

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MURILO GALVÃO PRADO DE PASCHOAL

**ANÁLISE MULTICRITERIAL BASEADA NA LÓGICA FUZZY PARA A
REABILITAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2017

MURILO GALVÃO PRADO DE PASCHOAL

**ANÁLISE MULTICRITERIAL BASEADA NA LÓGICA FUZZY PARA A
REABILITAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Alessandro Pansera.

TOLEDO

2017

AGRADECIMENTOS

“Aos meus pais, Luiz de Paschoal Neto e Gislene Galvão Prado de Paschoal, meu irmão Rômulo Galvão Prado de Paschoal, pelo amor, incentivo, paciência e apoio incondicional.

Aos amigos e colegas da universidade, principalmente minha veterana Tamara Vieira Pascoto, por todo apoio ao longo dessa caminhada.

Muito Obrigado”



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 070

Análise multicriterial baseada em lógica fuzzy para a reabilitação de sistemas de abastecimento de água

por

Murilo Galvão Prado de Paschoal

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10:20 h do dia **02 de Junho de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof Calil Abumanssur
(UTFPR – TD)

Prof Dr Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Prof Dr. Wagner Alessandro Pansera
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Lucas Boabaid Ibrahim
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

PASCHOAL, Murilo. Análise Multicriterial Baseado na Lógica Fuzzy para a Reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água. 80 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

As deteriorações naturais dos sistemas de distribuição de água causam uma perda na qualidade do abastecimento (vazões e pressões insuficientes nos pontos de consumo, alto índice de perda de água, interrupções no fornecimento, precariedade na qualidade da água, etc.) e um aumento dos custos de operação e manutenção. As companhias de saneamento precisam de maiores recursos financeiros para manter o fornecimento em níveis adequados e, na maioria dos casos, são adotadas soluções imediatas e parciais voltadas apenas no custo/benefício da ação para resolver problemas pontuais da rede. Mesmo sabendo que o ideal seria a reabilitação de todos componentes deteriorados, esta solução é inviável financeiramente. Dessa maneira, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão, baseada na lógica *fuzzy*, que sirva de subsídio para empresas de saneamento na elaboração de planos de ações voltados para a reabilitação da rede de abastecimento de água, através de uma solução mais abrangente que considere além dos custos das intervenções físicas, a minimização dos vazamentos nas redes hidráulicas, a idade das tubulações e a redução de impactos negativos (transtornos) à região de implantação. A metodologia foi aplicada em uma rede fictícia de duas maneiras para melhor compreensão dos critérios avaliados e os resultados foram satisfatórios para os parâmetros analisados.

Palavras-chave: Redes Hidráulicas, Reabilitação, Soluções.

ABSTRACT

PASCHOAL, Murilo. Multiobjective Approach Based on Fuzzy Logic for Rehabilitation of Water Supply Systems. 80 p. Monograph (Graduation in Civil Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

The natural deterioration of water distribution systems causes a loss in the quality of the water supply (insufficient flow/pressure at the points of consumption, high water loss, interruptions in supply, poor water quality, etc.) and it increases the costs in operation and maintenance of the hydraulic network. The water management companies need more financial resources to maintain adequate supply and, in most cases, immediate and partial solutions are based on the cost/benefit rather than solve the specific problem. Even knowing that the ideal would be the rehabilitation of all deteriorated components, this solution is not financially viable. In this way, the present work proposes the development of a decision support system, based on fuzzy logic, that serves as a subsidy for sanitation companies in the elaboration of action plans aimed at the rehabilitation of the water supply network through a more comprehensive solution that considers beyond the costs of physical interventions, the minimization of leakage in the hydraulic networks, the age of the pipes and the reduction of negative impacts (disturbances) to the region of implantation. The methodology was applied in a fictitious network in two ways to better understand the evaluation criteria and the results were satisfactory for the analyzed parameters.

Key words: Hydraulic Networks, Rehabilitation, Solutions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplo de rede ramificada.....	7
Figura 2- Exemplo de rede malhada em anéis.....	8
Figura 3- Exemplo de rede mista	8
Figura 4- Índice de perdas de água no Brasil	10
Figura 5- Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o ponto de vista da Lógica convencional (à esquerda) e do da Lógica Fuzzy (à direita)	12
Figura 6- Vídeo inspeção	13
Figura 7- Conceitos de Reabilitação.....	14
Figura 8- Interdição de ruas e avenidas	15
Figura 9- Tubulação pré e pós reabilitação	16
Figura 10- Modelos de Pigs.....	17
Figura 11- Esquema de limpeza de tubulação	18
Figura 12- Raspadores e Discos de Polimento	18
Figura 13- Aplicação de revestimento de resina epóxi	20
Figura 14- Revestimento com argamassa de cimento	21
Figura 15- Fatores a serem considerados numa ferramenta de apoio a decisão para reabilitação de redes de água	24
Figura 16- Modelo proposto de planejamento otimizado de reabilitação de redes de abastecimento de água	25
Figura 17- Variáveis do sistema Fuzzy.....	32
Figura 18- Exemplo 1 de rede de distribuição	33
Figura 19- Rede Exemplo 1.....	40
Figura 20- Simulação final Rede Exemplo 1 no EPANET 2.0 – Pressões nos nós e diâmetro dos trechos.....	50
Figura 21- Simulação final Rede Exemplo 2 no EPANET 2.0 – Pressões nos nós e diâmetro dos trechos.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Dados dos trechos na Rede Exemplo 1.....	34
Tabela 5.2 – Dados dos nós na Rede Exemplo 1.....	35
Tabela 5.3 – Custo das intervenções (HALHAL et al.,1997).....	36
Tabela 5.4 – Cálculo e definição do critério econômico.....	37
Tabela 5.5 – Cálculo e definição do critério ambiental	38
Tabela 5.6 – Valores padronizados para o critério social	40
Tabela 5.7 – Primeira iteração (Limpeza do trecho 15).....	41
Tabela 5.8 – Segunda iteração (Limpeza do trecho 5).....	42
Tabela 5.9 – Terceira iteração (Limpeza do trecho 2).....	43
Tabela 5.10 – Quarta iteração (Limpeza do trecho 6).....	44
Tabela 5.11 – Quinta iteração (Limpeza do trecho 3).....	45
Tabela 5.12 – Sexta iteração (Limpeza do trecho 1).....	46
Tabela 5.13 – Sétima iteração (Limpeza do trecho 7).....	47
Tabela 5.14 – Oitava iteração (Limpeza do trecho 4).....	47
Tabela 5.15 – Nona iteração (Limpeza do trecho 17).....	48
Tabela 5.16 – Estado final da reabilitação da rede 1.....	48
Tabela 5.17 – Solução: Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 1	49
Tabela 5.18 – Situação proposta para Rede Exemplo 2	51
Tabela 5.19 – Primeira iteração (Limpeza do trecho 15).....	52
Tabela 5.20 – Segunda iteração (Limpeza do trecho 5).....	53
Tabela 5.21 – Terceira iteração (Limpeza do trecho 2).....	54
Tabela 5.22 – Quarta iteração (Limpeza do trecho 6).....	55
Tabela 5.23 – Quinta iteração (Limpeza do trecho 3).....	56
Tabela 5.24 – Sexta iteração (Limpeza do trecho 1).....	57
Tabela 5.25 – Sétima iteração (Limpeza do trecho 7).....	58
Tabela 5.26 – Oitava iteração (Limpeza do trecho 4).....	58
Tabela 5.27 – Nona iteração (Limpeza do trecho 17).....	59
Tabela 5.28 – Estado final da reabilitação da rede 2.....	60
Tabela 5.29 – Solução: Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 2	61

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivos Gerais.....	4
2.2 Objetivos Específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	5
3.1.1 Áreas específicas	6
3.1.2 Zonas de pressão.....	6
3.1.3 Classificação das redes hidráulicas.....	7
3.1.4 Perdas do sistema.....	10
3.2 LÓGICA FUZZY.....	13
3.3 Reabilitação de redes de abastecimento.....	14
3.4 TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO.....	18
3.4.1 Limpeza das tubulações.....	18
3.4.2 Substituição das tubulações.....	20
3.4.3 Renovação por revestimento da tubulação	22
3.5 Sistemas de suporte de decisão.....	25
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 SOFTWARES.....	28
4.1.1 Epanet	28
4.1.2 MATLAB	29
4.2 CRITÉRIOS AVALIADOS	30
4.2.1 Ambiental.....	30
4.2.2 Econômico.....	32
4.2.3 Social.....	33
4.3 SISTEMA FUZZY	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1 REDE EXEMPLO 1.....	36

5.2 REDE EXEMPLO 2	54
6. CONCLUSÃO	67
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	69

1. INTRODUÇÃO

Um Sistema de Abastecimento de Água é um conjunto composto por canalizações, estações de tratamento, reservatórios, estações elevatórias e por demais instalações, destinado ao abastecimento de água. O projeto de um sistema de abastecimento de água depende de todo um estudo da área demográfica, projeções de crescimento populacional, estimativas de vazões em áreas e horários de pico, do traçado ideal da tubulação de acordo com o terreno a ser implantado, dos materiais utilizados e componentes de controle do sistema. Este sistema, mesmo que bem projetado, ocorrerá situações não consideradas inicialmente, onde o reparo ou mudança na rede será necessária. Podemos citar situações comuns como a ampliação da rede para abastecimento de novas áreas, alteração de demandas em áreas não previstas, deterioração física da tubulação, além de patologias hidráulicas, como vazamentos, rompimentos de tubulação, falta de pressão, dentre outras. O controle ideal de seus componentes é essencial, assim como decisões corretas para sua implementação ou reparo.

A reabilitação das redes de abastecimento de água é uma técnica antiga e comum que vem se desenvolvendo desde as primeiras redes de implantação, e consolidada após a revolução industrial com a substituição das redes por tubulações de ferro fundido. Em busca de dimensionar sistemas redundantes, foram propostas redes de circuito fechado, e assim, os primeiros modelos para análises de redes, também denominados simuladores hidráulicos, foram propostos.

Atualmente os simuladores hidráulicos computacionais são de fácil acesso, e apresentam inúmeras vantagens como a agilidade nos cálculos, a fácil incorporação do sistema (bombas, válvulas, vazamentos, etc). A facilidade de se avaliar inúmeras alternativas para a reabilitação do sistema dá ao projetista uma maior capacidade na tomada de decisão.

Sistemas de suporte a decisão são modelos criados para analisar, da melhor maneira possível, um grande número de variáveis para um posicionamento final. Estes modelos dependem totalmente das informações coletadas, ou seja, uma base de conhecimento confiável. Em sua criação é importante a interatividade flexível dos sistemas de informação, que permita ao usuário tomar sua decisão com sua própria percepção.

A lógica convencional ou clássica usa distinções bem definidas para separar conjuntos, o que muitas vezes, não reflete a realidade do problema a ser modelado. Em busca de uma distinção que respeite mais a realidade, criou-se a Lógica Fuzzy. Ao contrário da lógica convencional, a Lógica Fuzzy reflete a maneira como as pessoas pensam, tentando modelar o seu senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum. Como consequência, a introdução da Lógica Fuzzy tem conduzido as pesquisas para sistemas inteligentes mais humanos e mais adequados à realidade.

O presente trabalho propõe a criação de um modelo computacional baseado em lógica Fuzzy, em conjunto com um simulador hidráulico da rede, para o auxílio na tomada de decisões e análise de alternativas para reabilitação de redes de abastecimento de água, baseados em critérios ambientais, sociais e econômicos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Existem vários fatores que justificam a aplicabilidade de um método multicritério eficiente nas tomadas de decisões na reabilitação de sistemas de abastecimento de água. Dentre eles pode-se citar o aumento das demandas regionais de água que geram a necessidade de ampliação e aprimoramento dos sistemas de distribuição de água existentes, e seus altos custos operacionais.

Portanto, o desenvolvimento de metodologias que ajudem na análise de decisão pelos gestores responsáveis é uma medida eficaz a ser adotada pelas companhias de saneamento.

Este trabalho busca a aplicação de métodos multicritérios pela ótica da lógica Fuzzy, criando um sistema inteligente que reflita de forma mais adequada a realidade dos parâmetros a serem analisados, concedendo ao gestor uma ferramenta prática para a reabilitação de redes de distribuição de água.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Estudar o emprego da análise multicritério de apoio à decisão, baseada em lógica Fuzzy, para hierarquizar alternativas para gestão e manutenção das redes de abastecimento de água urbano.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo computacional no MATLAB de análise multicritério em ambiente Fuzzy;
- Estudar os critérios sociais, econômicos e ambientais para ordenação das alternativas de reabilitação de rede de abastecimento;
- Realizar um estudo de caso dos modelos de apoio a decisão multicritério desenvolvidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os autores Richter e Azevedo Netto (1991) definem o sistema de abastecimento de água como o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados ao abastecimento de água potável a uma comunidade, para fins de abastecimento doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos.

Chama-se de sistema de abastecimento o conjunto formado pelos reservatórios e rede de distribuição, conjunto de tubulações e de suas partes acessórias, destinados a disponibilizar água de forma contínua e pressão adequada em todos os pontos de consumo. Sua implantação inicial é responsável por aproximadamente 70% do custo da obra (ESTRELA *et. al.*, 2009).

Moreira (2013) salienta a importância do conceito de vazões de distribuição que é o consumo distribuído mais as perdas que normalmente acontecem nas tubulações distribuidoras.

No sistema de distribuição de água, como toda boa obra de engenharia, sua implantação, operação e manutenção devem buscar a melhor solução técnica e econômica, atendendo os critérios estabelecidos da região.

Segundo Alegre (2000), projetar um sistema de abastecimento de água urbano e gerenciá-lo apropriadamente tem, entre outros, os seguintes propósitos:

- proporcionar aos consumidores um nível de serviço apropriado, cumprindo políticas nacionais e regionais, requisitos estatutários ou outras obrigações;
- maximizar a eficiência do uso dos recursos hídricos e ambientais;
- garantir uma elevada eficiência na aplicação dos recursos financeiros;

- planejar, construir, operar e manter as infra-estruturas de forma eficiente e eficaz.

