplo somente os trechos entre as válvulas estão desabastecidos e, portanto, a solução é admissível, ou seja, houve a formação de um setor. Em seguida, permanecendo fechadas as válvulas V_4 e V_5 , teste o fechamento das demais as válvulas já colocadas na rede (solução inicial *ou* atual). Note que ao fechar as válvulas V_1 e V_3 o fluxo de água para os trechos [2] + [4] + [6] + [8] + [10] é interrompido, enquanto o fluxo para os trechos [3], [5] e [7] é interrompido ao fechar V_2 . Portanto, podem-se considerar a formação de três setores para esta rede. Eles não caracterizam setores menores, pois o isolamento de cada um, individualmente, não afeta os demais, ou seja, são setores independentes.

Com a informação dos setores gerados deve-se verificar se todos eles atendem às normas quanto ao comprimento e/ou área e/ou número de economias. No exemplo, todos os setores atendem à área mínima. Em seguida, é feito a soma dos índices de priorização dos setores. Neste caso tem-se: setor (S_1) = $\sum \sigma_{\text{setor } 1} = [9] = 0,134$; setor (S_2) = $\sum \sigma_{\text{setor } 2} = [3] + [5] + [7] = 1,354$; e setor (S_3) = $\sum \sigma_{\text{setor } 3} = [2] + [4] + [6] + [8] + [10] = 2,007$. Portanto, para $2,007 \leq w < 3,495$ a solução é admissível.

Desta mesma maneira, se procede para todas as soluções possíveis. Assim, considerando as 03 válvulas iniciais, a Tabela 4.5 e a Tabela 4.6 resumem as possíveis soluções adicionando-se uma e duas válvulas, respectivamente.

Tabela 4.5 – Resumo das soluções possíveis adicionando 01 válvula- Rede malhada

<i>Solução</i>	<i>Endereço*</i>	<i>Trechos compreendidos</i>	<i>Solução admissível?</i>	$\sum \sigma_{\text{setor}1}$	$\sum \sigma_{\text{setor}2}$
A	[2]/3	[2]	Sim	0,153	3,342
B	[4]/5	[2] + [4]	Sim	0,413	3,082
C	[6]/7	[2] + [4] + [6]	Sim	0,767	2,728
D	[8]/9	[2] + [4] + [6] + [8]	Sim	1,447	2,048
E	[3]/4	[3]	Sim	0,188	3,307
F	[5]/6	[3] + [5]	Sim	0,377	3,118
G	[7]/8	[3] + [5] + [7]	Sim	1,354	2,141
H	[9]/9	[3] + [5] + [7] + [9]	Sim	1,488	2,007
I	[10]/9	[10]	Sim	0,560	2,935

<i>Solução</i>	<i>Nº válvula/setor</i>	<i>Nº de Trechos (t_{ij})/ setor</i>	M_1	M_2	<i>Var</i>
A	04/02	1/8	0,15300	0,417750	0,017523
B	04/02	2/7	0,20650	0,440286	0,013664
C	04/02	3/6	0,25567	0,454667	0,009900
D	04/02	4/5	0,36175	0,409600	0,000572
E	04/02	1/8	0,18800	0,413375	0,012698
F	04/02	2/7	0,18850	0,445429	0,016503
G	04/02	3/6	0,45133	0,356833	0,002233
H	04/02	4/5	0,37200	0,401400	0,000216
I	04/02	1/8	0,56000	0,366875	0,009324

* O endereço é dado da seguinte maneira: [trecho]/nó. **Em que: $\sum \sigma_{\text{setor}1}$ é o setor formado com a válvula adicionada e $\sum \sigma_{\text{setor}2}$ é o setor formado pelos demais trechos exceto o trecho [1]; M_1 é a média do setor 1; M_2 a média do setor 2; e *Var* é a variância entre M_1 e M_2 .

Tabela 4.6 – Resumo das soluções possíveis adicionando 02 válvulas - Rede malhada

<i>Solução</i>	<i>Endereço*</i>	<i>Trechos compreendidos</i>	<i>Solução admissível?</i>	$\sum\sigma_{setor1}$	$\sum\sigma_{setor2}$	$\sum\sigma_{setor3}$
J*	9/[9] e 8/[9]	[9]	Sim	0,134	1,354	2,007
K	3/[4] e 5/[4]	[4]	Não, (área <T ₁)	---	----	----
L	3/[4] e 7/[6]	[4] + [6]	Sim	0,614	0,153	2,728
M	3/[4] e 9/[8]	[4] + [6] + [8]	Sim	1,294	0,153	2,048
N	5/[6] e 7/[6]	[6]	Sim	0,354	0,413	2,728
O	5/[6] e 9/[8]	[6] + [8]	Sim	1,034	0,413	2,048
P	7/[8] e 9/[8]	[8]	Sim	0,680	0,767	2,048
Q	4/[5] e 6/[5]	[5]	Não, (área <T ₁)	---	----	----
R	4/[5] e 8/[7]	[5] + [7]	Sim	1,166	0,153	2,176
S	4/[5] e 9/[9]	[5] + [7] + [9]	Sim	1,300	0,153	2,042
T	6/[7] e 8/[7]	[7]	Sim	0,977	0,342	2,176
U	6/[7] e 9/[9]	[7] + [9]	Sim	1,111	0,342	2,042
V	9/[9] e 7/[8]	[10] + [8]	Sim	1,240	0,767	1,488
W	9/[9] e 5/[6]	[10] + [8] + [6]	Sim	1,594	0,413	1,488
X	9/[9] e 3/[4]	[10] + [8] + [6] + [4]	Sim	1,854	0,153	1,488
Y	9/[8] e 8/[9]	[10] + [9]	Sim	0,694	1,354	1,447
Z	9/[8] e 6/[7]	[10] + [9] + [7]	Sim	1,671	0,377	1,447
AA	9/[8] e 4/[5]	[10] + [9] + [7] + [5]	Sim	1,860	0,188	1,447
AB	8/[9] e 7/[8]	[10] + [8] + [9]	Sim	1,374	0,767	1,354
AC	8/[9] e 5/[6]	[10] + [8] + [9] + [6]	Sim	1,728	0,413	1,354
AD	6/[7] e 7/[8]	[10] + [8] + [9] + [7]	Sim	2,351	0,767	0,377
AE	6/[7] e 5/[6]	[10] + [8] + [9] + [6] + [7]	Sim	2,705	0,413	0,377
AF	8/[9] e 3/[4]	[10] + [8] + [9] + [6] + [4]	Sim	1,988	0,153	1,354
AG	4/[5] e 7/[8]	[10] + [8] + [9] + [7] + [5]	Sim	2,540	0,767	0,188
AH	6/[7] e 3/[4]	[10] + [8] + [9] + [6] + [7] + [4]	Sim	2,965	0,153	0,377
AI	3/[5] e 5/[6]	[10] + [8] + [9] + [6] + [7] + [5]	Sim	2,894	0,188	0,413
AJ	3/[5] e 3/[4]	[10] + [8] + [9] + [6] + [7] + [4] + [5]	Sim	3,154	0,153	0,188

<i>Solução</i>	<i>Nº válvula/setor</i>	<i>Nº de Trechos (t_{ij})/setor</i>	<i>M₁</i>	<i>M₂</i>	<i>M₃</i>	<i>Var</i>
J	05/03	1/3/5	0,13400	0,45133	0,40140	0,01941
L	05/03	2/1/6	0,30700	0,15300	0,45467	0,01517
M	05/03	3/1/5	0,43133	0,15300	0,40960	0,01598
N	05/03	1/2/6	0,35400	0,20650	0,45467	0,01039
O	05/03	2/2/5	0,51700	0,20650	0,40960	0,01658
P	05/03	1/3/5	0,68000	0,25567	0,40960	0,03076
R	05/03	2/1/6	0,58300	0,15300	0,36267	0,03082
S	05/03	3/1/5	0,43333	0,15300	0,40840	0,01605
T	05/03	1/2/6	0,97700	0,17100	0,36267	0,11820
U	05/03	2/2/5	0,55550	0,17100	0,40840	0,02509
V	05/03	2/3/4	0,62000	0,25567	0,37200	0,02309
W	05/03	3/2/4	0,53133	0,20650	0,37200	0,01759
X	05/03	4/1/4	0,46350	0,15300	0,37200	0,01697
Y	05/03	2/3/4	0,34700	0,45133	0,36175	0,00213
Z	05/03	3/2/4	0,55700	0,18850	0,36175	0,02266
AA	05/03	4/1/4	0,46500	0,18800	0,36175	0,01306
AB	05/03	3/3/3	0,45800	0,25567	0,45133	0,00881
AC	05/03	4/2/3	0,43200	0,20650	0,45133	0,01235
AD	05/03	4/3/2	0,58775	0,25567	0,18850	0,03047
AE	05/03	5/2/2	0,54100	0,20650	0,18850	0,02627
AF	05/03	5/1/3	0,39760	0,15300	0,45133	0,01686
AG	05/03	5/3/1	0,50800	0,25567	0,18800	0,01896
AH	05/03	6/1/2	0,49417	0,15300	0,18850	0,02345
AI	05/03	6/2/1	0,48233	0,09400	0,41300	0,02860
AJ	05/03	7/1/1	0,45057	0,15300	0,18800	0,01764

* O endereço é dado da seguinte maneira: [trecho]/nó. **Em que: $\sum\sigma_{setor1}$ é o setor formado entre as válvulas adicionadas e $\sum\sigma_{setor2}$ e $\sum\sigma_{setor3}$ são os setores formados pelos demais trechos exceto o trecho [1]; M_1 é a média do setor 1; M_2 a média do setor 2; M_3 a média do setor 3 e *Var* é a variância entre M_1 e M_2 e M_3 .

As Tabela 4.5 e Tabela 4.6 apresentaram as soluções admissíveis de todas as possíveis soluções com a adição de uma e duas válvulas, respectivamente. Note que nenhum setor menor foi gerado por estas soluções. Este ponto é uma vantagem das redes malhadas quando comparada às redes ramificadas e mistas.

Contudo, deve-se determinar qual solução é a melhor dentre estas possíveis soluções. De acordo com o modelo a melhor solução é aquela que atender o limite w com o menor número de válvulas, seguida daquele que apresentar o maior número de setores gerados com o mesmo número de válvulas, por fim, a melhor solução é aquela que apresentar a menor variância entre a distribuição dos índices de priorização (σ_{ij}) entre os setores. A Tabela 4.7 resume as melhores soluções por intervalo do parâmetro w .

Tabela 4.7 – Resumo das melhores soluções por intervalo do parâmetro w

Para:	w	Solução	Nº Válvulas	Nº Setores*
	$\geq 3,495$	Preliminar	03	01
	$2,007 \leq w < 3,495$	H	04	02
	$1,447 \leq w < 2,007$	Y	05	03
	$1,374 \leq w \leq 1,447$	AB	05	03

*Uma vez que não é permitida a alocação de válvulas em trechos primários, estes são desconsiderados na análise dos benefícios, ou seja, verifica-se apenas se os trechos secundários são todos abrangidos pela solução de setorização.

Ao considerar que quanto maior o grau de priorização de um trecho maior será o impacto gerado quando na interrupção do abastecimento de água, uma distribuição destes trechos entre os setores de manobra pode minimizar este impacto. Assim, as soluções que foram consideradas como as melhores soluções são, justamente, aquelas que conseguiram distribuir melhor este impacto por setor, de acordo com seu índice de priorização.

O maior valor para w (máximo) será o somatório dos índices pertencentes à solução inicial, enquanto que o menor valor para w (mínimo) será o maior índice de priorização individual, no exemplo, o trecho [7] apresenta o maior índice ($\sigma_{[7]} = 0,977$). Isto porque, não é permitido seccionar o trecho e, portanto, para um valor menor para w não há solução.

Para finalizar a ilustração, deve-se fazer o *trade-off* entre custo e benefício. Considerando apenas as soluções, apresentadas na Tabela 4.7, a Tabela 4.8 apresenta estes valores já normalizados e renomeados como benefício (nº setores) e custo (número de válvulas).

Tabela 4.8 – Análise custo vs benefício

Para:	w	Solução	Benefício	Custo*
	$\geq 3,495$	Preliminar	1,0	0,0
	$2,007 \leq w < 3,495$	H	0,5	0,5
	$1,447 \leq w < 2,007$	Y	0,0	1,0
	$1,374 \leq w \leq 1,447$	AB	0,0	1,0

* Note que quanto maior o custo menor é a parcela de pessoas atingidas pelo desabastecimento.