3.1.1 Áreas específicas

Em um sistema de distribuição de água existe a necessidade de dividir as regiões abastecidas de acordo com suas características de ocupação, densidade demográfica e do tipo de consumidor predominante. Essas regiões são chamadas de áreas específicas, e devem ser divididas levando em consideração a vazão necessária para cada uma, assim como seus horários de pico. Chama-se de vazão específica a vazão média distribuída em uma área específica (MOREIRA, 2013).

As áreas específicas podem ser classificadas em função da predominância ou totalidade de ocupação da área, da seguinte maneira (MOREIRA,2013):

- áreas residenciais;
- áreas comerciais;
- áreas industriais;
- mistas.

3.1.2 Zonas de pressão

A rede de abastecimento deve ser subdividida com o objetivo de impedir que as pressões dinâmicas mínima e estática máxima ultrapassem os limites preestabelecidos, essas subdivisões da rede são denominadas de zonas de pressão. Nota-se, então, que

para satisfazer as condições técnicas a serem atendidas, uma rede pode ser dividida em quantas zonas de pressão forem necessárias (MOREIRA, 2013).

Convencionalmente, as zonas de pressão em redes de abastecimento de água potável estão situadas entre 15 e 50 mca, tolerando-se até 60 mca em até 10% da área e até 70 mca em até 5% da mesma zona, como pressão estática máxima, e até 10 mca em 10% e até 8 mca em até 5% da mesma zona para pressão dinâmica mínima. Em circunstâncias especiais, pode-se trabalhar com pressões mais baixas se o técnico responsável justificar e garantir que não ocorrerá riscos de contaminação da rede (MOREIRA, 2013).

No Brasil, a norma ABNT NBR 12.218/1994 recomenda que a rede de distribuição de água seja dividida em zonas de pressão. Nestas condições a norma estabelece uma pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 50 mca, com exceção dos condutos principais que não abastecem consumidores ou condutos secundários, e uma pressão dinâmica mínima de 10 mca. Recomenda-se adotar as zonas de pressão coincidentes com os Distritos de Medição e Controle.

3.1.3 Classificação das redes hidráulicas

De acordo com a forma de traçado das tubulações as redes de distribuição são classificadas basicamente em malhadas, ramificadas e mistas (GOMES; BEZERRA, 2004).

3.1.3.1 Rede Ramificada

A rede é classificada como ramificada (Figura 1) quando o abastecimento se faz a partir de uma tubulação tronco, alimentada por um reservatório ou através de uma elevatória, e a distribuição é feita diretamente para os condutos secundários, sendo conhecido como o sentido da vazão em cada trecho. Utilizadas em trechos com menor taxa de urbanização devido a ter somente um sentido de escoamento e estar sujeito a interrupções mais constantes. Segundo Formiga (2007) as redes ramificadas são mais econômicas quando comparada com uma rede malhada de mesmo porte.

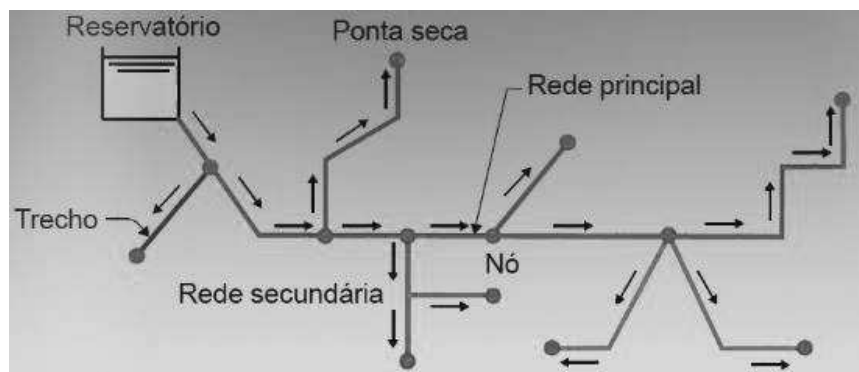


Figura 1- Exemplo de rede ramificada

(Fonte COSTA et al., 2010)

3.1.3.2 Redes Malhadas

As redes malhadas são constituídas por tubulações principais que formam anéis ou blocos, de modo que, pode-se abastecer qualquer ponto do sistema por mais de um caminho, permitindo uma maior flexibilidade em satisfazer a demanda e manutenção da rede, com mínimo de interrupção possível no fornecimento de água (MEDEIROS, 2007).

Sua implantação é tradicionalmente aplicada em zonas de maior densidade demográfica e industriais, onde sua confiabilidade compensa seu maior custo.

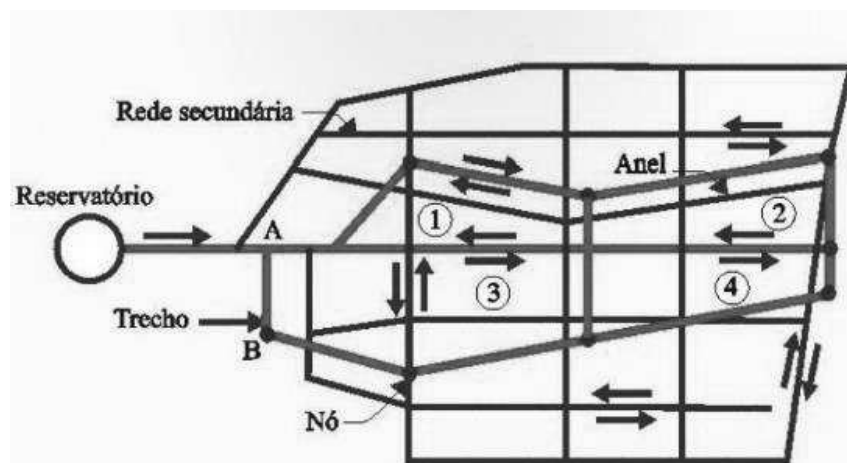


Figura 2- Exemplo de rede malhada em anéis

(Fonte COSTAS et al., 2010)

3.1.3.3 Redes Mistas

As redes mistas (Figura 3) são a combinação das características das redes malhadas e ramificadas.

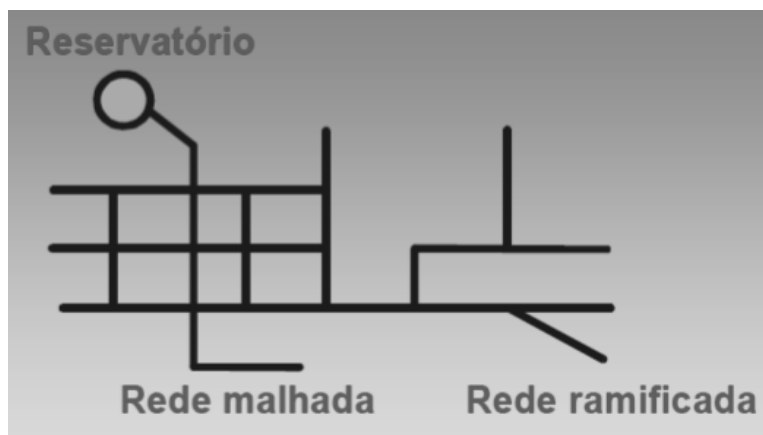


Figura 3- Exemplo de rede mista
(Fonte COSTAS et al., 2010)

3.1.4 Perdas do sistema

Segundo Tsutiya (2004), perdas em sistema de abastecimento é todo o volume de água tratada que foi produzida e se perdeu durante o trajeto, não chegando ao seu uso pelo cliente final. Em outras palavras, a diferença entre os volumes afluentes macromedidos e os volumes afluentes micromedidos.

O controle das perdas nos sistemas de abastecimento de água está intimamente ligado à maximização da eficiência em todas as etapas constituintes do sistema desde a sua captação até a chegada aos usuários finais (ALMEIDA, 2010).

As perdas do sistema podem ser divididas conforme as suas causas, sendo elas perdas físicas ou reais, e perdas aparentes ou não físicas.

As perdas físicas ou reais, correspondem ao volume de água produzido que não chega ao consumidor final, devido a ocorrência de vazamentos nas adutoras, redes de distribuição e reservatórios (devido a extravasamentos ou outros motivos diversos) (TSUTIYA, 2004).

Também estão incluídos nessa categoria os “volumes operacionais”, ou seja, a quantidade de água usada pela empresa de saneamento para a manutenção, limpeza e operação das diversas partes componentes do sistema, como a lavagem dos filtros nas estações de tratamento, esvaziamento das redes em ocasiões de manutenção, limpeza de reservatórios e etc. (TSUTIYA, 2004).

Em relação as perdas aparentes ou não reais, são relacionados ao volume de água consumido, mas que não foi contabilizado pela companhia de saneamento, decorrente de erros de medição dos hidrômetros, fraudes, ligações clandestinas e falhas no cadastro comercial. Nesse caso então a água é efetivamente consumida, mas não é faturada.

De acordo com a IWA (International Water Association), esse tipo de perda denomina-se perda aparente, também conhecida como perda comercial (TSUTIYA, 2004).

Autores como Tardelli Filho (2006) e Mays (2002) refletem sobre a impossibilidade da perda zero em razão de um dispêndio de recursos maior do que o que será arrecadado com a sua recuperação - as denominadas “perdas inevitáveis”. Tardelli (2006) e Abranches (2009) concordam em afirmar que a melhoria da condição da infraestrutura é uma das principais ações para o combate às perdas reais.

Logo, conclui-se que o principal objetivo está no encontro do ponto ideal de aceitação das perdas de forma que haja o equilíbrio entre os fatores comerciais e físicos (TSUTIYA, 2004).

A Figura 4 mostra os índices de perdas médios em cada estado do Brasil. Vale ainda ressaltar que países como o Brasil possuem grandes variações de índices por toda a sua extensão em razão de, principalmente, disponibilidade hídrica e investimentos nas regiões.

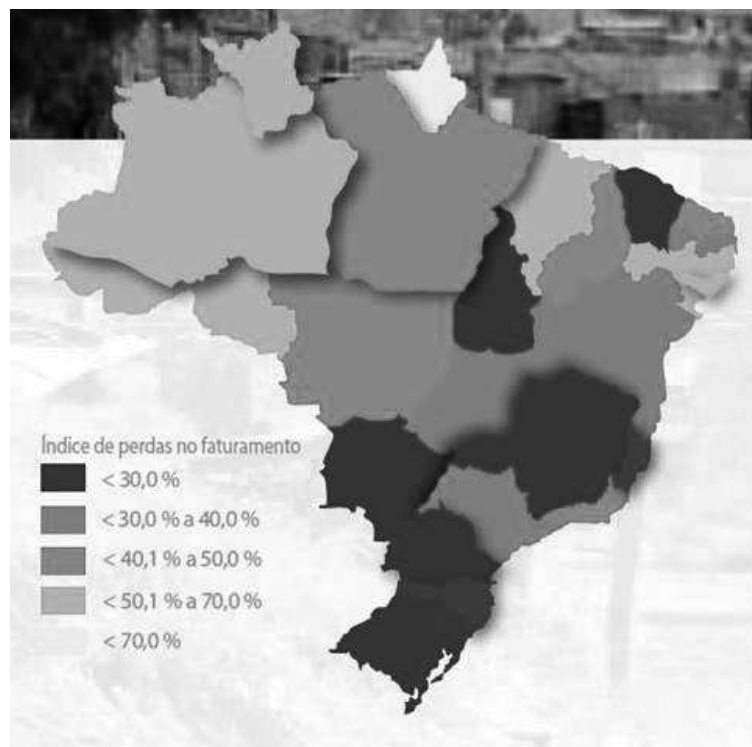


Figura 4- Índice de perdas de água no Brasil
(Fonte Organização Trata Brasil, 2015)

Analisando o panorama atual, o professor Toneto Jr. (2015) conclui que as perdas de água representam um dos maiores desafios e dificuldades para a expansão das redes de distribuição de água no Brasil. A perda financeira com a água produzida e não faturada faz com que o setor do saneamento perca recursos financeiros fundamentais também para a expansão do esgotamento sanitário no país.

3.2 LÓGICA FUZZY

Na teoria clássica de conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é bem definido, por outro lado, a Lógica Fuzzy utiliza a ideia de que todas as coisas admitem (temperatura, altura, velocidade, etc.) graus de pertinências. Com isso, a Lógica Fuzzy tenta modelar o senso de palavras, tomada de decisão ou senso comum do ser humano (MARRO *et.al.*, 2014).

De forma ilustrativa, considere o exemplo criado por Marro (2014), onde o gráfico apresentado no lado esquerdo da figura 1, que representa um exemplo típico da teoria clássica e descreve a altura de uma pessoa através de três conjuntos: baixo, médio e alto. Nesse exemplo, dado um elemento x qualquer, o mesmo pertencerá a um dos conjuntos do gráfico; por exemplo, se $x = 165$, então x pertence ao conjunto médio e não aos demais, ou seja, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto e, além disso, tal elemento não pertence a mais de um conjunto.

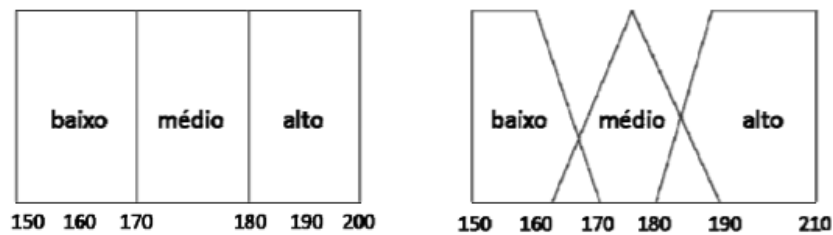


Figura 5- Representação na forma de conjuntos da altura de uma pessoa, sob o ponto de vista da Lógica convencional (à esquerda) e do da Lógica Fuzzy (à direita)

(Fonte MARRO *et.al.*,2014)

Na lógica Fuzzy assume-se que todos elementos existem graus de pertinência, ou seja, ele pode pertencer a mais de um grupo, mas suas características ditam o grau de pertinência em cada grupo.

A lógica Fuzzy permite classificar os dados ou informações vagas, imprecisas e ambíguas, em elementos Fuzzy que são operados por meio de conjuntos Fuzzy. A utilização da lógica Fuzzy em áreas de tomada de decisão proporciona o desenvolvimento de ferramentas eficientes, tornando o processo de decisão mais ágil e eficaz (MOREIRA, 2013).

Os conjuntos Fuzzy são utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras. Um operador humano é capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras na forma de “se” e “então”, como também é possível implementar com o auxílio de computadores um algoritmo capaz de traduzir os dados de entrada e, com isso, apresentar uma resposta de saída. O resultado é um sistema de decisão baseado em regras, no qual a teoria de conjuntos Fuzzy é a ferramenta necessária para lidar com tais regras linguísticas. É importante notar que, esse tipo de sistema, constitui uma vantagem sobre outros procedimentos porque são classificados com sistemas inteligentes (MARRO *et. al.*, 2014).

3.3 REABILITAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO

De acordo com Venturini e Barbosa (2002), os principais problemas que ocasionam a má qualidade e disponibilidade reduzida da água distribuída aos consumidores têm origem na deterioração natural dos sistemas, equipamentos e processos, sendo que os problemas relacionados à rede de distribuição são associados basicamente aos fatores que potencializam o fenômeno da corrosão e à formação de incrustações que podem vir a comprometer a qualidade e disponibilidade da água.

O vídeo inspeção (Figura 6) é uma técnica que auxilia na detecção desses problemas em tubulações de água e esgoto. O procedimento consiste na introdução de um carrinho no qual está acoplada uma câmera de vídeo. O conjunto apresenta um sistema de iluminação e programação robotizada, o equipamento vai registrando imagens com a sua movimentação e todas essas imagens são gravadas em vídeo de alta definição (www.abratt.org.br).

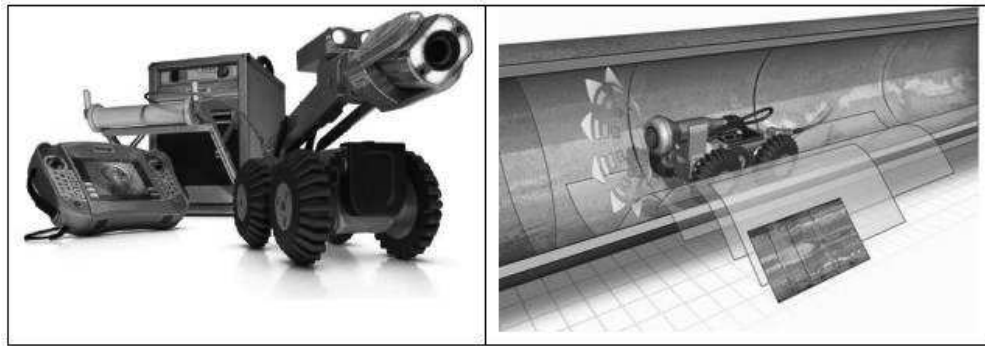


Figura 6– Vídeo inspeção

(Fonte: www.abratt.org.br)

Segundo Alegre (1996), a reabilitação pode ser considerada como todo um conjunto de atividades destinadas a transformar um sistema deficiente ou inadequado num sistema que forneça um serviço de boa qualidade aos consumidores, com custos de operação razoáveis. Estas atividades podem ir desde a substituição ou manutenção de condutas à total reconstrução do sistema, ou à otimização dos procedimentos e meios de apoio à operação.

A substituição das redes pode ser interpretada como à troca efetiva da tubulação (a antiga fica fora de operação), e pode ser feita por meio de vários métodos, destrutivos (abertura de valas) ou não-destrutivos (perfuração direcional, pipebursting, etc.).

O reforço da rede é a construção de tubo adicional ao existente, com diâmetro igual ou diferente, de forma a aumentar a capacidade de transporte do sistema. Pode ser feito através de métodos destrutivos ou não-destrutivos (ABRANCHES, 2009).

A figura 7 demonstra de forma esquemática os conceitos apresentados.

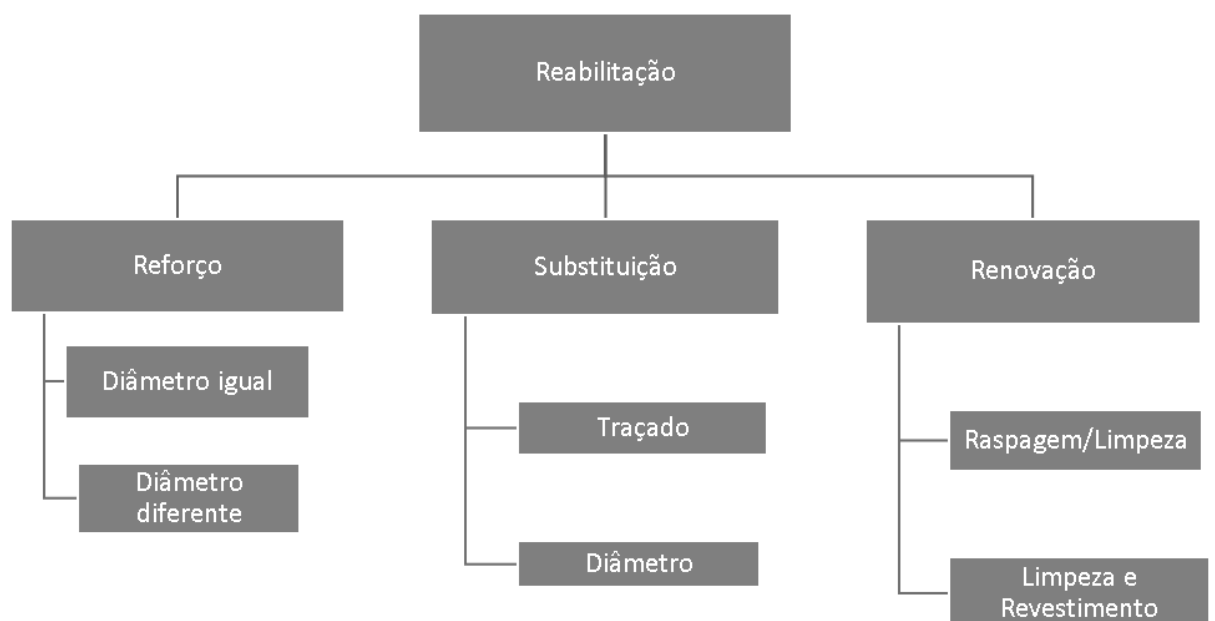


Figura 7- Conceitos de Reabilitação

(Fonte ABRANCHES, adaptado)

As principais técnicas de reabilitação em redes hidráulicas devem ser utilizadas em função do tipo de problema apresentado na rede, entretanto, nem sempre a melhor metodologia para a reabilitação da rede é a mais barata (OLIVEIRA *et. al.*, 2010).

Nos métodos convencionais, os serviços gerais de reabilitação das redes são executados por meio de grandes valas a céu aberto, chamadas também de método destrutivo, onde causam grande perturbação social, no trânsito e para o comércio local como podemos ver na Figura 8.



Figura 8- Interdição de ruas e avenidas

(Fonte www.180graus.com.br)

Segundo Sarzedas (2009) as intervenções não-destrutivas se caracterizam pela execução de pequenos acessos que possibilitam a introdução de outras tubulações ou melhorias nos tubos locais, por meio de limpeza e revestimento interno a fim de aumentar o diâmetro interno e diminuir a rugosidade. O custo de reabilitação com a utilização das técnicas não-destrutivas pode reduzir em cerca de 70% comparada as técnicas comuns.

A Figura 9 ilustra a diferença entre duas tubulações antes e após aplicação do novo revestimento interno.



Figura 9- Tubulação pré e pós reabilitação

(Fonte MARTINS et al, 2007)

Quando as mesmas não possuem capacidade estrutural devem ser substituídas, cabendo técnicas mais exigentes para sua realização quando couberem cuidados especiais para as intervenções (SABESP, 2008).

3.4 TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO

3.4.1 Limpeza das tubulações

A limpeza periódica das tubulações é uma das formas utilizadas para manter a capacidade de fluxo nos sistemas de distribuição de água. Destacam-se os equipamentos dotados de lâminas de aço cortantes seguidas de rodos de borracha que fazem a raspagem das incrustações existentes (método “drag”) e os “pigs” (OLIVEIRA **et.al.**,2010).

Os “pigs” são dispositivos inseridos no sistema, direcionados no sentido do fluxo da água e empurrados por fluidos pressurizados e viajam livremente, efetuando a remoção e subsequente descarga de todo o material estranho acumulado, aderido ou depositado (VENTURINI; BARBOSA, 2003). Os “Pigs” são parecidos com uma broca lisa, ou seja, é um cilindro de espuma de poliuretano com uma das pontas em perfil parabólico, com base côncava. Na Figura 10 é possível observar os vários modelos de “pig” que podem ser empregados no sistema de abastecimento de água.

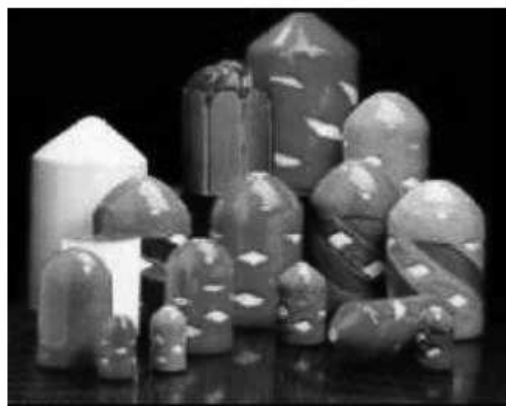


Figura 10- Modelos de Pigs
(Fonte VENTURINI; BARBOSA, 2003)

No método “drag”, para a limpeza completa da tubulação, o equipamento é arrastado dentro da tubulação até que todo o material estranho seja retirado completamente. O limpador provido de uma série de lâminas raspadoras de aço e rodinhos de borracha (Figura 12) é arrastado para as duas direções por um guincho posicionado ao nível da terra, através de um ponto de acesso (Figura 11).

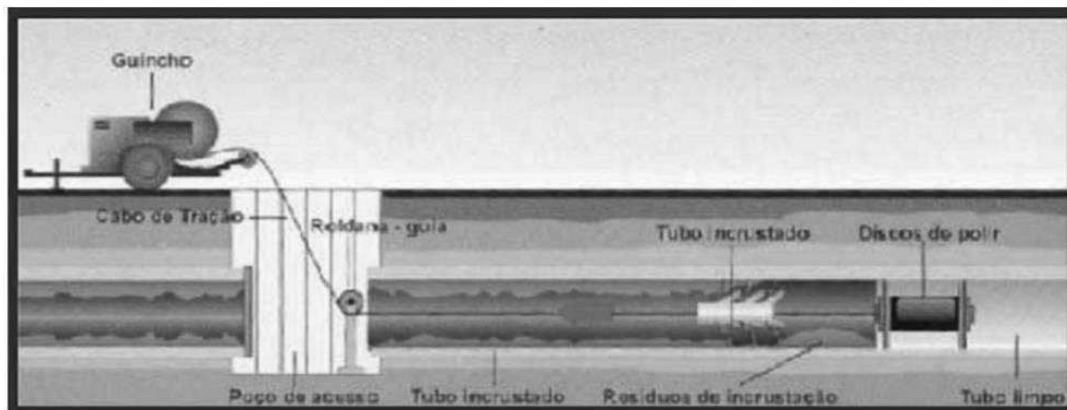


Figura 11- Esquema de limpeza de tubulação

(Fonte SABESP, 2008)



Figura 12- Raspadores e Discos de Polimento

(Fonte Sanit, 2008)

3.4.2 Substituição das tubulações

Esta medida pode ser empregada quando as tubulações apresentam um grande número de rompimentos ou estrutura da tubulação comprometida, causando grandes

perdas no sistema. A substituição das tubulações pode ser realizada de maneira convencional, ou seja, com abertura de vala a céu aberto. Nos sistemas de distribuição de médio e grande porte, a abertura de vala é executada por uma máquina escavadeira, nas empresas com falta de equipamento a abertura é feita manualmente, aumentando o tempo de execução do serviço (VENTURINI; BARBOSA, 2003).

No Brasil quando as redes começam a apresentar problemas de altos índices de rompimento, altas taxas de incrustações e corrosão, é comum efetuar a sua substituição. A substituição deveria ser encarada como opção e não como alternativa única, pois, além de ser o método de maior custo, exige a remoção de grande área pavimentada, movimento de terra, corte no abastecimento aos usuários além dos transtornos para a população da região (VENTURINI; BARBOSA, 2003).

O serviço de substituição de rede por método não destrutivo, ou seja, sem a abertura de vala a céu aberto, é constituído por um conjunto de equipamentos e ferramentas projetadas para romper as redes existentes que apresentam problemas estruturais ou de insuficiência hidráulica, causados pela degradação da tubulação, ou pela necessidade de aumento da capacidade da rede (ABRANCHES, 2009).

Dentre os métodos não-destrutivos, a reconstituição da rede pode ser executada por diversas formas, sendo a mais comum delas a inserção para o rompimento. A técnica consiste em arrebentar o tubo existente pelo uso de uma força radial de dentro da tubulação sendo que os fragmentos são comprimidos para o exterior e uma nova tubulação é puxada atrás da cavidade formada pelo equipamento de fragmentação. Ainda, existe a técnica de inserção sem destruição, onde a nova rede é colocada dentro da tubulação existente preservando a anterior (OLIVEIRA *et.al.*,2010).

3.4.3 Renovação por revestimento da tubulação

3.4.3.1 Revestimento de Argamassa Epóxi

O processo do revestimento de resina epóxi é uma técnica de revestimento não estrutural, cujo o principal objetivo é melhorar as características hidráulicas das redes e ao mesmo tempo prevenir a acumulação de tubérculos nas paredes das tubulações, portanto não irá corrigir nenhuma deterioração da tubulação. Entretanto, uma vez aplicado esse revestimento, não haverá contato entre a água potável e a tubulação antiga, sendo que dessa maneira reduzirá futura deterioração no interior das tubulações. Na prática o máximo de comprimento que pode ser revestido de uma vez, é de aproximadamente 200 metros. Os poços de acesso serão escavados em locais estratégicos para coincidir com as válvulas e outros acessórios. Os tipos de material que podem ser jateados com sucesso são; o ferro fundido, ferro fundido dúctil, cimento amianto e as tubulações de aço. Na Figura 13 pode-se observar o desenho esquemático da aplicação desta técnica (VENTURINI; BARBOSA, 2003).