Se um gráfico destes valores for plotado, conforme Figura 4.4, é possível identificar um ponto de equilíbrio entre o custo e o benefício gerado na solução H.

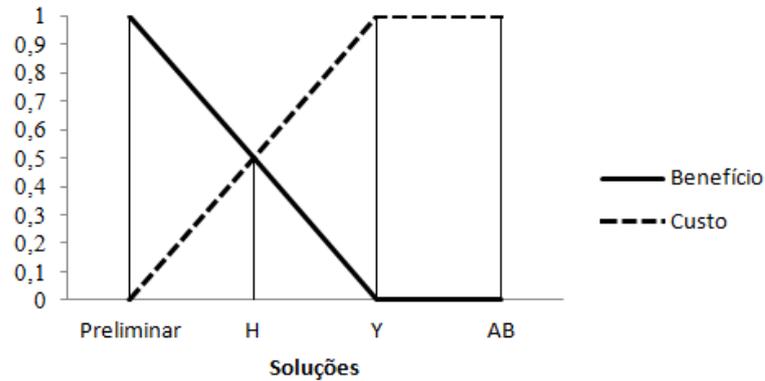


Figura 4.4. Análise custo vs benefício

Não se acredita que o equilíbrio entre custo e benefício sempre se dará em apenas uma solução, como mostra a Figura 4.4, mas o conjunto de soluções é diminuído consideravelmente em grandes redes, o que já facilita muito o processo de decisão final. Além disso, a figura apresenta o crescimento do benefício com o aumento do custo (investimento) e, com isto, a empresa pode organizar um plano de alocação de válvulas com o tempo ao invés de alocá-las de uma única vez. Note que a alternativa intermediária (custo *versus* benefício) não seria possível considerando-se apenas a solução inicial, mostrando que a norma não é suficiente para maximizar os benefícios que podem ser gerados pela setorização. Considerar a norma também não permite a análise da setorização com um número inferior de válvulas.

Além disso, fica claro que o algoritmo deve verificar todas as possíveis combinações de número de válvulas e sua localização, este processo é exaustivo, até mesmo com o uso de um sistema computacional. Esta exaustão é tanto maior quanto maior for o número de trechos. Por este motivo, propõe-se o uso de um Algoritmo Genético (GA) relatado na sequência.

4.3. Algoritmo Genético (GA) para setorização de manobra

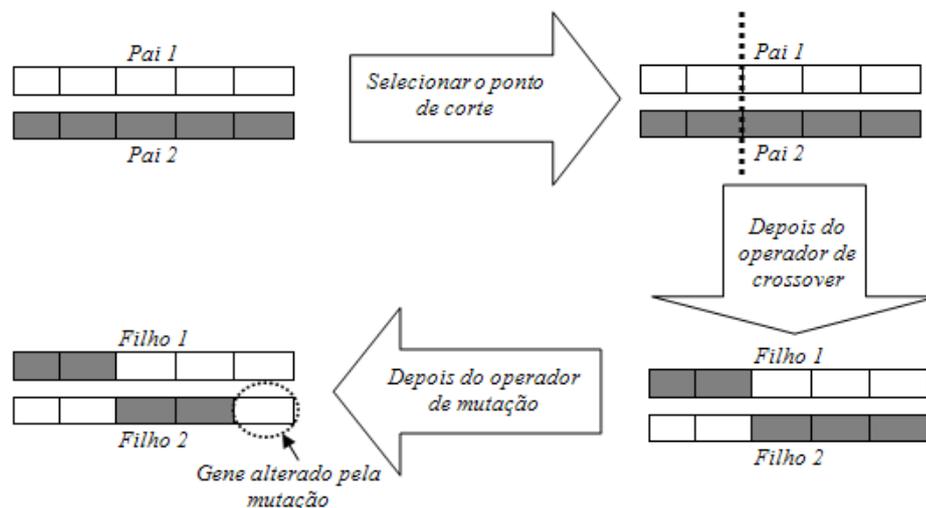
Segundo Ozger & Mays (2004), devido à natureza complexa do problema de redes de distribuição de água, é difícil gerar a função objetivo explicitamente em termos das variáveis de decisão. Para tanto, as técnicas de otimização heurísticas são muito eficientes em encontrar uma solução ‘quase ótima’ para problemas complexos. Desta maneira, para resolução do modelo de setorização de manobra desenvolvido adota-se um Algoritmo Genético (GA).

A representação cromossomial é fundamental no GA. No algoritmo desenvolvido para a setorização de manobra um cromossomo é representado pelo conjunto de todos os trechos.

Assim, um cromossomo é igual a $C = \{[1], [2], [3], [4], \dots, [n]\}$. Cada trecho é um *gene* composto por dois nós i e j que são os alelos. Assim, um gene $g=[i, j]$ significa que é iniciado pelo nó i e terminado pelo nó j . Cada nó, pertencente ao *gene* pode receber o valor 1 quando tiver uma válvula localizada neste, ou 0 caso contrário. Por se tratar de variáveis binárias (0 ou 1) não há uma faixa de representação inferior e superior para cada *gene* e, portanto, não se pode falar em precisão para este tipo de problema.

No modelo proposto de setorização para manobras existe uma solução inicial chamada aqui por “cromossomo base”. Suponha uma rede com quadro trechos, $t=\{[g_1], [g_2], [g_3]$ e $[g_4]\}$, em que já exista uma válvula no nó i do trecho [1]. Desta maneira o cromossomo base será $C_b = \{[1,0], [0,0], [0,0], [0,0]\}$. A geração deste é determinística, ou seja, o GA ainda não está atuando na resolução. Este cromossomo serve como base na avaliação das demais soluções, em que, além das restrições do modelo, para que seja uma solução admissível deve conter as válvulas presentes neste cromossomo. É importante destacar que uma válvula presente no cromossomo base (C_b) não pode ser alterada, pois significa que já existe esta válvula na rede de distribuição de água ou que sua localização é obrigatória para o atendimento às normas.

Depois de determinar o cromossomo base, o GA é iniciado. Logo, dados k trechos de tubulação, o total de cromossomos possíveis é de 2^k . Uma população inicial será selecionada, aleatoriamente, em que 1,0% do total de indivíduos possíveis são selecionados para a etapa de *crossover*. Estes indivíduos devem ser diferentes, sendo, então, eliminadas as duplicidades. A taxa de seleção de 1% leva em consideração que, em grades redes de distribuição de água, uma taxa maior aumentará consideravelmente o esforço computacional para sua resolução. Após a seleção dos pais aplicam-se os operadores genéticos de *crossover* e mutação, como mostra a Figura 4.5.



Fonte: Adaptado de Linden (2008).

Figura 4.5. Exemplo de geração de novos cromossomos

Os pares de pais são formados, aleatoriamente, a partir dos indivíduos selecionados. Para cada par de pais existem duas possibilidades: ocorrer o *crossover* (geração de filhos) ou não. Dada uma distribuição de probabilidade uniforme, cada par de pais tem 50% de chance de gerar filhos, ou seja, a taxa de *crossover* é de 50%. O *crossover* utilizado é com 1-partição, ou seja, um ponto de corte é escolhido aleatoriamente e as partes dos pais, antes e depois deste ponto, são combinadas gerando dois filhos.

Além disso, uma taxa de mutação é adotada para impedir a convergência prematura da solução. Desta maneira, dada uma variável aleatória β , com $0 \leq \beta \leq 1$, em cada cromossomo é rodada esta variável para cada um de seus *genes* (tipo uma roleta simples). Se $\beta > 0,02$ não ocorre mutação, caso contrário o *gene* é mutado. Desta maneira, em cada *gene* selecionado para sofrer a mutação haverá uma probabilidade uniforme do valor dos alelos i e j serem alterados de 1 para 0, ou *vice-versa*. A taxa mais usual para mutação é 1%, porém, devido à pequena extensão das redes aqui simuladas uma taxa um pouco maior se justifica para que melhores soluções sejam encontradas.

Em seguida os cromossomos são ordenados pela sua aptidão. A função de aptidão está relacionada com o ranqueamento das soluções, em que uma solução é a melhor quando:

- a) Apresentar o menor número de válvulas;
- b) Para duas ou mais soluções com o menor número de válvulas, a melhor solução é aquela que gerar o maior número de setores;
- c) Persistindo o empate, a melhor solução será aquela que apresentar a menor variância da média do somatório dos índices de priorização.

Assim, os cromossomos serão ranqueados da maior para a menor aptidão de acordo com estas validações. Cada filho gerado será comparado com o pior dos pais. Se o filho é melhor que o pior dos pais ele substituirá o pai e, então, remove-se o pai da população. Se o filho for pior que o pior dos pais, remove-se o filho da população. A cada comparação uma reordenação deve ser feita de acordo com a aptidão de cada solução. Isto é considerado como geração de soluções elitista, porque sempre mantém as melhores soluções. Além disso, para os filhos entrarem no conjunto atual de soluções é preciso que este atenda as restrições do modelo, em outras palavras, ele deve ser uma solução admissível.

Com esta nova população o algoritmo é novamente executado, até atingir o critério de parada. O critério de parada adotado aqui é relacionado ao número de vezes que o algoritmo será executado (número de gerações), devido à dificuldade da aplicação de outro parâmetro para parada. O número de gerações deve ser avaliado para cada caso, de acordo com o tamanho das redes. Para o exemplo proposto, na sequência, considerou-se 50 gerações

suficientes para obter bons resultados. Após a execução de todas as gerações, verificam-se as soluções admissíveis de acordo com as restrições do problema. Destes, o indivíduo que apresentar maior aptidão é o escolhido como solução do problema.

4.3.1. Descrição do software desenvolvido

Para aplicação do GA proposto é importante uma base computacional para a resolução. Assim, um software foi desenvolvido com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade do modelo em redes maiores, bem como, apresentar uma possibilidade de interface com o decisor. Assim, devido à maior complexidade na leitura dos setores para manobra das redes malhadas, o software foi desenvolvido apenas para redes totalmente ramificadas. Ou seja, embora o modelo de setorização desenvolvido possa ser aplicado em qualquer tipo de rede de distribuição de água, o software desenvolvido e realiza apenas a setorização de redes totalmente ramificadas.

Este software foi desenvolvido com o programa NetBeans IDE, versão 6.8. Os IDE, do inglês *Integrated Development Environment* ou *Ambiente Integrado de Desenvolvimento*, são programas de computador que reúnem características e ferramentas de apoio ao desenvolvimento de software com o objetivo de agilizar este processo. Com o NetBeans IDE 6.8 é possível escrever em JAVA, PHP, C/C++, entre outros. A linguagem escolhida foi JAVA. A escolha desta linguagem é pelo fato de ser uma linguagem orientada a objetos o que facilita o reuso do código, permitindo que outros possam evoluir o sistema, ou adaptá-lo as necessidades particulares. Outra vantagem em sua utilização é que programas escritos em Java são independentes de plataformas do sistema operacional executado pelo computador. Contudo, é imprescindível a instalação do aplicativo JAVA, disponível gratuitamente pelo site: www.java.com/pt_BR.