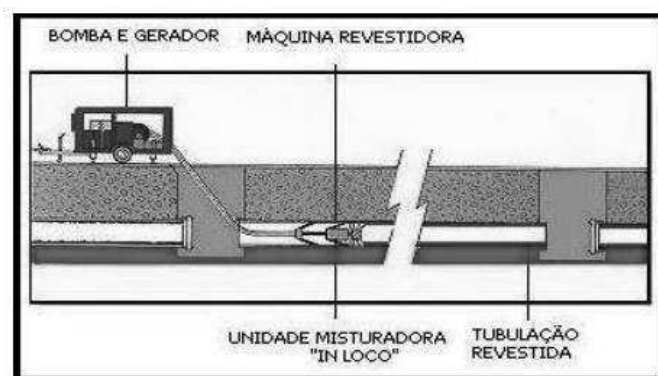


Figura 13- Aplicação de revestimento de resina epóxi
(Fonte VENTURINI; BARBOSA, 2003)

3.4.3.2 Argamassa de Cimento

A aplicação de argamassa de cimento é um método comum e relativamente barato de recuperação de redes de distribuição de água. A argamassa tem duas funções: a alcalinidade do cimento inibe a corrosão dos tubos de aço e a superfície interna pouco rugosa reduz o arrasto hidráulico e melhora as características do fluxo (ABRATT, 2010).

Consiste da introdução de um aparelho centrífugo (Figura 14) que jateia as paredes da tubulação com a argamassa proveniente de uma betoneira onde é realizada a mistura. Simultaneamente ao equipamento de aplicação, é acoplado a um dispositivo de compactação e alisamento para que a distribuição do revestimento na parede da tubulação seja uniforme.

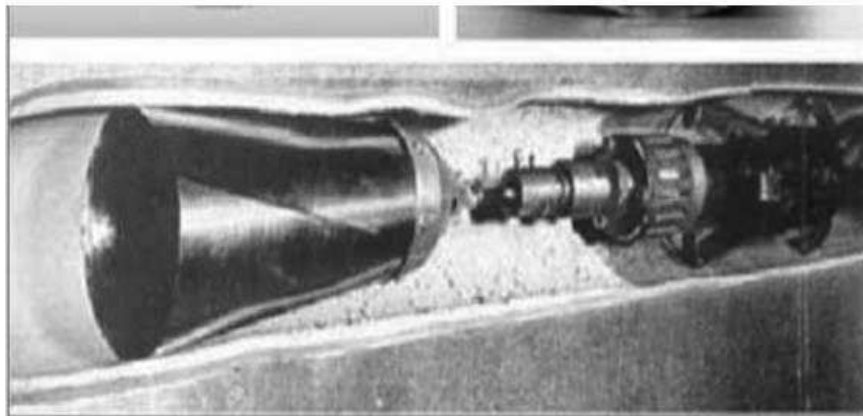


Figura 14– Revestimento com argamassa de cimento

(Fonte SABESP, 2008)

A aplicação do revestimento de argamassa de cimento é um dos métodos mais utilizados, e se destacam pelas seguintes vantagens: economia de 30 a mais de 90%

sobre o custo total da reposição; aumento da capacidade hidráulica que é conservada ao longo do tempo; redução dos custos de bombeamento e manutenção; elimina os vazamentos; garantia da manutenção da potabilidade da água conseguida pela eliminação da água vermelha causada pela formação de ferrugem; eleva a pressão de distribuição; proteção eficaz da parede do tubo eliminando a recorrência de corrosão nas tubulações de aço e ferro fundido; redução da deterioração da qualidade da água distribuída , incluindo a redução da demanda de cloro na distribuição (VENTURINI; BARBOSA, 2003).

3.4.3.3 Argamassa Acrílica

O revestimento executado com argamassa acrílica permite uma expectativa de vida maior que a argamassa de areia e cimento. A argamassa acrílica é composta de areia e cimento, aditivada com polímeros ou resina acrílica, tornando-a mais nobre e aumentando as características de adensamento, impermeabilidade, coesão, fluidez, trabalhabilidade e durabilidade (CAPRIGLIONI; BURGER, 2009).

A argamassa acrílica é inserida na tubulação pelo processo de pulverização centrifugada, que consiste da introdução de turbina pneumática com duas entradas, uma para argamassa e outra para o ar comprimido. Após a pulverização, a argamassa é secada com ar quente de forma controlada. Em quatro horas após a secagem, o abastecimento pode ser restabelecido (OLIVEIRA **et.al.**, 2010).

3.5 SISTEMAS DE SUPORTE DE DECISÃO

Os sistemas de suporte à decisão é uma forma de modelo de dados para tomada de decisões com qualidade e baseadas no mesmo, ou seja, para tomar a decisão certa se baseia na qualidade dos seus dados e a capacidade de filtrar, analisar e descobrir as tendências nas quais podem ser criadas soluções e estratégias de auxílio na tomada de decisão. Para Carneiro e Leal (2008) os sistemas de apoio à tomada de decisão podem ser considerados os sistemas que possuem interatividade com as ações do usuário, oferecendo dados e modelos para a solução de problemas semi-estruturados e focando a tomada de decisão.

O decisor ou tomador de decisões é a figura central e “pensante” do sistema de suporte a decisão. O decisor deverá consultar o sistema como ferramenta e receber informações que serão utilizadas para melhorar a qualidade de suas decisões. No campo de Recursos Hídricos, as tomadas de decisões se dão por meio de decisões em conselhos, comitês e audiências públicas e os decisores podem se posicionar em qualquer nível hierárquico (ONO, 2015).

Ladadie e Sullivan (1986) destacam que um SSD deve possuir um nível adequado de generalização e flexibilidade para que possa se adaptar a mudanças que venham a ocorrer no problema analisado ou no contexto do processo decisório.

Atualmente existem diversos modelos de otimização para reabilitação das redes de distribuição, todos relacionados a SSDs. Para uma melhor compreensão de como funciona um modelo de otimização para reabilitação de redes de água, Davis (2000) separou em quatro grupos (Figura 15) para identificar os fatores relevantes numa ferramenta completa de apoio a tomada de decisão. Sendo eles: fatores de engenharia (resultados), técnicos (viabilidade da reabilitação), políticas organizacionais (gerenciamento de riscos e de patrimônio) e externos (agências reguladoras e consumidores).

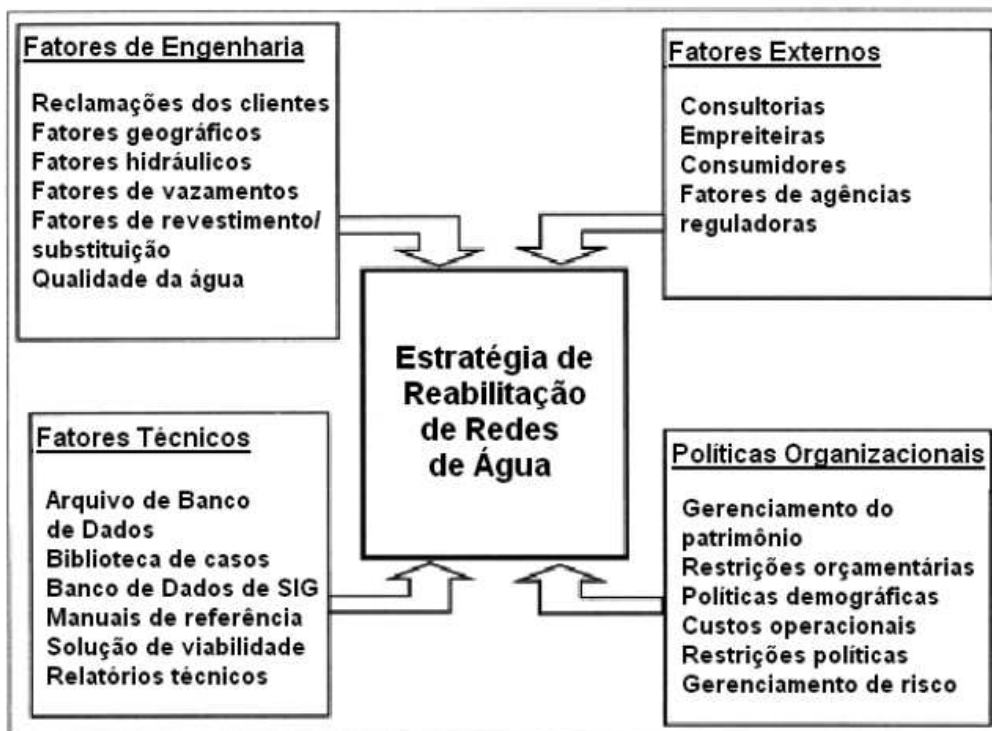


Figura 15– Fatores a serem considerados numa ferramenta de apoio a decisão para reabilitação de redes de água

(Fonte DAVIS, 2000)

4. METODOLOGIA

O modelo proposto para a análise de tomada de decisão para reabilitação da rede foi dividido em três etapas. A primeira etapa compreende a construção do simulador hidráulico da nossa rede, que será realizada com o simulador hidráulico EPANET (programa computacional aberto e livre), e calibrado com os dados referentes a situação atual do sistema. A etapa seguinte é a otimização da tomada de decisão, baseado na lógica Fuzzy, onde seus conjuntos serão reproduzidos na plataforma Fuzzy do programa computacional MATLAB.

A terceira etapa representa a resposta final do modelo, ou seja, o planejamento otimizado da reabilitação do sistema de abastecimento de água. Minimização de custos, vazamentos e impactos sociais são os critérios que o sistema de apoio à decisão considera, simultaneamente, para gerar o planejamento. Os critérios avaliados devem gerar a relação mais ideal entre a satisfação da sociedade (impactos sociais), proteção ao meio ambiente (impactos ambientais) e as metas econômicas (minimização de custo).

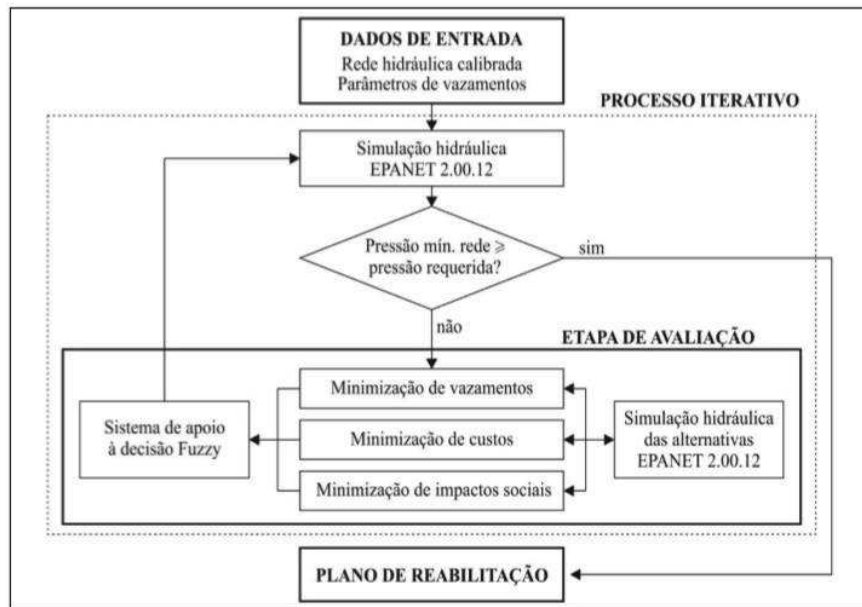


Figura 16- Modelo proposto de planejamento otimizado de reabilitação de redes de abastecimento de água

(Fonte MOREIRA, 2013)

4.1 SOFTWARES

4.1.1 Epanet

O EPANET 2.0 foi desenvolvido pela U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), e foi escolhido por ser um simulador amplamente aceito pela comunidade internacional. A maioria dos sistemas de abastecimento de água existentes foi modelado neste programa (LOUREIRO; TEIXEIRA COELHO, 2004).

Segundo Loureiro e Teixeira Coelho (2004) o EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade de água de sistemas de distribuição em pressão. A simulação

estática permite reproduzir as características do sistema simulado para um dado cenário de consumos, como se deles fornecessem uma fotografia. Em complemento desta, a simulação dinâmica é utilizada em sistemas de distribuição de água, quando é efetuada uma simulação da evolução do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de equilíbrio hidráulico obtida para sucessivos instantes. Este programa permite obter os valores da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos passos de cálculo.

De acordo com Loureiro e Coelho (2004), o EPANET pode ajudar a analisar alternativas estratégicas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água através do sistema, através de, por exemplo:

- Alterações na utilização de origens de água num sistema com múltiplas origens;
- Alteração de esquemas de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável;
- Utilização de tratamento adicional, como seja a recloração;
- E seleção de tubagens para limpeza e substituição.

4.1.2 MATLAB

De acordo com seu desenvolvedor, a MathWorks, o MATLAB é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico, integrando análises numéricas, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional, permitindo a resolução de problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagens como C ou R. Sua plataforma

Fuzzy permite uma análise adequada dos parâmetros que serão avaliados, além da facilidade de sua interface.

4.2 CRITÉRIOS AVALIADOS

A presente pesquisa seguiu o método de avaliação de critérios proposto por Moreira (2013), dividindo-se em três parâmetros de avaliação que foram analisados independentemente para menor subjetividade da análise. Sendo divididos em critério ambiental (impactos ambientais), econômico (minimização de custos) e social (impactos gerados na sociedade).

Trata-se de uma análise subjetiva, desde que a determinação dos valores desses critérios é tarefa para o técnico responsável da reabilitação.

4.2.1 Ambiental

O critério ambiental foi analisado com base no volume perdido por vazamentos e na idade das tubulações, porém, outros critérios podem ser facilmente incluídos.

Para a quantificação das perdas oriundas dos vazamentos, utilizou-se a formulação proposta por Tucciarelli (1999), que defende a hipótese de que cada sistema tem seus parâmetros característicos para o modelo de vazamentos, os quais devem ser calibrados para possibilitar uma estimativa razoável. Assume-se que os vazamentos são distribuídos ao longo da superfície de área das tubulações e que o volume perdido por vazamentos em cada nó é expresso pela Eq. (4.1.)

$$QL_i = (H_i - Z_i)^a \sum_{j=i}^n \frac{\pi}{2} \times D_{ij} \times \theta_{ij} \times L_{ij} \quad (4.1)$$

onde QL_i é a vazão perdida por vazamentos quantificado do nó i , H_i é a energia total disponível no nó i , Z_i é cota topográfica referente ao nó i , a é o expoente de perda referente ao setor de vazamentos que o nó i pertence; n é o conjunto de nós cujos trechos são interconectados ao nó i ; D_{ij} e L_{ij} são o diâmetro e o comprimento, respectivamente dos trechos j ligados ao nó i , e θ é o coeficiente de vazamentos, por unidade de superfície de tubulação, do trecho j do nó i .

A formulação proposta por Tucciarelli (1999) considera o coeficiente de vazamentos (θ), que depende basicamente das características do sistema (idade e deterioração das tubulações e tipo de solo, dentre outras) e o expoente de vazamento (a). O valor do coeficiente de vazamento θ adotado é baseado no valor adotado por FORMIGA e CHAUDHRY (2002), $10^{-7} m^{-0.18} s^{-1}$.

Para cada interação proposta na rede, será calculado o total de vazamentos de cada intervenção. Cada simulação resulta de uma intervenção proposta (possível intervenção) e o vazamento total na rede será calculado como a soma dos vazamentos em todos os trechos.

De posse desse conjunto de valores estimados de volume perdido por vazamentos, o técnico responsável pela reabilitação designa um intervalo de 1 a 10 para cada resultado das simulações, levando em consideração também a idade da tubulação, pois, uma tubulação antiga é mais propícia a apresentar comprometimento funcional mesmo que esteja em perfeito funcionamento.

4.2.2 Econômico

Para determinar os impactos econômicos (custos) das intervenções ou modificações nas tubulações da rede, foi usado como indicador o gradiente de custo (BEZERRA, 2005; GOMES et al. 2008; GOMES et al. 2009). O gradiente de custo G_c de cada trecho corresponde à razão entre o acréscimo de custo produzido pela intervenção (substituição ou limpeza) e o ganho de pressão no ponto (nó) mais desfavorável (menor pressão) da rede. Em resumo, o gradiente de custo indica o preço por unidade de pressão ganha (no nó mais desfavorável) devido às intervenções realizadas na rede. O G_c é calculado pela Eq. (4.2.)

$$G_c = C_{ij} - C_{i(j-1)} / \Delta P \quad (4.2.)$$

onde G_c é o gradiente de custo, $C_{i(j-1)}$ é o custo das intervenções no trecho i na iteração $(j - 1)$, C_{ij} é custo das intervenções no trecho i na iteração (j) , i é o conjunto de trechos da rede, j é o conjunto de iterações e ΔP é o ganho de pressão no nó mais desfavorável (m).

Com base nos dados originais da rede (1ª iteração) ou nos resultados obtidos na iteração anterior, efetua-se a simulação da rede no EPANET para a obtenção das pressões em todos os nós. Uma vez detectado o nó mais desfavorável (menor pressão), inicia-se o processo de cálculo do Gradiente de custo. Em cada iteração, testar-se-ão as possíveis intervenções (limpeza, substituição, duplicação etc.) em cada trecho, um de cada vez. Os custos representam a soma dos investimentos financeiros necessários para a realização das medidas a serem implantadas no sistema. Os custos associados a projeto de reabilitação de redes são:

- $C_{ampliação}$ é o custo de implantação de novos trechos.
- $C_{limpeza}$ é o custo referente a limpeza das tubulações.

- $C_{implantação}$ é o custo de implantação de tubulações em paralelo. O custo de implantação de tubulações em paralelo é um caso particular do custo de ampliação, entretanto, na maioria das aplicações práticas seu valor é diferenciado. A duplicação de tubulações está diretamente relacionada a um sistema existente, e dessa forma implica em um desconforto à população nas proximidades do local da reabilitação.
- $C_{substituição}$ é o custo de substituição de tubulações. O custo de substituição de tubulações é a opção mais onerosa, tendo em vista que para substituir tubulações é necessário realizar obstruções do tráfego e/ou interrupções no abastecimento. Esta parcela do custo engloba a substituição de tubulações por métodos destrutivos e não destrutivos. O primeiro acarreta menores custos, porém maiores impactos sociais.

Semelhante ao critério ambiental, os valores de gradiente de custo (G_c) foram padronizados para o intervalo de 1 a 10.

4.2.3 Social

A questão social é de caráter subjetivo, e depende de o técnico responsável pela reabilitação analisar quais regiões, datas e horários serão mais e menos adequados para a prestação do serviço necessário. A substituição da rede, por meio de abertura de valas, causa grande impacto no trânsito e comércio local. O critério social refere-se ao transtorno, impacto social, causado a sociedade que trafega no local ou região. Na prática, antes de qualquer intervenção em uma rede urbana, os gestores devem analisar bem o funcionamento do trânsito no local, o comportamento do comércio no entorno das ruas que poderão ser interditadas, tudo isso para garantir uma melhor mobilidade e pleno funcionamento das vias.

Para avaliação do impacto social causado por intervenções realizada em trechos dessa rede, foi adotado um conjunto de valores de acordo com o grau de importância da via (rua) e com o tipo de intervenção realizada na rede (limpeza ou substituição). Os valores maiores representam as intervenções que mais impactam nas ruas, logo, são as menos indicadas de serem realizadas. Quando a intervenção realizada for uma substituição, o peso para essa substituição será de acordo com a via onde for realizada. Após ocorrer a primeira intervenção no trecho, as próximas iterações terão o peso para o critério social igual a 1, favorecendo outra substituição em um trecho que já está previsto (em uma interação anterior) uma substituição. Como uma intervenção de substituição para essa via já está prevista ao longo do processo iterativo, é preferível que outra substituição nesse trecho seja realizada nas iterações seguintes, já que, na prática, quanto menos trechos forem substituídos, menor será o impacto à sociedade.

4.3 SISTEMA FUZZY

Existem diferentes métodos de inferência Fuzzy com diferentes propriedades. O MATLAB disponibiliza dois métodos de análise, o Mamdani e o Sugeno. Analisando as pesquisas recentes que adotaram o sistema de apoio à decisão Fuzzy, verificou-se a adoção do método de Mamdani em seus modelos. Logo, optou pelo método Mamdani e funções de pertinência triangulares. O método de Mamdani é mais utilizado devido sua simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana.

Na construção do sistema Fuzzy desta pesquisa, as variáveis de entrada foram divididas em três categorias. Através de uma análise qualitativa dos padrões de comportamento do tipo de sistema de apoio à decisão em conjunto com o conhecimento prático gerado pelas simulações, determinou-se as variáveis de entrada “Custo” (critério econômico), “Vazamento” (critério ambiental) e “Transtorno” (critério social), e a variável de saída “Peso” (Figura 17).

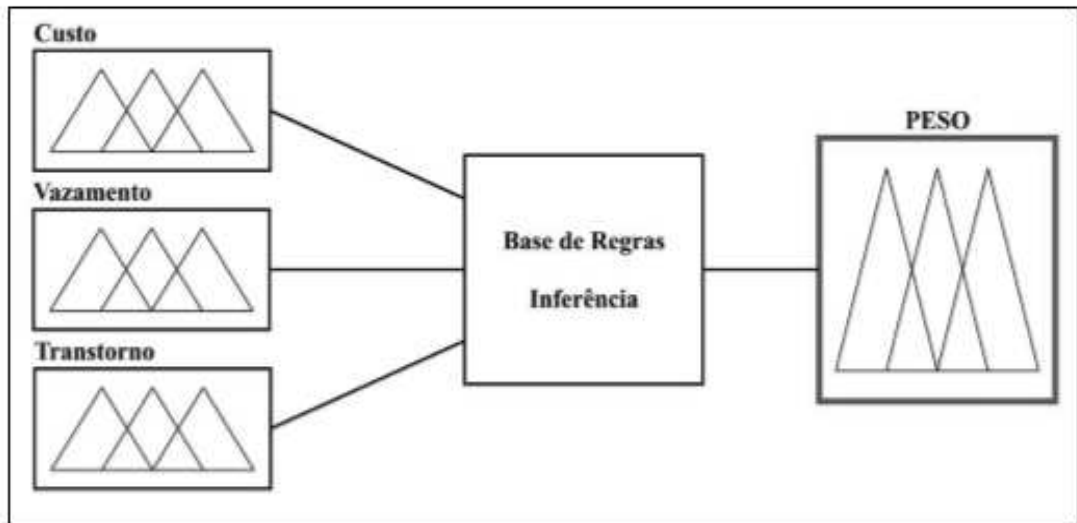


Figura 17- Variáveis do sistema Fuzzy

(Fonte MOREIRA, 2013)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para execução da metodologia proposta foi utilizada uma Rede Exemplo proposta por Porto (1998) adaptada para um aumento da demanda de consumo em 15% em cada nó.

O ideal seria aplicar sobre uma rede preexistente, só assim poderíamos comparar os resultados obtidos com a realidade da rede. Mas em virtude do pouco tempo e, da dificuldade de obtenção de uma rede com parâmetros calibrados corretamente à situação real, optou-se pelo uso de uma rede já trabalhada em outros modelos.

5.1 REDE EXEMPLO 1

Adotou-se como o primeiro estudo de caso a rede de distribuição de água da cidade de Itororó, na Bahia, adaptado de Porto (1998). Esta rede é composta por 17 nós consumidores, conectados entre si por 20 trechos que formam 3 anéis, a Figura 18 mostra o esquema da rede de abastecimento, os sentidos dos escoamentos admitidos para as vazões e as numerações dos nós e dos trechos. As demandas dos nós foram majoradas em 15% em relação aos valores adotados inicialmente, para assim, simularmos um aumento de demanda não previsto no projeto original. Os dados da rede são mostrados nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2, enquanto os custos são apresentados na Tabela 5.3. Os diâmetros foram retirados dos trabalhos de Savic e Waters (1997) e Iglesias *et al.* (2004).

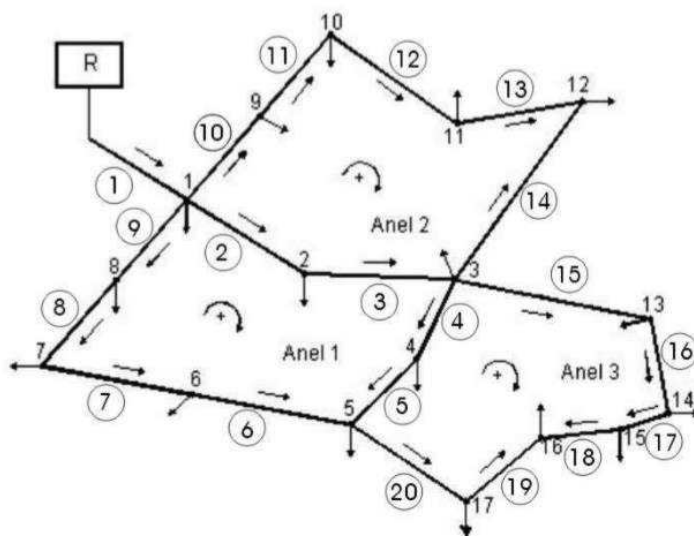


Figura 18- Exemplo 1 de rede de distribuição
(Porto, 1998)

Tabela 5.1 – Dados dos trechos na Rede Exemplo 1 (continua)

Estado da Rede Proposta			
Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)
1	110	324	355,6
2	110	124	203,2
3	110	184	203,2
4	110	206	101,6
5	110	103	101,6
6	110	202	50,8
7	110	134	76,2
8	110	227	101,6
9	110	167	203,2
10	110	166	101,6
11	110	152	76,2
12	110	168	76,2
13	110	177	50,8

Tabela 5.1 – Dados dos trechos na Rede Exemplo 1 (conclusão)

Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)
14	110	225	152,4
15	110	254	152,4
16	110	263	152,4
17	110	133	101,6
18	110	321	50,8
19	110	105	76,2
20	110	169	101,6

Tabela 5.2 – Dados dos nós na Rede Exemplo 1

Situação Proposta			
Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Pressão (mca)
RNF	250	-	-
1	220,5	7,10	28,53
2	215,6	2,68	30,92
3	210,4	5,35	32,73
4	210,5	1,97	24,46
5	209,5	6,11	22,44
6	213,2	4,92	22,99
7	218,5	4,83	23,45
8	218,7	3,48	30,05
9	211,5	4,29	33,85
10	213,5	2,60	27,32
11	205,5	4,01	33,89
12	208,8	8,58	33,59
13	215,5	7,14	23,46
14	212,6	5,70	23,75
15	207,5	11,30	24,02
16	219,4	5,98	8,03
17	220,5	1,70	9,59

Através da simulação da rede proposta no EPANET 2.0, identificaram-se as pressões em cada nó consumidor e o nó mais desfavorável, destacado na Tabela 5.1. E assim iniciaram-se os cálculos dos critérios (pesos) econômico, ambiental e social, com um plano de ação voltado a obtenção da pressão mínima estipulada por norma de 15 mca no nó número 16, através de possíveis intervenções em cada trecho. Quanto menor o valor adotado, maior a possibilidade de o trecho sofrer intervenção.