4.3.2. Aplicação do modelo desenvolvido com GA

Para testar a robustez do modelo com GA e, conseqüentemente, do software desenvolvido, uma pequena rede ramificada é simulada. Para que seja possível aplicar o modelo de setorização de manobra proposto no Capítulo 3, primeiramente, deve-se fazer o levantamento dos dados necessários. Em geral, as empresas abastecedoras de água já dispõem de dados históricos suficientes. Porém, quando estes dados não estão disponíveis, a aplicação do modelo deverá vir precedida de um período de coleta de dados, que pode ser feita pelos

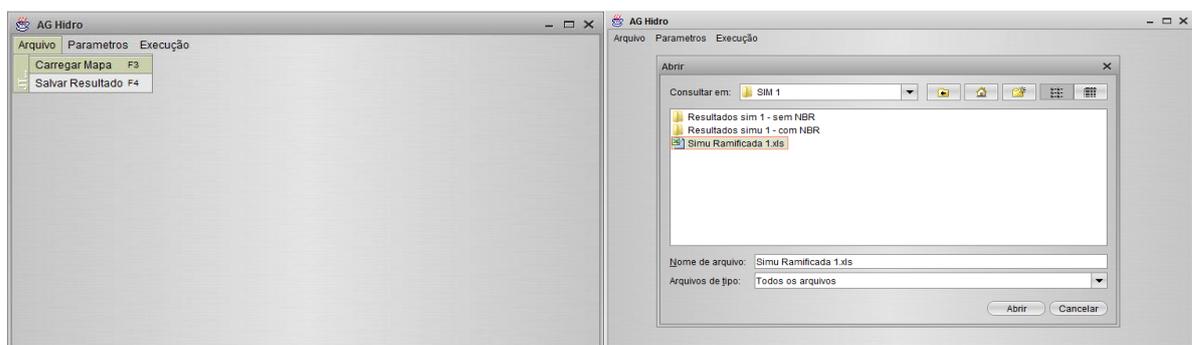
funcionários que realizam a leitura dos hidrômetros. Uma planilha do Microsoft Office Excel, em formato “.xls”, deve ser gerada para cada rede a ser analisada, conforme Figura 4.6.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Inicio=	1	2	3	4	5	6	7	8
2	FIM								
3		1	0	0	0	0	0	0	0
4		2	0	0	0	0	0	0	0
5		3	0	1	0	0	0	0	0
6		4	0	0	2	0	0	0	0
7		5	0	0	0	3	0	0	0
8		6	0	0	0	0	4	0	0
9		7	0	0	0	7	0	5	0
10		8	0	0	8	0	0	0	6
11									

Figura 4.6. Entrada de dados

Em cada aba da planilha uma matriz carrega as informações necessárias sobre um caráter, tal como o comprimento de cada trecho da tubulação, por exemplo. Cada trecho é identificado por meio do nó ‘início’ e o nó ‘fim’.

Para dar continuidade à setorização com o uso do software, na tela inicial os dados de interesse são carregados clicando em ‘Arquivo >> Carregar Mapa’, como mostra a Figura 4.7 (a), ou apertar a tecla ‘F3’. Depois deste procedimento, aparecerão na tela os diretórios, em que deve ser selecionado o arquivo de interesse, conforme Figura 4.7 (b).



(a) Carregar mapa

(b) Selecionar arquivo

Figura 4.7. Carregar dados de entrada

Se na primeira aba da planilha do Microsoft Office Excel for adicionada uma figura da rede de distribuição de água a ser analisada, esta será carregada pelo software, como mostra a Figura 4.8. Esta característica é interessante, pois ajuda ao executor do software verificar se carregou a rede de distribuição de água correta. O tempo decorrido para obter a solução será mostrado na barra abaixo da figura, como ilustrado.

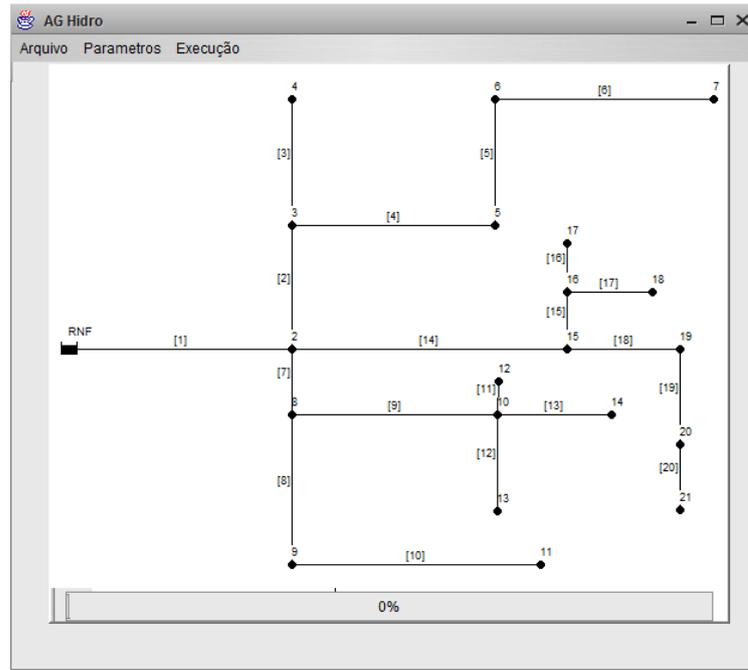


Figura 4.8. Mapa de interesse

Como mostra a Figura 4.8, a rede analisada conta com 20 trechos e 21 nós. Para o cálculo da área de cada trecho da tubulação usam-se as cotações da Figura 4.9. A área total da rede pode ser calculada pela soma da área de três retângulos, tal que: $A=470*60 + 610*1490 + 240*1290 = 1.246.700 m^2$.

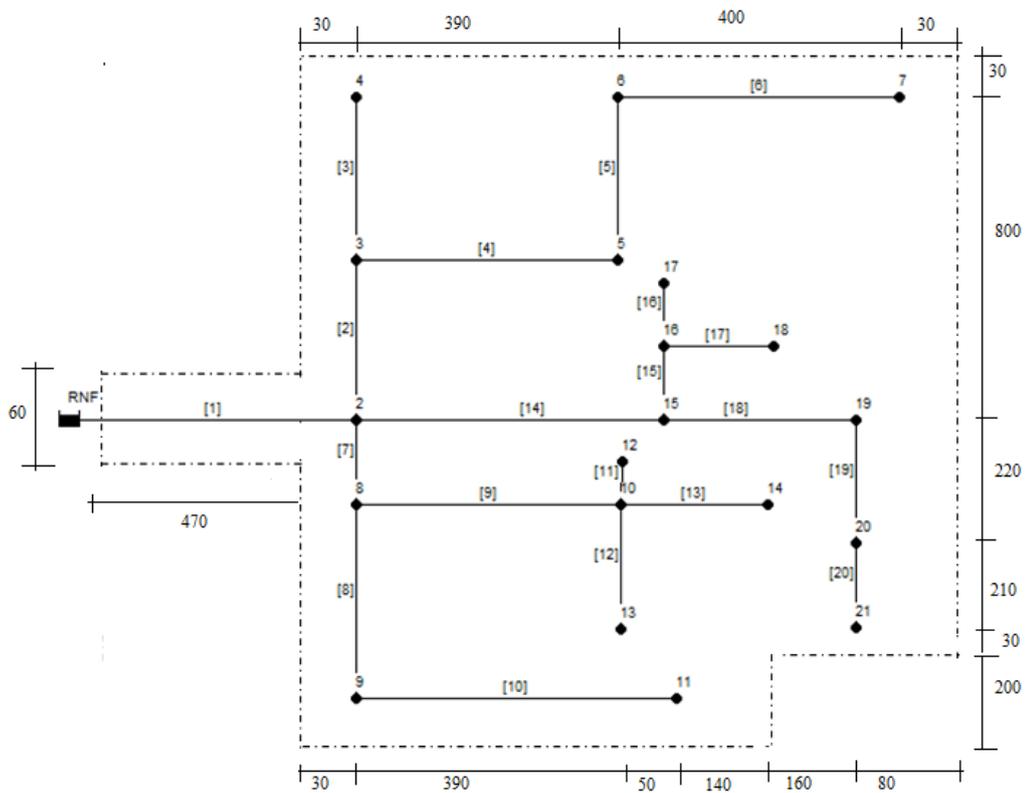


Figura 4.9. Simulação da rede ramificada

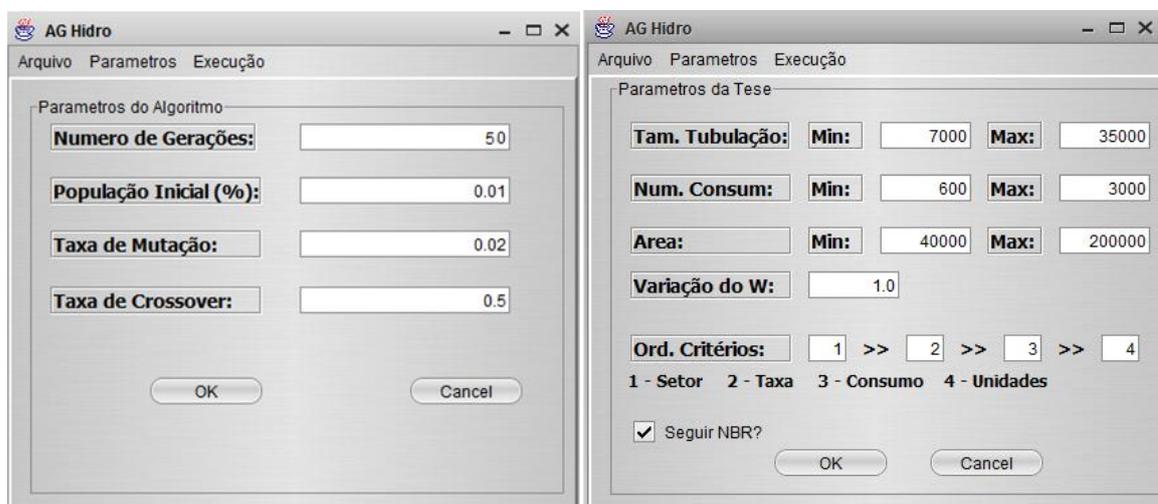
A Tabela 4.9 apresenta os dados necessários para proceder com a simulação.

Tabela 4.9 – Dados da simulação da rede ramificada

Trecho ID*	Nó (i)	Nó (j)	Setor (categoria)	Nº economias (un.) u_{ij}	Tarifa média (R\$)	Consumo médio (m ³)	Área (m ²) a_{ij}	Comprimento (m) d_{ij}
[1]	RNF	2	--	--	--	--	99.576,68	500
[2]	2	3	4	11	21.653,00	2.640	89.619,01	450
[3]	3	4	4	15	18.628,00	2.560	69.703,67	350
[4]	3	5	4	24	19.577,00	3.120	77.669,81	390
[5]	5	6	6	18	22.241,00	2.450	69.703,67	350
[6]	6	7	8	9	6.619,00	1.100	79.661,34	400
[7]	2	8	4	15	9.091,00	1.650	35.847,60	180
[8]	8	9	5	12	16.500,00	1.850	89.619,01	450
[9]	8	10	5	20	18.167,00	2.640	77.669,81	390
[10]	9	11	4	11	8.134,00	1.350	87.627,48	440
[11]	10	12	3	11	6.402,00	950	29.873,00	150
[12]	10	13	5	6	3.853,00	700	39.830,67	200
[13]	10	14	3	15	5.260,00	810	37.839,14	190
[14]	2	15	4	12	10.207,00	1.600	89.619,01	450
[15]	15	16	4	14	14.354,00	2.100	43.813,74	220
[16]	16	17	4	12	12.827,00	1.850	41.822,20	210
[17]	16	18	4	7	7.177,00	1.050	43.813,74	220
[18]	15	19	4	17	15.858,00	2.400	57.754,47	290
[19]	19	20	4	11	8.972,00	1.430	43.813,74	220
[20]	20	21	4	12	19.640,00	2.500	41.822,20	210

Considera-se apenas o trecho [1] como trecho principal. Assim, dois cenários são gerados: o cenário ‘01’ considera o como solução inicial o atendimento prévio à NBR 12218/94 (cromossomo base) e o cenário ‘02’ considera solução inicial com zero válvula.

Alguns parâmetros devem ser verificados para o bom funcionamento do modelo. Há dois grupos de parâmetros a serem verificados, conforme Figura 4.10: os parâmetros do algoritmo genético (ou tecla ‘F5’) e os parâmetros da tese (ou tecla ‘F6’), ou seja, aqueles diretamente vinculados ao modelo proposto.



(a) Parâmetros do algoritmo

(b) Parâmetros da tese

Figura 4.10. Parâmetros do modelo

Os parâmetros do algoritmo genético são apresentados na Figura 4.10 (a), conforme descrição anterior. Todos os parâmetros podem ser alterados de acordo com as preferências do decisor ou necessidades do problema. Na Figura 4.10 (b) podem-se ver os parâmetros da tese, em que se encontram, entre outros, os intervalos que caracterizam um setor, ou seja, o intervalo em que o comprimento, unidades consumidoras e a área total do setor deve se enquadrar. Os intervalos cadastrados são: $40.000 \leq \text{área} \leq 200.000$ (metros quadrados – m^2); $7.000 \leq \text{comprimento} \leq 35.000$ (metros – m); Número de economias: $600 \leq \text{unidades consumidoras} \leq 3.000$ (unidades – $un.$).

A variação do w quer dizer que o algoritmo irá executar o modelo do máximo ao mínimo somatório dos índices de priorização ($\sum\sigma$), nesta rede em intervalos iguais a 1,0 (valor determinado pelo decisor), podendo ser alterado este intervalo a critério do decisor. Como já mencionado, o máximo w é justamente o somatório de todos os trechos da rede de distribuição de água analisada, enquanto que o mínimo w é o maior índice de priorização apresentado por um trecho.

O software está configurado para utilizar o SMARTER para geração dos índices de priorização (σ) e, portanto, deve-se relatar a ordem dos critérios segundo o procedimento do “*swing* dos pesos”. O software não executa este procedimento de elicitação das constantes de escala. A ordem dos critérios utilizada aqui é a mesma usada no exemplo anterior para rede malhada.

Em seguida, o algoritmo calculará as constantes de escala para cada critério, conforme a curva ROC, e, então, calculará o índice de priorização (σ) para cada trecho de tubulação. Por fim, o decisor pode optar por usar a NBR 12218/94 ou não na solução inicial (cromossomo base). Esta NBR está relacionada à questão de que nos trechos secundários uma válvula junto ao ponto de ligação aos trechos principais deverá ser prevista.

Por fim, deve-se executar o modelo clicando em ‘Executar’ ou na tecla ‘F8’. Após a execução, o software retornará na tela as melhores soluções para cada valor de w estimulado, como mostra a Figura 4.11. Clicando no botão ‘salvar’ é possível salvar o resultado em um arquivo em formato “.txt”.

```

==== Cromossomo base is Solution =====
-----> W - Value = 6.3183287192429765
Aptidao = 4 -- Setores = 5 -- Variancia = 0.03853008507498493 -- Solucao = true
==== GENES INICIO =====

No Inicio = 1 -- No Fim = 2 -- false/false
No Inicio = 2 -- No Fim = 3 -- true/false
No Inicio = 2 -- No Fim = 8 -- true/false
No Inicio = 2 -- No Fim = 15 -- false/false
No Inicio = 3 -- No Fim = 4 -- false/false
No Inicio = 3 -- No Fim = 5 -- false/false
No Inicio = 5 -- No Fim = 6 -- false/false
No Inicio = 6 -- No Fim = 7 -- false/false
No Inicio = 8 -- No Fim = 9 -- false/false
No Inicio = 8 -- No Fim = 10 -- false/false
No Inicio = 9 -- No Fim = 11 -- false/false
No Inicio = 10 -- No Fim = 12 -- false/false
No Inicio = 10 -- No Fim = 13 -- false/false
No Inicio = 10 -- No Fim = 14 -- false/false
No Inicio = 15 -- No Fim = 16 -- true/false
No Inicio = 15 -- No Fim = 19 -- false/false
No Inicio = 16 -- No Fim = 17 -- false/false
No Inicio = 16 -- No Fim = 18 -- false/false
No Inicio = 19 -- No Fim = 20 -- true/false
No Inicio = 20 -- No Fim = 21 -- false/false
==== GENES FIM =====

```

Figura 4.11. Output do modelo

Note na Figura 4.11 que a primeira solução sempre será o cromossomo base, pois é a solução do maior w . A partir da solução do cromossomo base outras soluções são geradas pelo GA, variando o valor do w . A aptidão significa o número de válvulas alocadas. A localização das válvulas é possível visualizar na parte “Genes início”, em que são apresentados por trecho se há válvulas ou não em seus nós início e fim. Por exemplo, o trecho [1] é iniciado pelo nó 1 e finalizado pelo nó 2 e não possui válvulas em ambos os nós (*false/false*).

Quando ocorrem soluções com a mesma aptidão, todas serão apresentadas pelo algoritmo na ordem do maior número de setores formados e de sua variância. Assim, o decisor poderá analisá-las e optar por aquela que for tecnicamente mais viável. Com as soluções é possível ainda partir para a análise custo *vs.* benefício. Porém, esta parte não é executada pelo software.

4.3.2.1. Resultados

Ao considerar a NBR como solução inicial o tempo computacional é menor, pois as válvulas alocadas inicialmente já são resposta para os primeiros valores de w . Porém, o tempo computacional médio foi em torno de 05 horas para cada simulação. Os resultados da

simulação com o atendimento prévio à NBR 12218/94 (cenário ‘01’) e sem seu atendimento (cenário ‘02’) são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Soluções pelo software

Cenário 01						
Solução	w	Localização das válvulas	Custo	Benefício		
			Nº válvulas	Nº setor maior	Nº setor menor	Total*
A	7,012 à 3,012	[2]/2, [7]/2 e [14]/2	3	3	0	3,00**
B	2,012	[2]/2, [2]/3, [7]/2, [14]/2, [5]/5, [9]/10 e [19]/20	7	3	5	4,77**
C	1,012	[2]/2, [2]/3, [7]/2, [14]/2, [3]/3, [5]/5, [6]/6, [9]/8, [18]/15, [17]/16 e [20]/20	11	3	9	5,88**

Cenário 02							
Soluções	w	Localização das válvulas	Custo	Benefício			Total*
			Nº válvulas	Nº setor maior	Nº setor menor	Trechos setorizados	
A	7,012	----	0	0	0	0	0
B	6,012	[7]/8, [15]/15 e [18]/15	3	3	0	12	1,89
C		[6]/6, [14]/2 e [15]/16		2	1	8	0,96
D		[7]/8, [9]/10 e [15]/16		2	1	8	1,02
E	5,012	[14]/15, [15]/15, [17]/16	3	1	2	6	0,49
F		[9]/8, [15]/16, [19]/19		3	0	8	1,26
G		[7]/2, [14]/15, [15]/15		2	1	13	1,66
H		[7]/2, [14]/15, [15]/16		2	1	13	1,36
I	4,012	[2]/3, [3]/3, [15]/16 e [18]/19	4	3	1	9	1,51
J		[4]/3, [5]/5, [8]/8 e [14]/15		3	1	11	1,96
K		[2]/2, [2]/3, [14]/2 e [5]/5		2	2	12	2,02
L		[2]/3, [3]/3, [18]/19 e [17]/16		3	1	7	1,17
M		[4]/3, [8]/9, [18]/15 e [17]/16		4	0	8	1,68
N		[2]/2, [6]/6, [9]/8 e [17]/16		3	1	7	1,17
O		[4]/3, [5]/5, [18]/15 e [17]/16		4	0	8	1,68
P		[2]/2, [9]/8, [9]/10 e [15]/15		4	0	12	2,52
Q	3,012	[2]/2, [7]/8, [17]/16 e [20]/20	4	4	0	15	3,15
R		[2]/2, [9]/8, [18]/15 e [19]/19		3	1	10	1,72
S		[2]/3, [7]/8, [17]/16 e [20]/20		3	1	12	1,98
T	2,012	[2]/2, [14]/2, [3]/3, [18]/15, [18]/19 e [19]/20	6	2	4	12	1,84
U		[2]/2, [14]/2, [4]/3, [8]/9, [18]/15 e [19]/20		3	3	13	2,95
V		[2]/3, [6]/6, [7]/8, [15]/16, [17]/16 e [18]/15		4	2	15	3,42
X		[2]/3, [5]/5, [8]/8, [14]/15, [18]/15 e [17]/16		3	3	12	2,50
Z	1,012	[2]/2, [7]/2, [14]/2, [14]/15, [3]/3, [4]/3, [5]/5, [6]/6, [8]/8 e [15]/16	11	3	7	19**	5,82

* Resultados obtidos a partir da equação 3.11. **100% da rede secundária setorizada.

O cenário ‘02’ apresentou 24 soluções na variação do parâmetro w e apenas uma solução setorizou 100% da rede. Enquanto o cenário ‘01’ resultou apenas três soluções diferentes com 100% de setorização nas três soluções. Isto é pelo fato do cromossomo base ser a solução para a maior faixa das simulações do parâmetro w .

Para a análise custo benéfico deve-se proceder com a normalização dos resultados. A Figura 4.12 e a Figura 4.13 apresentam a ilustração da relação custo *versus* benefícios para o cenário ‘01’ e ‘02’, respectivamente.

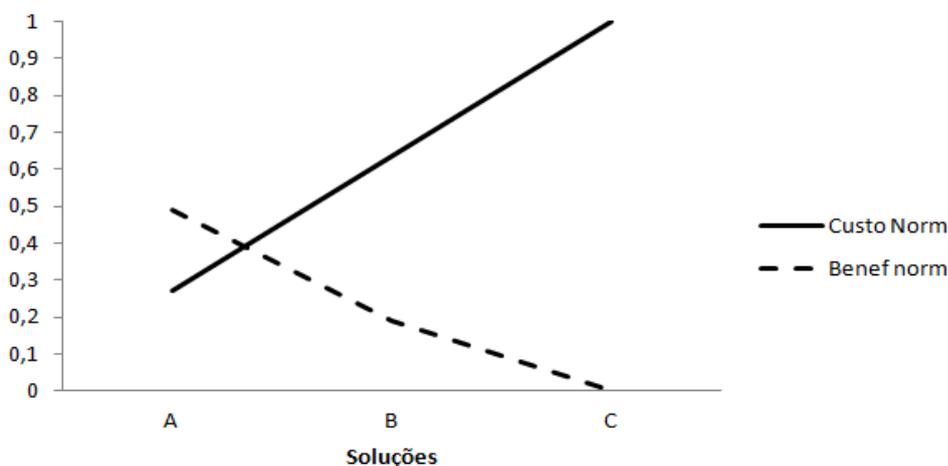


Figura 4.12. Custo vs benefício: cenário ‘01’

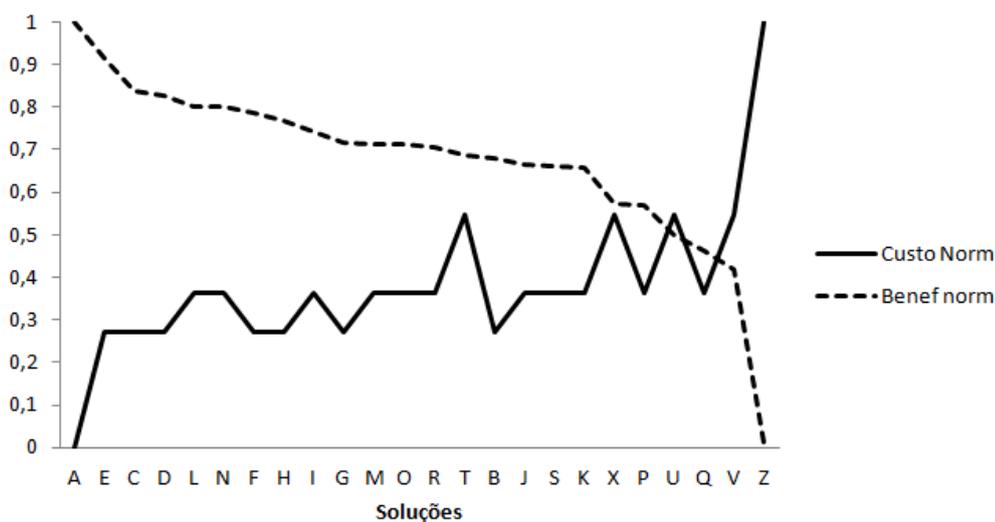


Figura 4.13. Custo vs benefício: cenário ‘02’

O cenário ‘01’, setorizando 100% dos trechos, aponta como solução intermediária algo em torno de 03 e 07 válvulas. Enquanto, no cenário ‘02’, com cerca de 80% dos trechos setorizados, tem-se boas alternativas com 04 e 06 válvulas. Com a adoção de 04 válvulas (cenário ‘02’) ao invés de 03 válvulas tem-se um aumento dos custos (investimento) de 9,09% e um acréscimo nos benefícios de 2,47%. A Figura 4.14 apresenta uma comparação das melhores soluções dos dois cenários.