Tabela 5.3 – Custo das intervenções (HALHAL *et al.*, 1997)

Diâmetro (mm)	Custo (R\$) /m			
	Novo Tubo	Instalação	Substituição	Limpeza
25,4	2,00	2,00	4,00	1,38
50,8	5,00	2,00	7,00	3,46
76,2	8,00	2,00	13,00	5,53
101,6	11,00	2,00	13,00	7,60
152,4	16,00	5,00	21,00	11,05
203,2	23,00	5,00	28,00	15,86
254	32,00	5,00	37,00	22,03
304,8	50,00	15,00	65,00	34,30
355,6	60,00	15,00	75,00	41,08
406,4	90,00	15,00	105,00	61,26

Iniciou-se os cálculos com a definição do critério econômico, através do gradiente de custo proposto por Bezerra (2005) e Gomes (2008). Para isso, calcularam-se o custo de cada possível intervenção baseados na Tabela 5.3, e os ganhos de pressão em cada um dos trechos através da simulação hidráulica da rede no Epanet 2.0, considerando sempre a substituição do trecho pelo diâmetro nominal superior ao atual e a limpeza aumentando o coeficiente de H.W. para um valor de 150. Descartaram-se as candidatas

intervenções que obtiveram um ganho de pressão menor que 0,25 no nó mais desfavorável, destacadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Cálculo e definição do critério econômico (continua)

Critério Econômico							
Trecho	Intervenção	Comprimento do trecho (m)	Diâmetro (mm)	Custo da intervenção (R\$)	Ganho de Pressão (mca)	Custo por mca (R\$)	Peso
1	Substituição	324	355,6	63180,00	0,46	137347,83	10,00
	Limpeza			13309,92	0,42	31690,29	3,04
2	Substituição	124	203,2	8556,00	1,39	6155,40	1,36
	Limpeza			1866,20	0,92	2028,48	1,09
3	Substituição	184	203,2	12696,00	1,9	6682,11	1,40
	Limpeza			2769,20	1,25	2215,36	1,10
4	Substituição	206	101,6	7622,00	4,42	1724,43	1,07
	Limpeza			1565,60	2,19	714,89	1,00
5	Substituição	103	101,6	3811,00	1,6	2381,88	1,11
	Limpeza			782,80	0,79	990,89	1,02
6	Substituição	202	50,8	3636,00	0,91	3995,60	1,22
	Limpeza			698,92	0,33	2117,94	1,10
7	Substituição	134	76,2	3216,00	0,64	5025,00	1,29
	Limpeza			714,22	0,36	1983,94	1,09
8	Substituição	227	101,6	8399,00	0,81	10369,14	1,64
	Limpeza			1725,20	0,42	4107,62	1,23
9	Substituição	167	203,2	11523,00	0,02	576150,00	-
	Limpeza			2513,35	0,02	125667,50	-
10	Substituição	166	101,6	6142,00	0,08	76775,00	-
	Limpeza			1261,60	0,04	31540,00	-
11	Substituição	152	76,2	3648,00	0,1	36480,00	-
	Limpeza			840,56	0,05	16811,20	-
12	Substituição	168	76,2	4032,00	0,02	201600,00	-
	Limpeza			929,04	0,02	46452,00	-
13	Substituição	177	50,8	3186,00	0	0,00	-
	Limpeza			612,42	0	0,00	-
14	Substituição	225	152,4	11475,00	0	0,00	-
	Limpeza			2486,25	0	0,00	-
15	Substituição	254	152,4	12954,00	0,79	16397,47	2,04
	Limpeza			2806,70	0,47	5971,70	1,35

Tabela 5.4 – Cálculo e definição do critério econômico (conclusão)

Trecho	Intervenção	Comprimento do trecho (m)	Diâmetro (mm)	Custo da intervenção (R\$)	Ganho de Pressão (mca)	Custo por mca (R\$)	Peso
16	Substituição	263	152,4	13413,00	0,52	25794,23	2,65
	Limpeza			2906,15	0,3	9687,17	1,59
17	Substituição	133	101,6	4921,00	1,06	4642,45	1,26
	Limpeza			1010,80	0,55	1837,82	1,08
18	Substituição	321	50,8	5778,00	1,86	3106,45	1,16
	Limpeza			1110,66	0,62	1791,39	1,07
19	Substituição	105	76,2	2520,00	1,56	1615,38	1,06
	Limpeza			580,65	0,88	659,83	1,00
20	Substituição	169	101,6	6253,00	1,2	5210,83	1,30
	Limpeza			1284,40	0,6	2140,67	1,10

Para aplicação do critério ambiental, calculou-se o volume de vazamentos, proposto por Tucciarelli (1999) considerando-se uma idade fictícia de 10 anos em todos os trechos, e com base nesses valores determinaram-se os pesos do critério ambiental (Tabela 4.5).

Tabela 5.5 – Cálculo e definição do critério ambiental (continua)

Trecho	Ação	Carga Hidráulica (m)	Vazamento	Soma de Vazamentos	Peso
1	Substituição	249,49	5,99E-04	2,10E-03	6,43
	Limpeza	249,45	5,24E-04	2,03E-03	2,87
2	Substituição	248,17	1,61E-04	2,06E-03	4,34
	Limpeza	247,6	1,27E-04	2,03E-03	2,72
3	Substituição	246,4	1,78E-04	2,07E-03	4,80
	Limpeza	245,64	1,39E-04	2,03E-03	2,98
4	Substituição	244,41	1,67E-04	2,11E-03	6,59
	Limpeza	240,93	1,00E-04	2,04E-03	3,44

Tabela 5.5 – Cálculo e definição do critério ambiental (conclusão)

Trecho	Ação	Carga Hidráulica (m)	Vazamento	Soma de Vazamentos	Peso
5	Substituição	238,54	7,29E-05	2,09E-03	2,68
	Limpeza	237,77	4,66E-05	2,07E-03	1
6	Substituição	234,73	6,22E-05	2,01E-03	2,01
	Limpeza	234,28	4,07E-05	1,99E-03	1
7	Substituição	240,38	6,60E-05	2,05E-03	3,89
	Limpeza	238,99	4,73E-05	2,03E-03	3,01
8	Substituição	248,12	1,90E-04	2,13E-03	7,44
	Limpeza	245,32	1,16E-04	2,05E-03	3,99
15	Substituição	238,54	7,29E-05	2,09E-03	6,24
	Limpeza	237,77	4,66E-05	2,07E-03	2,05
16	Substituição	243,05	3,19E-04	2,18E-03	10
	Limpeza	242,25	2,49E-04	2,11E-03	6,68
17	Substituição	240,29	1,04E-04	2,07E-03	5,03
	Limpeza	238,38	6,55E-05	2,04E-03	3,20
18	Substituição	235,2	6,07E-05	2,05E-03	3,93
	Limpeza	234,45	3,85E-05	2,03E-03	2,89
19	Substituição	235,8	6,63E-05	2,06E-03	4,42
	Limpeza	235,04	4,22E-05	2,04E-03	3,28
20	Substituição	238,54	7,29E-05	2,09E-03	5,94
	Limpeza	237,77	4,66E-05	2,07E-03	4,71

Para aplicação do critério social, que visa incluir no modelo a análise do impacto das obras no cotidiano da população da região, determinou-se notas (pesos) para as ruas e função do tipo de intervenção. A Limpeza (intervenção que visa diminuir o coeficiente de rugosidade sem a necessidade de haver troca da tubulação) é uma reabilitação do tipo não destrutiva, ou seja, não há a necessidade de abrir valas. Logo, as notas foram adotadas de modo a refletir que a opção “limpeza” causa transtornos menores que a “substituição” Tabela 5.6. Em uma aplicação real, essas notas são adotadas de acordo com a análise subjetiva do técnico responsável pelo projeto de reabilitação da rede.

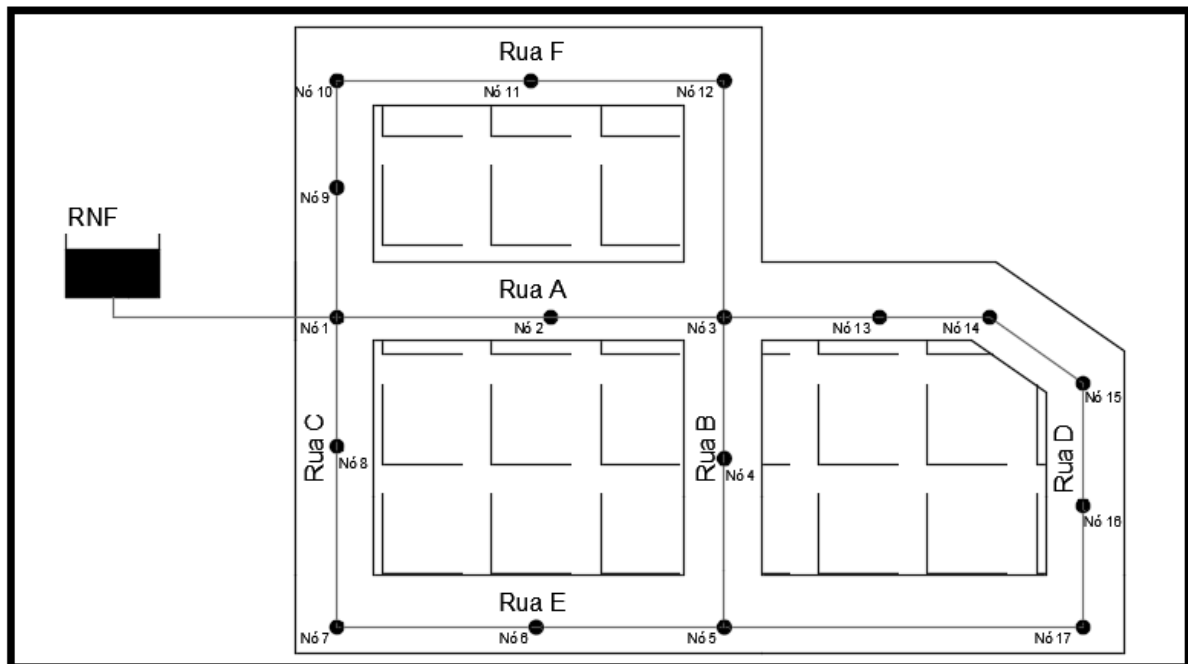


Figura 19- Rede Exemplo 1 (modificada de PORTO, 1998)

Tabela 5.6 – Valores padronizados para o critério social

	Rua					
	A	B	C	D	E	F
Trecho	1, 2, 3, 15, 16	4, 5, 14	8, 9, 10, 11	17, 18, 19	6, 7, 20	12, 13
Substituição	10	9	5	5	4	3
Limpeza	1	3	4	4	3	3

A cada iteração, o sistema Fuzzy, construído na plataforma Fuzzy do MATLAB 16 com base nas regras de inferência pré-determinadas, orienta qual a melhor opção de intervenção com base em uma análise multiobjetiva dos critérios analisados. A maior nota de Peso Total determina a melhor intervenção, e assim reinicia-se os cálculos para uma nova iteração até que todas as condições impostas sejam atendidas.

No caso particular da Rede Exemplo 1, o processo iterativo terminou na 9ª iteração, quando todos os nós alcançaram pressão superior mínima de 15 mca. A

evolução na configuração da rede, após cada intervenção realizada ao término de cada iteração, é mostrada nas tabelas 5.7 à Tabela 5.15, o estado final da rede está representado na Tabela 5.16, e a solução com a configuração final dos trechos na Tabela 5.17.

Tabela 5.7 – Primeira iteração (Limpeza do trecho 15)

1° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	3,09	4,19	1	6,13
2	Substituição	124	203,2	110	1,41	6,58	10	3,56
	Limpeza			150	1,13	3,94	1	6,11
3	Substituição	184	203,2	110	1,44	6,92	10	3,42
	Limpeza			150	1,15	4,05	1	6,09
4	Substituição	206	101,6	110	1,11	9,21	9	3,23
	Limpeza			150	1,05	4,42	3	6,10
5	Substituição	103	101,6	110	1,16	2,68	9	4,25
	Limpeza			150	1,07	1,00	3	6,37
6	Substituição	202	50,8	110	1,26	2,68	4	3,27
	Limpeza			150	1,14	1,00	3	6,37
7	Substituição	134	76,2	110	1,33	4,69	4	6,01
	Limpeza			150	1,13	3,63	3	6,26
8	Substituição	227	101,6	110	1,68	8,20	5	3,50
	Limpeza			150	1,27	4,05	4	6,19
15	Substituição	254	152,4	110	2,08	6,24	10	3,64
	Limpeza			150	1,39	2,05	1	6,62
16	Substituição	263	152,4	110	2,70	7,23	10	3,25
	Limpeza			150	1,64	4,38	1	6
17	Substituição	133	101,6	110	1,31	4,63	5	5,72
	Limpeza			150	1,12	3,15	4	6,23
18	Substituição	321	50,8	110	1,20	4,81	5	5,65
	Limpeza			150	1,12	3,62	4	6,21
19	Substituição	105	76,2	110	1,11	4,81	5	5,64
	Limpeza			150	1,00	3,62	4	6,21
20	Substituição	169	101,6	110	1,34	7,14	4	3,89
	Limpeza			150	1,14	5,83	3	5,57

Tabela 5.8 – Segunda iteração (Limpeza do trecho 5)

2° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	3,04	4,19	1	6,15
2	Substituição	124	203,2	110	1,36	6,58	10	3,56
	Limpeza			150	1,09	3,94	1	6,11
3	Substituição	184	203,2	110	1,40	6,92	10	3,42
	Limpeza			150	1,10	4,05	1	6,08
4	Substituição	206	101,6	110	1,07	9,21	9	3,23
	Limpeza			150	1,00	4,42	3	6,10
5	Substituição	103	101,6	110	1,11	2,68	9	4,25
	Limpeza			150	1,02	1,00	3	6,37
6	Substituição	202	50,8	110	1,22	4,69	4	3,51
	Limpeza			150	1,09	3,63	3	6,26
7	Substituição	134	76,2	110	1,28	8,20	4	3,62
	Limpeza			150	1,08	4,05	3	6,23
8	Substituição	227	101,6	110	1,62	6,24	5	4,89
	Limpeza			150	1,22	2,05	4	6,30
16	Substituição	263	152,4	110	2,76	7,23	10	3,24
	Limpeza			150	1,61	4,38	1	6
17	Substituição	133	101,6	110	1,28	4,63	5	5,72
	Limpeza			150	1,08	3,15	4	6,23
18	Substituição	321	50,8	110	1,12	4,81	5	5,64
	Limpeza			150	1,05	3,62	4	6,3
19	Substituição	105	76,2	110	1,07	4,81	5	5,93
	Limpeza			150	1,00	3,62	4	6,21
20	Substituição	169	101,6	110	1,31	7,14	4	3,89
	Limpeza			150	1,10	5,83	3	5,57

Tabela 5.9 – Terceira iteração (Limpeza do trecho 2)

3° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	5,36	10	1,76
	Limpeza			150	3,09	2,54	1	6,39
2	Substituição	124	203,2	110	1,40	3,70	10	3,92
	Limpeza			150	1,13	2,42	1	6,45
3	Substituição	184	203,2	110	1,44	3,86	10	3,87
	Limpeza			150	1,14	2,46	1	6,44
4	Substituição	206	101,6	110	1,11	4,94	9	3,84
	Limpeza			150	1,04	2,61	3	6,35
6	Substituição	202	50,8	110	1,33	1,78	4	6,32
	Limpeza			150	1,17	1,00	3	6,37
7	Substituição	134	76,2	110	1,35	2,78	4	6,27
	Limpeza			150	1,14	2,27	3	6,37
8	Substituição	227	101,6	110	1,72	4,48	5	5,76
	Limpeza			150	1,28	2,47	4	6,29
16	Substituição	263	152,4	110	2,76	10,00	10	2,71
	Limpeza			150	1,61	6,34	1	5,47
17	Substituição	133	101,6	110	1,32	4,01	5	5,95
	Limpeza			150	1,13	2,63	4	6,27
18	Substituição	321	50,8	110	1,19	2,75	5	5,95
	Limpeza			150	1,11	2,03	4	6,30
19	Substituição	105	76,2	110	1,11	2,84	5	5,94
	Limpeza			150	1,04	2,26	4	6,28
20	Substituição	169	101,6	110	1,34	4,09	4	6,18
	Limpeza			150	1,14	3,41	3	6,28

Tabela 5.10 – Quarta iteração (Limpeza do trecho 6)

4° iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	7,08	10	1,30
	Limpeza			150	3,04	3,10	1	6,30
3	Substituição	184	203,2	110	1,40	5,25	10	3,82
	Limpeza			150	1,10	3,22	1	6,18
4	Substituição	206	101,6	110	1,06	6,76	9	3,51
	Limpeza			150	1,00	3,37	3	6,28
6	Substituição	202	50,8	110	1,35	2,13	4	6,31
	Limpeza			150	1,16	1,00	3	6,37
7	Substituição	134	76,2	110	1,32	4,21	4	6,14
	Limpeza			150	1,10	3,22	3	6,29
8	Substituição	227	101,6	110	1,68	8,10	5	3,52
	Limpeza			150	1,25	4,27	4	6,12
16	Substituição	263	152,4	110	2,80	10,00	10	2,70
	Limpeza			150	1,63	6,49	1	5,34
17	Substituição	133	101,6	110	1,29	5,17	5	5,54
	Limpeza			150	1,09	3,23	4	6,23
18	Substituição	321	50,8	110	1,14	3,57	5	5,94
	Limpeza			150	1,07	2,55	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,06	3,84	5	5,93
	Limpeza			150	1,00	2,91	4	6,25
20	Substituição	169	101,6	110	1,30	5,48	4	5,77
	Limpeza			150	1,10	4,46	3	6,09

Tabela 5.11 – Quinta iteração (Limpeza do trecho 3)

5° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	6,44	10	1,58
	Limpeza			150	3,04	1,63	1	6,59
3	Substituição	184	203,2	110	1,42	4,23	10	3,82
	Limpeza			150	1,11	1,78	1	6,66
4	Substituição	206	101,6	110	1,07	6,05	9	3,73
	Limpeza			150	1,00	1,97	3	6,38
7	Substituição	134	76,2	110	1,23	2,89	4	6,26
	Limpeza			150	1,06	1,72	3	6,39
8	Substituição	227	101,6	110	1,52	7,65	5	3,60
	Limpeza			150	1,18	3,00	4	6,25
16	Substituição	263	152,4	110	2,84	10,00	10	2,69
	Limpeza			150	1,63	5,74	1	5,68
17	Substituição	133	101,6	110	1,29	4,13	5	5,90
	Limpeza			150	1,09	1,78	4	6,3
18	Substituição	321	50,8	110	1,15	2,23	5	5,96
	Limpeza			150	1,07	1,00	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,06	2,59	5	5,96
	Limpeza			150	1,00	1,44	4	6,30
20	Substituição	169	101,6	110	1,30	4,58	4	6,04
	Limpeza			150	1,10	3,31	3	6,29

Tabela 5.12 – Sexta iteração (Limpeza do trecho 1)

6° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	5,83	10	1,72
	Limpeza			150	3,04	1,39	1	6,64
4	Substituição	206	101,6	110	1,07	5,88	9	3,76
	Limpeza			150	1,00	1,96	3	6,38
7	Substituição	134	76,2	110	1,23	2,60	4	6,28
	Limpeza			150	1,06	1,52	3	6,40
8	Substituição	227	101,6	110	1,52	6,96	5	3,73
	Limpeza			150	1,18	2,68	4	6,27
16	Substituição	263	152,4	110	2,84	10,00	10	2,69
	Limpeza			150	1,65	5,90	1	5,64
17	Substituição	133	101,6	110	1,29	3,97	5	5,95
	Limpeza			150	1,09	1,72	4	6,31
18	Substituição	321	50,8	110	1,15	2,24	5	5,96
	Limpeza			150	1,07	1,00	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,06	2,57	5	5,96
	Limpeza			150	1,00	1,41	4	6,30
20	Substituição	169	101,6	110	1,30	4,39	4	6,09
	Limpeza			150	1,10	3,13	3	6,30

Nesta iteração, as pressões pretendidas na rede poderiam já ser alcançadas através da substituição do trecho 4, chegando a uma pressão de 16,1 mca no nó mais desfavorável que atenderia as condições propostas na rede; porém sua nota de Peso Total era muito baixa e as iterações continuaram seguindo a preferência dos critérios de maior Peso.

Tabela 5.13 – Sétima iteração (Limpeza do trecho 7)

7° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
4	Substituição	206	101,6	110	1,32	5,83	9	3,77
	Limpeza			150	1,01	1,96	3	6,38
7	Substituição	134	76,2	110	2,14	2,56	4	6,25
	Limpeza			150	1,32	1,48	3	6,41
8	Substituição	227	101,6	110	3,53	6,90	5	3,90
	Limpeza			150	1,90	2,68	4	6,27
16	Substituição	263	152,4	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	4,14	5,93	1	5,05
17	Substituição	133	101,6	110	2,42	3,92	5	5,82
	Limpeza			150	1,44	1,69	4	6,33
18	Substituição	321	50,8	110	1,71	2,24	5	5,98
	Limpeza			150	1,34	1,00	4	6,25
19	Substituição	105	76,2	110	1,31	2,57	5	5,96
	Limpeza			150	1,00	1,39	4	6,30
20	Substituição	169	101,6	110	2,46	4,35	4	5,96
	Limpeza			150	1,48	3,09	3	6,31

Tabela 5.14 – Oitava iteração (Limpeza do trecho 4)

8° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
4	Substituição	206	101,6	110	1,36	5,82	9	3,77
	Limpeza			150	1,03	1,96	3	6,38
8	Substituição	227	101,6	110	3,45	6,83	5	4,03
	Limpeza			150	1,86	2,56	4	6,29
16	Substituição	263	152,4	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	4,21	5,92	1	5,03
17	Substituição	133	101,6	110	2,42	3,89	5	5,82
	Limpeza			150	1,44	1,64	4	6,33
18	Substituição	321	50,8	110	1,78	2,26	5	5,98
	Limpeza			150	1,38	1,00	4	6,25
19	Substituição	105	76,2	110	1,31	2,62	5	5,96
	Limpeza			150	1,00	1,42	4	6,30
20	Substituição	169	101,6	110	2,48	4,42	4	5,93
	Limpeza			150	1,48	3,12	3	6,31

Tabela 5.15 – Nona iteração (Limpeza do trecho 17)

9° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
8	Substituição	227	101,6	110	4,31	6,76	5	3,88
	Limpeza			150	2,20	2,40	4	6,25
16	Substituição	263	152,4	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	4,23	5,80	1	5,06
17	Substituição	133	101,6	110	2,48	3,71	5	5,81
	Limpeza			150	1,46	1,40	4	6,32
18	Substituição	321	50,8	110	2,55	2,32	5	5,81
	Limpeza			150	1,80	1,00	4	6,22
19	Substituição	105	76,2	110	1,29	2,94	5	5,95
	Limpeza			150	1,00	1,50	4	6,30
20	Substituição	169	101,6	110	2,47	4,87	4	5,83
	Limpeza			150	1,48	3,30	3	6,29

Tabela 5.16 – Estado final da reabilitação da rede

Estado final da reabilitação da rede			
Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Pressão (mca)
RNF	250	-	-
1	220,5	7,10	28,95
2	215,6	2,68	32,40
3	210,4	5,35	35,64
4	210,5	1,97	30,55
5	209,5	6,11	29,68
6	213,2	4,92	27,03
7	218,5	4,83	24,49
8	218,7	3,48	30,49
9	211,5	4,29	34,50
10	213,5	2,60	28,45
11	205,5	4,01	35,32
12	208,8	8,58	36,45
13	215,5	7,14	28,20
14	212,6	5,70	28,46
15	207,5	11,30	30,88
16	219,4	5,98	15,19
17	220,5	1,70	16,81

Tabela 5.17 – Solução: Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 1 (continua)

Configuração final dos trechos			
Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)
1	150	324	355,6
2	150	124	203,2
3	150	184	203,2
4	150	206	101,6
5	150	103	101,6
6	150	202	50,8
7	150	134	76,2
8	110	227	101,6

Tabela 5.17–Solução: Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 1 (conclusão)

Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)
9	110	167	203,2
10	110	166	101,6
11	110	152	76,2
12	110	168	76,2
13	110	177	50,8
14	110	225	152,4
15	150	254	152,4
16	110	263	152,4
17	150	133	101,6
18	110	321	50,8
19	110	105	76,2
20	110	169	101,6

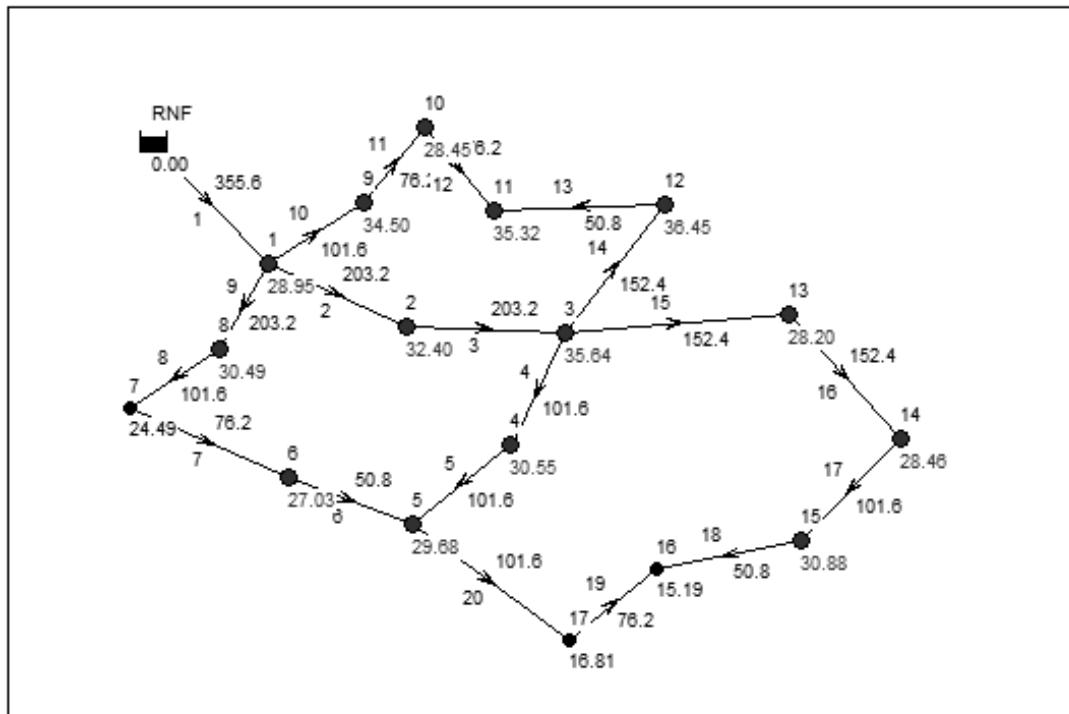


Figura 20- Simulação final Rede Exemplo 1 no EPANET 2.0 – Pressões nos nós e diâmetro dos trechos

O custo da configuração final dos trechos através das intervenções propostas foi de R\$ 25.524,36 enquanto com uma outra hipótese de substituição do trecho 4 na sexta iteração, que atingiria em menos intervenções a pressão almejada, seria de R\$ 27.049,04. Importante notar que a resolução proposta pelo modelo aplicado visa a otimização da escolha levando em conta todos os critérios, não só o custo final das intervenções, logo, seguir as intervenções obtidas nas iterações é considerado o melhor caminho por atender da melhor forma possível todos os parâmetros avaliados. Em relação aos critérios avaliados, pode-se observar que os critérios sociais e econômicos tiveram uma maior influência no peso final das intervenções, confirmando a tendência do modelo em escolher alternativas não destrutivas para a reabilitação de redes.

5.2 REDE EXEMPLO 2

Para uma avaliação mais aprofundada dos critérios utilizados, foi proposto uma nova análise do critério ambiental na Rede Exemplo 1, levando-se em conta a idade das tubulações. Para isso, considerou-se um decréscimo no peso do critério ambiental, baseado no cálculo de volume de vazamentos, de acordo com a idade da tubulação; as tubulações mais novas permanecem com a mesma nota, enquanto as mais velhas recebem um decréscimo de 30% no seu peso de critério ambiental, aumentando o peso total das intervenções nos trechos mais antigos da rede.

Nesta nova avaliação, adotaram-se valores fictícios para a idade das tubulações, apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Situação proposta para Rede Exemplo 2

Estado da Rede Proposta				
Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)	Idade (anos)
1	110	324	355,6	15
2	110	124	203,2	15
3	110	184	203,2	15
4	110	206	101,6	15
5	110	103	101,6	15
6	110	202	50,8	15
7	110	134	76,2	15
8	110	227	101,6	15
9	110	167	203,2	10
10	110	166	101,6	10
11	110	152	76,2	10
12	110	168	76,2	10
13	110	177	50,8	10
14	110	225	152,4	10
15	110	254	152,4	5
16	110	263	152,4	5
17	110	133	101,6	5
18	110	321	50,8	5
19	110	105	76,2	5
20	110	169	101,6	5

Os custos envolvidos nas intervenções de limpeza, substituição e implantação de um trecho novo dos tubos foram obtidos através da Tabela 5.3, e assim, calculou-se critério econômico por meio do gradiente de custo (Eq. 4.2), assim como descreve a metodologia e a Rede Exemplo 1.