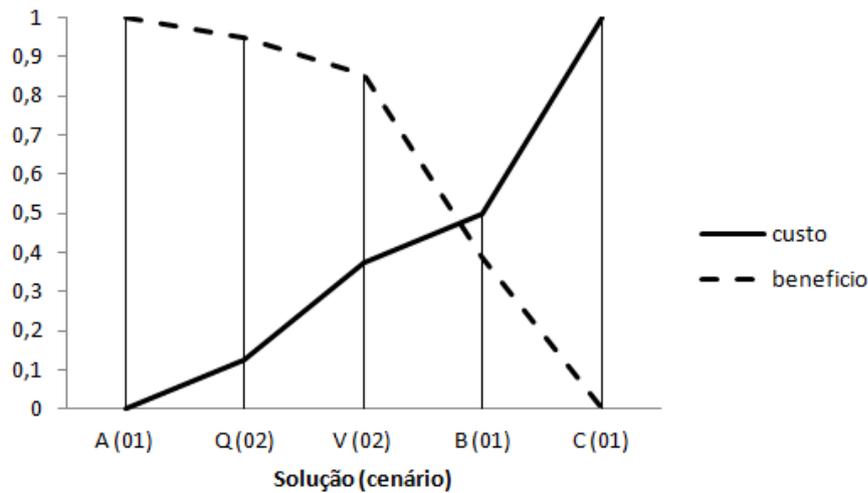


Figura 4.14. Comparação entre as melhores soluções

Logo é possível ver que uma solução melhor é aquela mais próxima de B. Com a alternativa V tem-se um custo 9,09% menor, mas um benefício 22,96% também menor.

4.3.2.2. Análise dos resultados

Para os cenários simulados, os benefícios da setorização são maximizados com o atendimento prévio a NBR 12218/94 (solução inicial), pois ela permite que 100% dos trechos sejam setorizados em todas as soluções. Quando aplicado o modelo determinístico é possível chegar a soluções ótimas, também não considerando este atendimento, mas como o GA busca por soluções “quase ótimas” essa diferença é esperada. Contudo, apenas o atendimento prévio da NBR não garante a maximização dos benefícios com a setorização da rede.

As soluções apresentadas são coerentes com o modelo proposto, pois:

- ✓ O número de válvulas alocadas é crescente em relação à diminuição do valor do parâmetro w , uma vez que os setores devem ser menores para se adequar a este valor de w ;
- ✓ Em todas as soluções as válvulas alocadas pela NBR (cromossomo base) estão presentes, portanto, na avaliação da admissão das soluções o algoritmo conseguiu eliminar as soluções que não contêm as válvulas presentes no cromossomo base;
- ✓ O software conseguiu evitar a alocação de válvulas nos nós extremos (pontas secas). Uma válvula nestes nós não faz sentido em termos de setorização para manobra.

4.3.3. Discussões da aplicabilidade do software

Na prática encontra-se uma utilização maior das redes ramificadas em redes de sistemas de irrigação, como são exemplos os trabalhos de Santos (2002) e Rosal (2007). Santos (2002) utilizou, em seu trabalho, como rede ramificada a rede pressurizada de abastecimento de água do Setor 11 do Perímetro de Irrigação Senador Nilo Coelho, que está situado no município de Petrolina, no Estado de Pernambuco, às margens do rio São Francisco. Possui vinte mil hectares irrigados, sendo o maior perímetro de irrigação em exploração no Brasil. Enquanto, Rosal (2007) trata um projeto de rede de distribuição de um sistema de irrigação de grande porte planejada para o estado de Manabi, região noroeste do equador, município de Chone. A rede abrange uma área de 132,91 km², possuindo 770 nós e 769 trechos, com um comprimento total de 318,48 km.

Embora possa parecer que o modelo de setorização proposto não se aplica nestas redes, pelo contrário, estas redes também irão necessitar de manutenção e a setorização irá beneficiar esta atividade. Contudo, os critérios de índice de priorização agora não serão relativos às unidades consumidoras, mas aos cultivos realizados por cada propriedade. Cada cultivo tem uma demanda de água diferente e um período que pode ficar sem a irrigação. Desta maneira pode-se setorizar a rede com o intuito de beneficiar as propriedades com cultivos mais sensíveis a falta de água durante uma manutenção da rede.

Voltando as redes urbanas, Pérez (2008) aplicou seu trabalho em um setor da rede de distribuição de Campo Grande, MS. Trata-se de uma rede hidráulica ramificada com um reservatório de nível fixo, 71 nós e 70 tubulações. Porém, segundo Brasil (2006), redes ramificadas são típicas de cidades de menor porte que apresentam desenvolvimento particularmente linear. Estas redes apresentam como principais limitações, ao seu emprego, a paralisação da quase totalidade do abastecimento por ocasião de eventuais manutenções dos condutos principais. Porém, o modelo aqui apresentado propicia a setorização menor dentro de um setor maior. Assim, boa parte das manutenções podem desabastecer apenas uma região da rede e não toda a rede como afirma Brasil (2006).

Contudo, o software não se mostra satisfatório no cálculo da variância média do somatório dos índices de priorização, pois considera os trechos remanescentes como um setor. É preciso adicionar conceitos topológicos para melhorar estes resultados. Porém, ele apresenta uma interface com o decisor muito simples de modo a tornar o procedimento dinâmico. Este deve ser melhorado para que possa ser aplicado em redes reais. Porém, fica demonstrado os benefícios gerados com a aplicação do modelo proposto.

4.4. Síntese conclusiva

Um exemplo da aplicação do modelo de setorização de manobra, em uma pequena rede de distribuição de água tipo malhada, foi apresentado. Com este foi possível perceber como as possíveis soluções são geradas pelo algoritmo determinístico, bem como o procedimento adotado para avaliar se a solução é admissível ou não. Do conjunto de soluções admissíveis sempre existirá uma mais adequada a cada intervalo ou valor do parâmetro w .

Contudo, verificou-se que o número de soluções possíveis é elevado e, portanto, o uso de um Algoritmo Genético (GA) foi proposto. Para aplicar o GA um software para redes ramificadas foi desenvolvido. Com a simulação realizada pode-se ver que em redes ramificadas podem ocorrer a geração de vários setores menores dentro de áreas já setorizadas. Isto na prática é algo importante, pois, embora os benefícios sejam menores, eles existem e devem ser considerados. Além disso, verifica-se que a figura do decisor ainda tem um impacto muito importante para avaliar se as soluções dadas realmente são as melhores ou se alguma adaptação é possível e necessária.

Para finalizar, o atendimento prévio a NBR 12218/94 resulta em soluções melhores, pois setoriza 100% da rede, porém apenas o seu atendimento não garante a maximização dos benefícios gerados pela setorização.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Com infraestruturas depreciadas, as perdas de água por vazamento em sistemas de abastecimento de água são frequentemente altas. Somente nas redes de distribuição de água é comum mais de um terço da água ser perdida antes da distribuição final. Com vistas às questões ambientais, as políticas públicas enfatizam o combate aos vazamentos, bem como manutenções preventivas de modo a evitar estes vazamentos. Uma vez que a setorização da rede de distribuição de água torna mais fácil as atividades de manutenção este trabalho propôs um modelo de setorização de manobra em redes de distribuição de água que considere as características das unidades consumidoras a fim de minimizar os impactos negativos gerados pelo desabastecimento momentâneo da água, necessário às atividades de manutenção.

Para que seja possível aplicar este modelo de setorização um índice de priorização dos trechos da tubulação da rede de distribuição foi proposto. Para este índice utilizou-se o método de agregação multicritério SMARTER, que se mostrou adequado ao problema. Este mede o impacto da falta de água sofrido pelas unidades consumidoras presentes em cada trecho de tubulação. Uma setorização para manobra baseada neste impacto pode garantir que, além de aspectos técnicos da rede, dos custos da alocação das válvulas, também seja considerado os benefícios gerados aos usuários.

Desta forma, o modelo de setorização proposto permite que em regiões com baixo impacto à falta de água, como por exemplo, regiões com baixa densidade demográfica e setor de tarifa social, poucas válvulas sejam alocadas, formando um setor com uma extensão territorial maior e minimizando os custos com as válvulas. Por outro lado, permite que sejam formados setores com extensão territorial menor em casos de elevado impacto à falta de água. Assim, o investimento com as válvulas é realizado não apenas por questões técnicas, mas pelas reais necessidades sociais de cada local daquela rede de distribuição de água analisada.

Na aplicação ilustrativa do modelo pode-se verificar que embora as normas de setorização prevejam alguns locais para alocação de válvulas de fechamento, estas nem sempre são suficientes para minimizar os impactos do desabastecimento de água. No entanto, devido ao elevado custo da alocação de válvulas não é possível alocar válvulas em demasia, como sugerem as regras 'N' e 'N-1' citadas no Capítulo 2. Além disso, dependendo do tipo de unidades consumidoras presentes na área analisada, um tipo de setorização diferente pode ser aplicado e isto não é previsto nem pelas regras nem pela NBR 12218/94.

5.1. Vantagens

Este trabalho apresentou um modelo estruturado de setorização para manobra em redes de distribuição de água. As redes de distribuição de água são dinâmicas, ou seja, sofrem alterações e ampliações na sua estrutura com certa frequência. Além disso, as características prediais das unidades consumidoras também se alteram e com uma frequência ainda maior.

Desta forma, as informações referentes à rede, bem como, das unidades consumidoras devem ser atualizadas e em intervalos de tempo determinados pela empresa abastecedora. Após a atualização dos dados deve haver uma nova avaliação da rede e verificar se ocorreram modificações significativas. Neste caso, o setor que apresentar modificação no somatório do índice de priorização, para um valor maior, deverá ser setorizado novamente, ou seja, novas válvulas deverão ser adicionadas. O modelo proposto permite este procedimento sem a necessidade de alterar a localização das válvulas existentes, verificando o impacto às unidades consumidoras.

Além disso, este trabalho proporcionou outras vantagens. Podem-se destacar alguns pontos, tais como:

- ✓ O índice de priorização para os trechos da tubulação proposto é uma medida interessante para avaliar o impacto da falta de água nas unidades consumidoras. Este agrega quatro características levantadas que são: número de unidades consumidoras abastecidas pelo trecho, setor socioeconômico destas unidades, consumo médio de água e tarifação média paga por estas unidades. Outras características podem ser adicionadas facilmente pela proposta.
- ✓ Na geração do índice verificaram-se algumas características importantes do problema que levaram a escolha do método SMARTER. Um dos pontos mais interessantes é a ideia de compensação desejada pelo decisor, uma vez que a empresa abastecedora de água tem fins lucrativos, mas ao mesmo tempo trabalha com um recurso escasso, que abrange a sociedade como um todo, de carácter social. Assim, um *trade-off* entre as características que privilegiam a empresa e aquelas que privilegiam os usuários retornar soluções melhores para ambos.
- ✓ Além disso, foi proposto um cálculo aproximado da área de cada trecho. Este cálculo é representativo, pois, como existem áreas não abastecidas dentro da área compreendida pela rede de distribuição de água, bem como existem trechos (os troncos) que não abastecem diretamente as unidades consumidoras, é difícil associar a área dos trechos à área das unidades consumidoras.

- ✓ O algoritmo determinístico apresentado no modelo de setorização permite o entendimento da formação das soluções admissíveis e suas consequências.
- ✓ Na prática, verifica-se ainda uma setorização, de certa forma, intuitiva por parte das empresas abastecedora de água. Assim, o modelo possibilita a avaliação das alternativas vislumbrando custo *versus* benefícios, pois, verificou-se que o ponto de equilíbrio entre estes pode apontar as melhores soluções para aquela rede de distribuição de água, facilitando o processo de tomada de decisão de qual alternativa de setorização da rede adotar.
- ✓ Esta análise custo *versus* benefício permite que haja um *trade-off* na busca pela solução a ser implementada pela empresa abastecedora, bem como, esta tem em mão um maior subsídeo na análise do que ela pode investir e os ganhos gerados com este investimento.

5.2. Limitações

Algumas limitações são encontradas no trabalho, assim, podem-se destacar os seguintes pontos:

- ✓ O cadastro das informações, que embora não seja difícil é a parte mais extensa a ser realizada. Em geral, as empresas já possuem as informações necessárias e, caso não as tenha, podem ser facilmente coletadas pelos funcionários que realizam a leitura dos hidrômetros. Lembrando, que a atualização cadastral deve ser feita periodicamente, pois ocorrem mudanças nas características das unidades consumidoras, que devem ser analisadas.
- ✓ O cálculo da área de cada trecho de tubulação não retrata com exatidão, mas já permite ter um valor coerente para a aplicação do modelo.
- ✓ A alocação de válvulas de manobra em tubulações principais não foi permitida nos exemplos apresentados. Contudo, isto pode ser reconsiderado à medida da necessidade local da rede de distribuição. Porém, esta limitação se justifica, principalmente, pelo maior custo envolvido nesta prática.
- ✓ Do conjunto de soluções admissíveis sempre existirá alguma(s) mais adequada(s) à cada intervalo ou valor do parâmetro w , ou seja, para o impacto máximo permitido à falta de água sentido pelos usuários. Contudo, estabelecer um valor para este parâmetro é uma tarefa complicada para o decisor. Por este fato, foi proposta a geração de soluções para vários valores do parâmetro w , em que as melhores soluções são analisadas pelo seu custo *versus* benefício.

- ✓ Verificou-se ainda que devido ao elevado número de possíveis soluções o uso de métodos determinísticos não é apropriado, exigindo esforço computacional demasiado. Assim, um método de busca heurística, o Algoritmo Genético (GA), foi proposto.
- ✓ Com a aplicação do GA em uma rede ramificada pequena pode-se ver que boas soluções não foram consideradas em alguns casos. Isto se deve à busca de soluções “quase ótimas”. Os parâmetros utilizados no GA foram definidos a partir de vários testes com o software, mas os resultados não foram relatados devido à enorme quantidade de dados e pouca relevância destes para a compreensão do modelo proposto.
- ✓ Por fim, no presente trabalho a figura do decisor responsável pela rede ainda tem um impacto muito importante na avaliação das soluções e tomada de decisão final.

5.3. Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para trabalho futuro, pode-se deixar o estudo e levantamento de outros critérios/características relevantes na análise da prioridade no abastecimento de água para a formulação do índice de priorização. Além disso, um estudo sobre a sazonalidade do consumo de água, durante o ano e suas implicações no índice de prioridade pode agregar mais impacto ao índice. Por exemplo, em uma cidade turística, há áreas com grande concentração de hotéis e pousadas. Na época alta do turismo, estes estabelecimentos consomem mais água do que na baixa temporada. Isso pode alterar significativamente o índice de prioridade proposta. No entanto, as dimensões de seu impacto devem ser estudadas.

Vários cenários da evolução das características das unidades consumidoras podem ser simulados com o modelo proposto. Com essa evolução pode-se verificar o comportamento da alocação de válvulas e, assim, elaborar um plano de alocação das válvulas com o tempo, ao invés de sua alocação imediata.

Para o cálculo da área sugere-se a agregação de uma plataforma ao modelo que seja capaz de medir a área pelas coordenadas x e y após as setorizações, sem que seja então necessária a soma das áreas dos trechos de tubulações e, também, sem a necessidade do cadastro desta informação.

O fechamento de parte da tubulação pode alterar a pressão e vazão da água em determinados trechos durante uma manutenção. Como trabalho futuro, também, é interessante agregar o modelo de setorização proposto a sistemas de designer (projeto) de redes de distribuição de água.

Quanto ao software, além de ampliá-lo para redes malhadas, outra possibilidade é agregar um estudo de topologia para que seja, então, possível analisar setores e setores menores, em redes ramificadas, de maneira diferenciada. Também é interessante adicionar uma plataforma que execute diretamente a análise custo *vs.* benefício das melhores soluções. Porém, destaca-se que o foco deste trabalho não era o software, mas o modelo, por isto ainda não foram desenvolvidas estas melhorias no software.

É interessante verificar outros métodos de busca heurística para verificar se podem levar a melhorias nas soluções. Também é possível adotar outros parâmetros no GA, tal como, um crossover com 2-partições, por exemplo.

Neste trabalho considerou-se apenas um decisor para a empresa abastecedora de água, porém, na prática, vários profissionais estão envolvidos em uma decisão desta magnitude. Assim, um estudo da agregação das preferências deste grupo de decisores é importante para tornar o trabalho com uma aplicabilidade real maior.

Por fim, pode-se verificar a aplicabilidade do modelo em casos de redes de distribuição de água para irrigação, considerando as características das culturas produzidas por cada propriedade rural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABHULIMEN, K. E. & SUSU A. A. Liquid pipeline leak detection system: model development and numerical simulation. *Chemical Engineering Journal*, v. 97: 47–67 p. 2004.
- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NB 591 - Projeto de adutora de água para abastecimento público. Brasil. 1991.
- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NB - 594. Elaboração de projeto hidráulico de redes de distribuição para abastecimento público. Brasil. 1977.
- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12213 - Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público. Brasil. 1992. [a]
- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12216 - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Brasil. 1992. [b]
- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12217 – Projeto de reservatório de distribuição de água para abastecimento público. Brasil. 1994. [a]
- ABNT–Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218/1994. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. Brasil. 1994. [b]
- ALEGRE, H., BAPTISTA, J. M., COELHO, S., DUARTE, P., LOUREIRO, D., MONTEIRO, J., RAMOS, H., E COVAS, D. Apoio a EPAL no estabelecimento de uma estratégia de investimento na rede de distribuição de Lisboa: relatório preliminar das atividades A1 e A2 - versão para apreciação. LNEC, 2004.
- ALEGRE, H.; COELHO, S. T.; ALMEIDA, M. do C.; VIEIRA, P. Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição.- Portugal: IRAR/INAG, 2005.
- ALMEIDA, A. T. *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2011.
- ALMEIDA, A.T.; COSTA, A.P.C.S. *Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. v. 14, Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003.
- ALMEIDA, T. A.; MORAIS, D. C.; COSTA, A. P. C. S.; ALENCAR, L. H.; DAHER, S. F. D. *Decisão em grupo e negociação: métodos e aplicações*. – São Paulo: Atlas, 2012.
- ALVISI, S. & FRANCHINI, M. Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 135: 426-439 p. 2009.
- AL-SHIDHANI, I.; BECK, S. B. M.; STASZEWSKI, W. J. Leak monitoring in pipeline networks using wavelet analysis. *Key engineering materials*, v. 245 and 246: 51-58 p. 2003.
- ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; HERNÁNDEZ, V.; RUIZ, P. A.; VIDAL, A. M.; MARTÍNEZ, F.; VERCHER, J.; ULANICKI, B. Parallel computing in water network analysis and leakage minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, No. 4: 251-260 p. 2000.
- ANDERSEN, J. H. & POWELL, R. S. Implicit state-estimation technique for water network monitoring. *Urban Water*, v. 2: 123-130 p. 2000.

- ANDREOU, S. A.; MARKS, D. H.; CLARK, R. M. A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory. *Advances in Water Resources*, v. 10: 2-10 p. 1987. [a]
- ANDREOU, S. A.; MARKS, D. H.; CLARK, R. M. A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications. *Advances in Water Resources*, v. 10: 11-20 p. 1987. [b]
- ARAÚJO, L. S.; RAMOS, H.; COELHO, S. T. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, v. 20: 133–149 p. 2006.
- ARREGUÍN-CORTES, F. & OCHOA-ALEJO, L. Evaluation of water losses in distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123: 284–91p. 1997.
- BANA e COSTA, C. A.; CORTE, J-M; VANSNICK, J-C. On the mathematical foundations of MACBETH. *Operational Research working papers*, LSEOR 04.61. Department of Operational Research, London School of Economics and Political Science, London, UK, 2004.
- BANA e COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. MACBETH - An Interactive Path Towards the Construction of Cardinal Value Functions. *International Transactions in Operational Research*, v. 1 (4): 489-500p. 1994.
- BECK, S.B.M.; CURREN, M.D.; SIMS, N.D.; STANWAY, R. Pipeline network features and leak detection by cross-correlation analysis of reflected waves. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 131: 715-723 p. 2005.
- BELTON, V. & STEWART, T. J., *Multiple Criteria Decision Analysis*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A. Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR. *Journal of Hydroinformatics*, v. 10: 113-126 p. 2008.
- BIMPAS, M.; AMDITIS, A.; UZUNOGLU, N. Detection of water leaks in supply pipes using continuous wave sensor operating at 2.45 GHz. *Journal of Applied Geophysics*, v. 70: 226–236 p. 2010.
- BLACK, D. *The Theory of Committees and Elections*. Cambridge, Cambridge University Press, 1958.
- BOUCHART, F. & I. GOULTER. Reliability Improvements in Design of Water Distribution Networks Recognizing Valve Location. *Water Resources Research, American Geophysical Union*, v 27 (12): 3029–3040p. 1991.
- BRASIL. *Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano*. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília : Ministério da Saúde, 2006.
- BRUNONE, B. Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes. *Journal of Water Resources Planning and Management*: 302-306 p. 1999.
- BRUNONE, B.; FERRANTE, M.; MENICONI, S. Portable pressure wave-maker for leak detection and pipe system characterization. *Journal American Water Works Association*, v. 100: 108-116 p. 2008.
- BRUNONE, B. & FERRANTE, M. Pressure waves as a tool for leak detection in closed conduits. *Urban Water Journal*, v. 1: 145-155 p. 2004.

- BUCHBERGER, S. G. & NADIMPALLI, G. Leak Estimation in Water Distribution Systems by Statistical Analysis of Flow Readings. *Journal of Water Resources Planning and Management*: Jul/ Aug/ 2004.
- CAMARGO, L.A. O golpe de aríete em tubulações de recalque: análise simplificada. *XV Encontro de Engenheiros de Assistência Técnica TUBOS e CONEXÕES TIGRE S.A.* Joinville-SC: out 1989.
- CAMPELLO DE SOUZA, F. M. *Decisões Racionais em Situações de Incerteza*. 2º ed. rev. Ampl. Recife: 2007.
- CARPENTIER, P. & COHEN, G. State estimation and leak detection in water distribution networks. *Civil Engineering Systems*, v. 8, n 4: 247–257 p. 1991.
- CESEC, Centro de Estudos de Engenharia Civil Professor Inaldo Ayres Vieira. *EPANET 2.0: simulações de comportamentos hidráulicos*. - Grupo do Programa de Educação Tutorial (PET) Engenharia Civil. UFPR, 2010.
- CHEUNG, P. B. & REIS, L. F. R. Estudo de objetivos múltiplos para reabilitação otimizada de sistemas de distribuição de água. *VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. João Pessoa (Brasil): 5 a 7 de jun/2006.
- CHEUNG PB, GIROL GV, ABE N, PROPATO M. Night flow analysis and modeling for leakage estimation in a water distribution system. *Integrating Water Systems – Boxall and Maksimovic (eds)*: 509-513p. 2010.
- CHRISTODOULOU, S.; CHARALAMBOUS, C.; ADAMO, A. Managing the “Repair or Replace” dilemma on water leakages. *Water Loss – Specialist Conference*, Bucharest: 23-26, sep/2007.
- CHRISTODOULOU, S. & DELIGIANNI, A. A neurofuzzy decision framework for the management of water distribution networks. *Water Resour Manage*, v. 24: 139–156 p. 2010.
- COLOMBO, A. F.; LEE, P.; KARNEY, B. W. A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-environment Research*, v. 2: 212-227 p. 2009.
- COULBECK, B.; ULANICKI, B.; RANCE, JP.; DEVIATKOV, V.; KOSOV, S.; GLUKHOVSKY, I. Pressure control of a Moscow water supply system using expert system technology. *Transactions of The Institute of Measurement and Control*, v. 18: 193-201 p. 1996.
- COVAS, D. & RAMOS, H. Practical methods for leakage control, detection and location in pressurised systems. *Proc., 13th Int. Conf. on Pipeline Protection, BHR Group*, Edinburgh, Scotland. 1999.
- COVAS, D. & RAMOS, H. Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems. *Water Pipeline Systems*: 227-241 p. 2001.
- COVAS, D.; RAMOS, H.; ALMEIDA, A. B. de. Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 131: 1106-1116 p. 2005a.
- COVAS, D.; RAMOS, H.; GRAHAM, N.; Maksimovic, C. Application of hydraulic transients for leak detection in water supply systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 4: 365–374 p. 2005b.
- COVAS, D. & RAMOS, H. Case studies of leak detection and location in water pipe systems by inverse transient analysis. *Journal of Water Resources Planning And Management*: 248-257 p. 2010.

- CREACO, E.; FRANCHINI, M.; ALVISI, S. Optimal Placement of Isolation Valves in Water Distribution Systems Based on Valve Cost and Weighted Average Demand Shortfall. *Water Resour Manage*, v. 24: 4317–4338 p. 2010. DOI 10.1007/s11269-010-9661-5.
- DELGADO-GALVÁN, X.; PÉREZ-GARCÍA, R.; IZQUIERDO, J.; MORA-RODRÍGUEZ, J. An analytic hierarchy process for assessing externalities in water leakage management. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 52: 1194-1202 p. 2010.
- DIAS, J.S.; BARRETO, J.M. Algoritmo genético: inspiração biológica na solução de problemas - uma introdução. *Revista Marítima Brasileira - Suplemento Especial, Pesquisa Naval*, v 11: 105-128 p. 1998.
- DUZINKIEWICZ, K.; BOROWA, A.; MAZUR, K.; GROCHOWSKI, M.; BRDYS, M. A.; JEZIOR, K. Leakage Detection and Localisation in Drinking Water Distribution Networks by MultiRegional PCA. *Studies in Informatics and Control*, v. 17, n 2: 135-152 p. 2008.
- EDWARDS, W. BARRON, F.H. SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement, *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60, 306-325 p. 1994.
- EPA - Environmental Protection Agency. Innovation and Research for Water Infrastructure for the 21st Century – Research Plan, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development – National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, April/2007.
- EPA - Environmental Protection Agency. Rehabilitation of wastewater collection and water distribution systems: state of technology review report. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development – National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, March/2009.
- FERRANTE, M. & BRUNONE, B. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis. *Advances in Water Resources*, v. 26: 95–105 p. 2003 a.
- FERRANTE, M. & BRUNONE, B. Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 2. Wavelet analysis. *Advances in Water Resources*, v. 26: 107–116 p. 2003b.
- FERRANTE, M.; BRUNONE, B.; MENICONI, S. Wavelets for the analysis of transient pressure signals for leak detection. *Journal of Hydraulic Engineering*: 1274- 1282 p. 2007.
- FERRANTE, M.; BRUNONE, B.; MENICONI, S. Leak detection in branched pipe systems coupling wavelet analysis and a Lagrangian model. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 58: 95-106 p. 2009a.
- FERRANTE, M.; BRUNONE, B.; MENICONI, S. Leak-edge detection. *Journal of Hydraulic Research*, v. 47, 233 – 241 p. 2009 b.
- FIGUEIRA, J.; MOUSSEAU, V.; ROY, B. Chapter 4. Electre Methods. *International Series in Operations Research & Management Science*, v. 78., 2006.
- FONTANA, M. E.; MORAIS, D. C. & ALMEIDA, A. T. A MCDM model for urban water conservation strategies. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization - EMO*, 564–578 p. 2011.
- GABRYS, B. & BARGIELA, A. General fuzzy min-max neural network for clustering and classification. *IEEE Transactions on Neural Networks*, v. 11: 769-783 p. 2000.
- GAO, Y.; BRENNAN, M.J.; JOSEPH, P.F.; MUGGLETON, J.M.; HUNAIDI, O. A model of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 277: 133–148 p. 2004.

- GAO, Y.; BRENNAN, M.J.; JOSEPH, P.F.; MUGGLETON, J.M.; HUNAIDI, O. On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 283: 927-941 p. 2005.
- GAO, Y.; BRENNAN, M.J.; JOSEPH, P.F. A comparison of time delay estimators for the detection of leak noise signals in plastic water distribution pipes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 292: 552-570 p. 2006.
- GAO, Y.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F. On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 325: 649–663 p. 2009.
- GEEM, Z. W. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search. *Engineering Optimization*, v. 38 (3): 259-277p. 2006. doi:10.1080/03052150500467430.
- GEORGIA, Department of Natural Resources. Water leak detection and repair program: EPD Guidance Document. *Georgia Environmental Protection Division/ Watershed Protection Branch*: Aug/ 2007
- GIROL, G. V. Análise de perdas reais em um setor do sistema de abastecimento de água no município de Capinzal – SC. Universidade Federal de Santa Catarina: 2008. (Dissertação)
- GIUSTOLISI, O.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A Hydraulic Simulation Model for Pipe Networks with Leakage Outflows and Pressure-Driven Demands. *World Environmental and Water Resources Congress*: 2007.
- GIUSTOLISI, O. & SAVIC, D. Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks. *Urban Water Journal*. v. 7 (1): 1-15p. 2010.
- GIUSTOLISI, O.; SAVIC, D.; KAPELAN, Z., Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, v. 134, n 5: 626-635 p. 2008.
- GRILO, T. V. Técnicas de Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água Metodologia conceptual e aplicação a casos de estudo. Universidade Técnica de Lisboa. 2007. (Dissertação).
- GROSKO, A. P.; GORSKI, J. R.; DIAS, J. da S. Algoritmo genético: revisão histórica e exemplificação. In: *Sociedade Brasileira de Informática na Saúde. X Congresso Brasileiro de Informática na Saúde*. Florianópolis - SC, 2006.
- HADZILACOS, T.; KALLES, D.; PRESTON, N.; MELBOURNE, P.; CAMARINOPOULOS, L.; EIMERMACHER, M.; KALLIDROMITIS, V.; FRONDISTOU-YANNAS, S.; SAEGROV, S. UtilNets: a water mains rehabilitation decision-support system. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 24: 215-232 p. 2000.
- HALHAL, D., WALTERS, G. A., OUAZAR, D., & SAVIC, D. A. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, v. 123, n 3: 137-146 p. 1997.
- HELLER, L. & PÁDUA, V. L. *Abastecimento de água para consumo humano*. – Belo Horizonte: editora UFMG, 2006.
- HERZ, RK. Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks. *Journal of Water Services Research and Technology-Aqua*, v. 47,n. 6: 275-283 p. 1998.
- HO, C. I; LIN, M. D; LO, S. L. Prioritizing pipe replacement in a water distribution system using a seismic-based artificial neural network model. *Environmental Engineering Science*, v. 26: 745-752 p. 2009.

- HO, C-I; LIN, M-D.; LO, S-L. Use of a GIS-based hybrid artificial neural network to prioritize the order of pipe replacement in a water distribution network. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166: 177–189 p. 2010.
- HOFF, J.W., Maintenance requirements of valves in distribution systems. *Annual Conference Proceedings AWWA*. Toronto: 1996.
- HOLNICKI-SZULC, J.; KOLAKOWSKI, P.; NASHER, N. Leakage Detection in Water Networks. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 16: 207-219 p. 2005.
- HUNAIDI, O.; WANG, A.; BRACKEN, M.; GAMBINO, T.; FRICKE, C. Detecting leaks in water distribution pipes. *Arab Water World*, v. 29: 52-55 p. 2005.
- HUNAIDI, O. & CHU, W. T. Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied Acoustics*, v. 58: 235-254 p. 1999.
- ISA - Instituto Socioambiental. Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário nas Capitais Brasileiras. Indicadores e dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (ano referência 2004) & Sabesp (dados referentes ao ano de 2007): 2007.
- JANKOVIC-NISIC, B.; GRAHAM, N. J. D.; MAKSIMOVIC, C.; BUTLER, D. Cost-effective leakage reduction through district metering. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, v. 160: 181-187 p. 2007.
- JOWITT, P. W. & XU, C. Optimal valve control in waterdistribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 116: 455-472 p. 1990.
- JUN, H. Strategic valve locations in a water distribution system. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: 2005. (Tese).
- JUN, H.; LOGANATHAN, G. V.; DEB, A. K.; GRAYMAN, W.; SNYDER, J. Valve distribution and impact analysis in water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*. v. 133 (8): 790–799p. 2007.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. *Journal of Hydraulic Research*, v. 41: 481 – 492 p. 2003.
- KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Incorporation of prior information on parameters in inverse transient analysis for leak detection and roughness calibration. *Urban Water Journal*, v. 1: 129-143 p. 2004.
- KAYAGA, S & REED, B. Technical Note for Emergencies: Rehabilitating small-scale piped water distribution systems. *World Health Organization – WHO*. 2009.
- KEENEY, R. L. & RAIFFA, H. *Decision with multiple objectives: preferences and value trade-offs*.- John Wiley & Sons, 1976.
- KIM, J. H., & MAYS, L. W. Optimal rehabilitation model for water-distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120: 674–692 p. 1994.
- KLAMLER, C. On the Closeness Aspect of Three Voting Rules: Borda – Copeland – Maximin. *Group Decision and Negotiation*, v. 14: 233–240p. 2005. [a]
- KLAMLER, C. The Copeland rule and Condorcet’s principle - Exposita Notes. *Economic Theory*, v. 25, 745–749p. 2005. [b]
- KLEINER, Y.; ADAMS, B. J.; ROGERS, J. S. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resour. Research*, v. 34: 2039-2051 p. 1998.
- KOSTER, M. & NUIJTEN, M. From preamble to post-project frustrations: the shaping of a slum upgrading project in Recife, Brazil. *Antipode*, v. 44, n 1: 175–196 p. 2012.

- KOZA, J.R. Survey of genetic algorithms and genetic programming”, *Proc. Of Wescon 95, IEEE Press*, 589-594 p. 1995.
- LAMBERT, A. O. Accounting for Losses: The Bursts and Background Concept. *Water and Environment Journal*, v. 8, n 2: 205–214 p. 1994.
- LAMBERT, A.O. & MORRISON, J. A. E. Recent Developments in Application of ‘Bursts and Background Estimates’ Concepts for Leakage Management. *Water and Environment Journal*, v. 10: 100–104 p. 1996.
- LAMBERT, A. O. International report on water losses management techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 2: 1–20 p. 2002.
- LAMBERT V. & HIRNER W. Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. *Voda i sanitarna tehnika*, v. 32: 29-38 p. 2002.
- LAMBERT, A.O. & MCKENZIE, R.D. Practical Experience in using the Infrastructure Leakage Index, *International Water Association Conference ‘Leakage Management: A Practical Approach’*, Lemesos, Cyprus: 2002.
- LEE, P. J.; VÍTKOVSKÝ, J. P.; LAMBERTA, M. F.; SIMPSONA, A. R.; LIGGETT, J. A. Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study. *Journal of Sound and Vibration*, v. 284: 1051–1073 p. 2005a.
- LEE, P. J.; VÍTKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, JAMES A. Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks. *Journal of Hydraulic Engineering*: 596-604 p. 2005b.
- LEE, P. J.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; VÍTKOVSKÝ, J. P.; LIGGETT, J. Experimental verification of the frequency response method for pipeline leak detection. *Journal of Hydraulic Research*, v. 44: 693–707p. 2006.
- LEE, P. J.; VÍTKOVSKÝ, J. P.; LAMBERT, M F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, J. Leak location in pipelines using the impulse response function. *Journal of Hydraulic Research*, v. 45: 643–652 p. 2007.
- LI, P-H & KAO, J-J. Segment-based vulnerability analysis system for a water distribution network. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 25 (1): 41–58 p. 2008.
- LIBERATORE, S. & SECHI, G. M. Location and calibration of valves in water distribution networks using a scatter-search meta-heuristic approach. *Water Resources Management*, v.23: 1479–1495 p. 2009.
- LIGGETT, J. A. & CHEN, L-C. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 120: 934- 955 p. 1994.
- LIGHTHILL, J. *Waves in Fluids*, Cambridge University Press, Cambridge: 2001.
- LINDEN, R. *Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional*. 2 ed – Rio de Janeiro: Brasport, 2008.
- LIU, C. P. Pipeline leak detection by impulse response extraction. *Journal of Fluids Engineering*, v. 120: 833-839 p. 1997.
- MAMLOOK, R. & AL-JAYYOUSI, O. Fuzzy sets analysis for leak detection in infrastructure systems: a proposed methodology. *Clean Techn Environ Policy*, v. 6: 26–31 p. 2003.
- MACHARIS, C.; SPRINGAEL, J.; BRUCKER, K.; VERBEKE, A. Promethee and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis: Strengthening Promethee with ideas of AHP, *European Journal of Operational Research*, v. 153, 307-317 p. 2004.

- MARESCHAL, B.; SMET, Y.; NEMERY, P. Rank reversal in the promethee ii method: some new results. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. 2008.
- MARUNGA, A.; HOKO, Z.; KASEKE, E. Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 31: 763–770 p. 2006.
- MAYS, L. W. (organizador). *Water distribution systems handbook*. McGraw-Hill, EUA, 2000.
- MCKENZIE, R. & SEAGO, C. Assessment of real losses in potable water distribution systems: Some recent developments. *Water science and technology: water supply*, v 5: 33–40p. 2005.
- MENICONI, S.; BRUNONE, B.; FERRANTE, M.; MASSARI, C. Small amplitude sharp pressure waves to diagnose pipe systems. *Water Resources Management* (on line). 2010.
- MISIUNAS, D.; VÍTKOVSKÝ, J.; OLSSON, G.; SIMPSON, A.; LAMBERT, M. Pipeline Break Detection Using Pressure Transient Monitoring. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 131: 316-325 p. 2005.
- MISIUNAS, D.; VÍTKOVSKÝ, J.; OLSSON, G.; LAMBERT, M.; SIMPSON, A. Failure monitoring in water distribution networks. *Water science and technology*, v. 53: 503–511p. 2006.
- MORAIS, D. C. & ALMEIDA, A. T. de. Modelo de decisão em grupo para gerenciar perdas de água. *Pesquisa Operacional*, v. 26, n.3: 567-584p. 2006.
- MORAIS, D. C. & ALMEIDA, A. T. de. Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52: 441-459 p. 2007.
- MOUNCE, S. R. & MACHELL, J. Burst detection using hydraulic data from water distribution systems with artificial neural networks. *Urban Water Journal*, v. 3: 21 – 31 p. 2006.
- MOUNCE, S. R.; DAY, A. J.; WOOD, A. S.; KHAN, A.; WIDDOP, P. D.; MACHELL, J. A neural network approach to burst detection. *Water Science and Technology*, v. 45: 237-246 p. 2002.
- MOUNCE, S. R.; KHAN, A.; WOOD, A. S.; DAY, A. J.; WIDDOP, P. D.; MACHELL, J. Sensor-fusion of hydraulic data for burst detection and location in a treated water distribution system. *Information Fusion*, v. 4: 217–229 p. 2003.
- MOUNCE, S. R.; BOXALL, J. B.; MACHELL, J. Development and Verification of an Online Artificial Intelligence System for Detection of Bursts and Other Abnormal Flows. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, v. 136: 309-318p. 2010.
- MOURA, E. M.de; DIAS, I. C, S.; SILVA, J. S.; SILVA,F. C. da. Abordagem sobre perdas de água em sistemas de abastecimento: breve explanação sobre os tipos e principais causas. *IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*. João Pessoa: 8 a 10 de Nov/ 2004.
- MPESHAA, W.; GASSMANA, S. L.; CHAUDHRYA, M. H. Leak detection in pipes by frequency response method. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127: 134-147 p. 2001.
- MPESHAA, W.; CHAUDHRYA, M. H.; GASSMANA, S. L. Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation. *Journal of Hydraulic Research*, v. 40: 55 – 62 p. 2002.

- MUGGLETON, J. M.; BRENNAN, M. J.; PINNINGTON, R. J. Wavenumber prediction of waves in buried pipes for water leak detection. *Journal of Sound and Vibration*, v. 249: 939-954 p. 2002.
- MUGGLETON, J.M. & BRENNAN, M.J. Axisymmetric wave propagation in buried, fluid-filled pipes: effects of wall discontinuities. *Journal of Sound and Vibration*, v. 281: 849–867 p. 2005.
- MURAVYOV, S.V. & SAVOLAINEN, V. Special interpretation of formal measurement scales for the case of multiple heterogeneous properties. *Measurement*, v. 29, 209–223 p. 2001.
- NAZIF, S.; KARAMOUZ, M.; TABESH, M.; MORIDI, A. Pressure management model for urban water distribution networks. *Water Resources Management*, v. 24: 437–458 p. 2010.
- NICOLINI, M. & ZOVATTO, L. Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves in Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, v. 135, n 3: 178-187 p. 2009.
- NURMI, H. Voting Procedures: A summary analysis. *British Journal of Operational Research*, v. 82, 522-539 p. 1983.
- OZGER, S. & MAYS, L. W. Chapter 7 - Optimal location of isolation valves in water distribution systems: a reliability/optimization approach. In: Mays, L. W. *Water resource systems management tools*. McGraw-Hill Professional Engineering.- ed 1: 2004.
- PÉREZ, A. M. E. A. Estudo ótimo da localização de válvulas redutoras de pressão em sistemas de distribuição de água considerando objetivos múltiplos. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2008. (Dissertação).
- POULAKIS, Z.; VALOUGEORGIS, D.; PAPADIMITRIOU, C. Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework. *Probabilistic Engineering Mechanics*, v. 18: 315–327 p. 2003.
- PRODON, A.; DENEGRE, S.; LIEBLING, T. M. Chasing Leaks in a Water Distribution Network by Solving Prize-Collecting Steiner Arborescence Problems. *Operations Research*. 2007.
- PRODON, A.; DENEGRE, S.; LIEBLING, T. M. Locating leak detecting sensors in a water distribution network by solving prize-collecting Steiner arborescence problems. *Mathematical Programming*, v. 124: 119–141 p. 2010.
- PUUST, R.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D. A.; KOPPEL, T. A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*. v. 7: 25-45 p. 2010.
- RAMOS, H.; REIS, C.; FERREIRA, C.; FALCÃO, C.; COVAS, D. Leakage control policy within operating management tools. *Computer and Control for Water Industry*: 61-73 p. 2001.
- 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: 317-326 p. 1997.
- ROSAL, M. C. F. Programação não linear aplicada a otimização de redes pressurizadas de distribuição de água. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. (Dissertação)
- ROSSMAN, L. A. *EPANET Users Manual*. Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. 1994.

- ROUGIER, J. Probabilistic leak detection in pipelines using the mass imbalance approach. *Journal of Hydraulic Research*, v. 43: 556-566 p. 2005.
- ROY, B. *Multicriteria methodology for decision aiding*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- ROY, B. & BERTIER, P. La méthode Electre II – une application au média-planning. *Operational Research*, 291-302p. 1973.
- SAATY, T. L. *The Analytic Hierarchy Process*. N. York: McGraw-Hill, 1980.
- SAATY, T. L. *Decision making with dependence and feedback: the Analytic Network Process*. Pittsburgh: RWS, 1996.
- SANTOS, M. C. C. Simulação de cenários de operação de sistemas de distribuição de água através do método PNL2000. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002. (Dissertação).
- SAVIC, D. A. & WALTERS, G. A. An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks. *Engineering Optimization*, v. 24: 197-219 p. 1995.
- SILVA, F. G. B.; VALADÃO, M. N.; BARROS, R. M. Simulação hidráulica de redes de abastecimento de água com o uso do EPANET 2.0 – aplicação em setores de Itajubá – M.G. *I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro Oeste*. 2007.
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2010. *Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental*. Disponível em < <http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=29> > Acesso em 2012.
- SOARES, A. K.; CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R.; SANDIM, M. P. Avaliação das perdas físicas de um setor da rede de abastecimento de água de campo grande-ms via modelo inverso. *Eng. sanit. ambient.* v 9 (4): 312-321 p. 2004.
- STERLING, M. J. H. & BARGIELA, A. Leakage reduction by optimised control of valves in water networks. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, v. 6: 293-298 p. 1984.
- STEVENS, S.S. On the theory of scales of measurement. *Science*, v. 103, 677-680 p. 1946.
- TAGHVAEI, M.; BECK, S. B. M.; STASZEWSKI, W. J. Leak detection in pipelines using cepstrum analysis. *Measurement science & technology*, v. 17, n 2: 367-372 p. 2006.
- TAGHVAEI, M.; BECK, S. B. M.; STASZEWSKI, W. J. Leak detection in pipeline networks using low-profile piezoceramic transducers. *Structural Control and Health Monitoring*, v. 14: 1063–1082 p. 2007.
- TABESH, M.; YEKTA, A. H. A.; BURROWS, R. An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*, v. 23: 477–492 p. 2009.
- TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125: 277-285 p. 1999.
- UGARELLI, R. & FEDERICO, V. Di. Optimal scheduling of replacement and rehabilitation in wastewater pipeline networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*: 348 – 356 p. 2010.
- ULANICKI, B.; BOUNDS, P. L. M.; RANCE, J. P.; REYNOLDS, L. Open and closed loop pressure control for leakage reduction. *Urban Water*, v. 2: 105-114 p. 2000.

- VAIRAVAMOORTHY, K. & LUMBERS, J. Leakage reduction in water distribution systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124: 1146-1154 p. 1998.
- VELLEMAN, P. & WILKINSON, L. Nominal, Ordinal, Interval, and Ratio Typologies are Misleading. *The American Statistician*, v 47, n 1, 65-72 p. 1993.
- VERDE, C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice*, v. 9: 673-682 p. 2001.
- VERDE, C. Accommodation of multi-leak location in a pipeline. *Control Engineering Practice*, v. 13: 1071-1078 p. 2005.
- VINCKE, P. *Multicriteria decision aid*. Bruxelles, Jonh Wiley & Sons. 1992.
- VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 262-265p. 2000.
- VÍTKOVSKÝ, J. P.; LIGGETT, J. A.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129: 480-492 p. 2003.
- VÍTKOVSKÝ J. P.; LAMBERT M. F.; SIMPSON A. R.; LIGGETT, J. A. Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection. *Journal of Water Resources Planning and Management*: 519-530 p. 2007.
- WALSKI, T. M. *Chapter 17: Maintenance and Rehabilitation/Replacement*. Water Distributions Systems Handbook, L. W. Mays, ed., McGraw-Hill, New York. 2000.
- WALSKI, T.M. Practical aspects of providing reliability in water distribution systems. *Reliability Engineering and System Safety*. v. 42: 13-19p. 1993.
- WALSKI, T.; BEZTS, W.; POSLUSZNY, ET.; WEIR, M.; WHITMAN, BE. Modeling leakage reduction through pressure control. *Journal American Water Works Association*, v. 98, n. 4: 147-155 p. Apr/2006. [a]
- WALSKI, T. M.; WEILER, J. S.; CULVER, T. Using criticality analysis to identify impact of valve location. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*. Cincinnati, Ohio, USA: 2006. [b]
- WALTERS, G. A.; HALHAL, D.; SAVIC, D.; OUAZAR, D. Improved design of “Anytown” distribution network using structured messy genetic algorithms. *Urban Water*, v. 1: 23-38 p. 1999.
- WANG, X-J.; LAMBERT, M. F.; SIMPSON, A. R.; LIGGETT, J. A.; VÍTKOVSKÝ, J. P. Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering*: 697-711 p. 2002.
- WHITLEY, D. *A genetic algorithm tutorial*. Springer Science + Business Media B.V., Formerly Kluwer Academic: 65-85 p. 1994.
- WINARNI, W. Infrastructure Leakage Index (ILI) as water losses indicator. *Civil Engineering Dimension*, v. 11: 126-134 p. 2009.
- WU, Z. Y. Unified parameter optimisation approach for leakage detection and extended-period simulation model calibration. *Urban Water Journal*, v. 6, n 1: 53-67 p. 2009.
- WU, Z. Y. & SAGE, P. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. ASCE 8th Annual *International Symposium on Water Distribution System Ananlysis*, Aug/ 2006.

- WU, Z. Y. & SIMPSON, A. R. Competent genetic-evolutionary optimization of water distribution systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*: 89-101p. 2001.
- WU, Z. Y.; SAGE, P.; TURTLE, D. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of Water Resources Planning and Management-Asce*, v. 136: 116-128p. Jan-Feb/ 2010.
- WU, Z. Y.; WANG, R. H.; WALSKI, T. M.; YU, Y. S.; BOWDLER, D. Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis. *8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*, Cincinnati, Ohio: 2006.
- YANG, J.; WEN, Y.; LI, P. Leak location using blind system identification in water distribution pipelines. *Journal of Sound and Vibration*, 310: 134–148 p. 2008.
- YANG, J.; WEN, Y.; LI, P. The genetic-algorithm-enhanced blind system identification for water distribution pipeline leak detection. *Measurement Science & Technology*, v. 18: 2178-2184 p. 2007.
- YOUNG, H. P. Condorcet's Theory of Voting. *The American Political Science Review*, v. 82 (4): 1231-1244p. 1988.
- YOUNG, H. P. (), Condorcet's Theory of Voting. *Mathématiques et Sciences Humaines*, v. 28 (111): 45-49p. 1990.
- YSUSI, M.A. System Design: An Overview. In: Mays, L.W. *Water Distribution System Design*.- McGraw-Hill, New York: 2000.
- XU, C. C. & POWELL, R. S. Leakage reduction and security enhancement for water distribution networks by online pressure control. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 10: 55-75 p. 1993.