Para avaliação do critério social, foram adotados pesos para cada intervenção realizada (substituição e limpeza) em função do trecho (rua) onde será feita a intervenção da rede, a situação proposta e os valores padronizados são similares a Rede Exemplo 1 e estão apresentados na Figura 19 e Tabela 5.5.

Na resolução da Rede Exemplo 2, adotou-se o mesmo Sistema Fuzzy implementado para a Rede Exemplo 1, mas levando-se em consideração um decréscimo do critério ambiental de acordo com a idade da tubulação. Do mesmo modo da Rede Exemplo 1, a cada iteração, o sistema Fuzzy, construído na plataforma Fuzzy do MATLAB, determina qual a melhor opção de intervenção com base em uma análise multiobjetiva, até que todas condições impostas forem atendidas. No caso particular da Rede Exemplo 2, o processo iterativo terminou na 9ª iteração, quando todos os nós alcançaram pressão superior mínima de 15 mca. A evolução na configuração da rede, após cada intervenção realizada ao término de cada iteração, é mostrada nas tabelas 5.19 à Tabela 5.27, o estado final da rede está representado na Tabela 5.28, e a solução com a configuração final dos trechos na Tabela 5.29.

Tabela 5.19 – Primeira iteração (Limpeza do trecho 15) (continua)

1ª Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10	7	10	1,30
	Limpeza			150	3,09	2,94	1	6,31
2	Substituição	124	203,2	110	1,41	4,61	10	3,82
	Limpeza			150	1,13	2,76	1	6,33
3	Substituição	184	203,2	110	1,44	4,85	10	3,82
	Limpeza			150	1,15	2,83	1	6,30
4	Substituição	206	101,6	110	1,11	6,45	9	3,62
	Limpeza			150	1,05	3,1	3	6,31
5	Substituição	103	101,6	110	1,16	1,87	9	4,46
	Limpeza			150	1,07	0,7	3	6,56
6	Substituição	202	50,8	110	1,26	1,87	4	6,31
	Limpeza			150	1,14	0,7	3	6,41
7	Substituição	134	76,2	110	1,33	3,28	4	6,23
	Limpeza			150	1,13	2,54	3	6,27
8	Substituição	227	101,6	110	1,68	5,74	5	5,33
	Limpeza			150	1,27	4,05	4	6,19

Tabela 5.19 – Primeira iteração (Limpeza do trecho 15) (conclusão)

Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
15	Substituição	254	152,4	110	2,08	6,24	10	3,64
	Limpeza			150	1,39	2,05	1	6,62
16	Substituição	263	152,4	110	2,7	7,23	10	3,25
	Limpeza			150	1,64	4,38	1	6
17	Substituição	133	101,6	110	1,31	4,63	5	5,72
	Limpeza			150	1,12	3,15	4	6,23
18	Substituição	321	50,8	110	1,2	4,81	5	5,65
	Limpeza			150	1,12	3,62	4	6,21
19	Substituição	105	76,2	110	1,11	4,81	5	5,64
	Limpeza			150	1	3,62	4	6,21
20	Substituição	169	101,6	110	1,34	7,14	4	3,89
	Limpeza			150	1,14	5,83	3	5,57

Tabela 5.20 – Segunda iteração (Limpeza do trecho 5) (continua)

2° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10	7	10	1,30
	Limpeza			150	3,04	2,94	1	6,33
2	Substituição	124	203,2	110	1,36	4,61	10	3,82
	Limpeza			150	1,09	2,76	1	6,32
3	Substituição	184	203,2	110	1,4	4,85	10	3,82
	Limpeza			150	1,1	2,83	1	6,30
4	Substituição	206	101,6	110	1,07	6,45	9	3,62
	Limpeza			150	1	3,1	3	6,31
5	Substituição	103	101,6	110	1,11	1,87	9	4,46
	Limpeza			150	1,02	0,7	3	6,42
6	Substituição	202	50,8	110	1,22	3,28	4	6,23
	Limpeza			150	1,09	2,54	3	6,35
7	Substituição	134	76,2	110	1,28	5,74	4	5,64
	Limpeza			150	1,08	2,84	3	6,33

Tabela 5.20 – Segunda iteração (Limpeza do trecho 5) (conclusão)

Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
8	Substituição	227	101,6	110	1,62	4,37	5	5,80
	Limpeza			150	1,22	1,44	4	6,31
16	Substituição	263	152,4	110	2,76	7,23	10	3,24
	Limpeza			150	1,61	4,38	1	6
17	Substituição	133	101,6	110	1,28	4,63	5	5,72
	Limpeza			150	1,08	3,15	4	6,23
18	Substituição	321	50,8	110	1,12	4,81	5	5,64
	Limpeza			150	1,05	3,62	4	6,30
19	Substituição	105	76,2	110	1,07	4,81	5	5,93
	Limpeza			150	1	3,62	4	6,21
20	Substituição	169	101,6	110	1,31	7,14	4	3,89
	Limpeza			150	1,1	5,83	3	5,57

Tabela 5.21 – Terceira iteração (Limpeza do trecho 2) (continua)

3° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10	3,75	10	1,76
	Limpeza			150	3,09	1,78	1	6,54
2	Substituição	124	203,2	110	1,4	2,59	10	4,30
	Limpeza			150	1,13	1,69	1	6,69
3	Substituição	184	203,2	110	1,44	2,7	10	4,26
	Limpeza			150	1,14	1,72	1	6,68
4	Substituição	206	101,6	110	1,11	3,46	9	4,07
	Limpeza			150	1,04	1,83	3	6,39
6	Substituição	202	50,8	110	1,33	1,25	4	6,30
	Limpeza			150	1,17	0,7	3	6,41
7	Substituição	134	76,2	110	1,35	1,95	4	6,32
	Limpeza			150	1,14	1,59	3	6,40
8	Substituição	227	101,6	110	1,72	3,14	5	5,94
	Limpeza			150	1,28	1,73	4	6,32

Tabela 5.21 – Terceira iteração (Limpeza do trecho 2) (conclusão)

Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
16	Substituição	263	152,4	110	2,76	10	10	2,71
	Limpeza			150	1,61	6,34	1	5,47
17	Substituição	133	101,6	110	1,32	4,01	5	5,95
	Limpeza			150	1,13	2,63	4	6,27
18	Substituição	321	50,8	110	1,19	2,75	5	5,95
	Limpeza			150	1,11	2,03	4	6,30
19	Substituição	105	76,2	110	1,11	2,84	5	5,94
	Limpeza			150	1,04	2,26	4	6,28
20	Substituição	169	101,6	110	1,34	4,09	4	6,18
	Limpeza			150	1,14	3,41	3	6,28

Tabela 5.22 – Quarta iteração (Limpeza do trecho 3) (continua)

4° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10	4,96	10	1,30
	Limpeza			150	3,04	2,17	1	6,47
3	Substituição	184	203,2	110	1,4	3,68	10	3,92
	Limpeza			150	1,1	2,25	1	6,50
4	Substituição	206	101,6	110	1,06	4,73	9	3,87
	Limpeza			150	1	2,36	3	6,36
6	Substituição	202	50,8	110	1,35	1,49	4	6,32
	Limpeza			150	1,16	0,7	3	6,41
7	Substituição	134	76,2	110	1,32	2,95	4	6,25
	Limpeza			150	1,1	2,26	3	6,37
8	Substituição	227	101,6	110	1,68	5,67	5	5,37
	Limpeza			150	1,25	2,99	4	6,25
16	Substituição	263	152,4	110	2,8	10	10	2,70
	Limpeza			150	1,63	6,49	1	5,34
17	Substituição	133	101,6	110	1,29	5,17	5	5,54
	Limpeza			150	1,09	3,23	4	6,23

Tabela 5.22 – Quarta iteração (Limpeza do trecho 3) (conclusão)

Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
18	Substituição	321	50,8	110	1,14	3,57	5	5,94
	Limpeza			150	1,07	2,55	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,06	3,84	5	5,93
	Limpeza			150	1	2,91	4	6,25
20	Substituição	169	101,6	110	1,3	5,48	4	5,77
	Limpeza			150	1,1	4,46	3	6,09

Tabela 5.23 – Quinta iteração (Limpeza do trecho 1)

5° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	324	355,6	110	10,00	4,58	10	1,30
	Limpeza			150	3,04	2,00	1	6,51
4	Substituição	206	101,6	110	1,06	4,19	9	3,91
	Limpeza			150	1,00	2,09	3	6,37
6	Substituição	202	50,8	110	1,48	1,46	4	6,33
	Limpeza			150	1,22	0,70	3	6,41
7	Substituição	134	76,2	110	1,32	2,74	4	6,27
	Limpeza			150	1,10	2,10	3	6,38
8	Substituição	227	101,6	110	1,67	5,25	5	5,55
	Limpeza			150	1,24	2,77	4	6,27
16	Substituição	263	152,4	110	2,84	10,00	10	2,70
	Limpeza			150	1,63	6,59	1	5,34
17	Substituição	133	101,6	110	1,29	5,00	5	5,54
	Limpeza			150	1,09	3,12	4	6,23
18	Substituição	321	50,8	110	1,14	3,54	5	5,94
	Limpeza			150	1,06	2,51	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,07	3,79	5	5,93
	Limpeza			150	1,00	2,85	4	6,25
20	Substituição	169	101,6	110	1,31	5,31	4	5,77
	Limpeza			150	1,10	4,28	3	6,09

Nesta iteração, as pressões pretendidas na rede poderiam já ser alcançadas através da substituição do trecho 4, chegando a uma pressão de 16,32 mca no nó mais desfavorável que atenderia as condições propostas na rede; porém sua nota de Peso Total era muito baixa e as iterações continuaram seguindo a preferência dos critérios de maior Peso.

Tabela 5.24 – Sexta iteração (Limpeza do trecho 7)

6° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
4	Substituição	206	101,6	110	1,30	4,17	9	3,90
	Limpeza			150	1,00	2,09	3	6,37
6	Substituição	202	50,8	110	3,33	1,45	4	5,99
	Limpeza			150	2,06	0,70	3	6,35
7	Substituição	134	76,2	110	2,58	2,71	4	6,11
	Limpeza			150	1,47	2,01	3	6,41
8	Substituição	227	101,6	110	4,33	5,21	5	4,65
	Limpeza			150	2,20	2,76	4	6,21
16	Substituição	263	152,4	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	4,21	6,62	1	4,76
17	Substituição	133	101,6	110	2,42	4,95	5	5,47
	Limpeza			150	1,44	3,09	4	6,24
18	Substituição	321	50,8	110	1,68	3,53	5	5,94
	Limpeza			150	1,32	2,50	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,32	3,79	5	5,93
	Limpeza			150	1,00	2,83	4	6,25
20	Substituição	169	101,6	110	4,22	5,27	4	5,77
	Limpeza			150	1,13	4,23	3	6,09

Tabela 5.25 – Sétima iteração (Limpeza do trecho 4)

7° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
4	Substituição	206	101,6	110	1,32	4,84	9	3,85
	Limpeza			150	1,01	2,36	3	6,36
6	Substituição	202	50,8	110	2,32	1,64	4	6,33
	Limpeza			150	1,64	0,70	3	6,16
8	Substituição	227	101,6	110	4,33	4,93	5	4,74
	Limpeza			150	2,21	2,65	4	6,22
16	Substituição	263	152,4	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	4,21	7,08	1	4,76
17	Substituição	133	101,6	110	2,42	4,49	5	5,47
	Limpeza			150	1,44	2,74	4	6,27
18	Substituição	321	50,8	110	1,73	3,92	5	5,94
	Limpeza			150	1,35	2,81	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,32	4,22	5	5,93
	Limpeza			150	1,00	3,56	4	6,25
20	Substituição	169	101,6	110	2,50	5,44	4	5,77
	Limpeza			150	1,49	4,86	3	6,09

Tabela 5.26 – Oitava iteração (Limpeza do trecho 6) (continua)

8° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
6	Substituição	202	50,8	110	4,95	1,71	4	5,24
	Limpeza			150	2,97	0,7	3	6,37
8	Substituição	227	101,6	110	5,37	4,84	5	4,56
	Limpeza			150	2,59	2,52	4	6,12
16	Substituição	263	152,4	110	10	10	10	1,30
	Limpeza			150	4,12	5,69	1	5,15
17	Substituição	133	101,6	110	2,48	4,58	5	5,58
	Limpeza			150	1,45	2,78	4	6,27

Tabela 5.26 – Oitava iteração (Limpeza do trecho 6) (conclusão)

Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
18	Substituição	321	50,8	110	2,49	4,28	5	5,69
	Limpeza			150	1,77	2,96	4	6,25
19	Substituição	105	76,2	110	1,3	5,39	5	5,45
	Limpeza			150	1	3,79	4	6,20
20	Substituição	169	101,6	110	2,47	6,64	4	4,64
	Limpeza			150	1,48	5,12	3	5,93

Tabela 5.27 – Nona iteração (Limpeza do trecho 8)

9° Iteração								
Trecho	Intervenção	Comprimento dos trechos (m)	Diâmetro (mm)	Coef. H.W.	Pesos (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
8	Substituição	227	101,6	110	4,31	4,30	5	2,88
	Limpeza			150	2,20	1,41	4	6,29
16	Substituição	263	152,4	110	10,00	10,00	10	1,30
	Limpeza			150	4,23	4,63	1	5,42
17	Substituição	133	101,6	110	2,48	3,25	5	5,81
	Limpeza			150	1,46	1,00	4	6,25
18	Substituição	321	50,8	110	2,55	2,89	5	5,79
	Limpeza			150	1,80	1,23	4	6,27
19	Substituição	105	76,2	110	1,29	4,29	5	5,84
	Limpeza			150	1,00	2,27	4	6,28
20	Substituição	169	101,6	110	2,47	5,84	4	5,53
	Limpeza			150	1,48	3,93	3	6,25

Tabela 5.28 – Estado final da reabilitação da rede

Estado final da reabilitação da rede			
Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Pressão (mca)
RNF	250	-	-
1	220,5	7,10	28,95
2	215,6	2,68	32,43
3	210,4	5,35	35,70
4	210,5	1,97	30,81
5	209,5	6,11	30,03
6	213,2	4,92	28,84
7	218,5	4,83	26,82
8	218,7	3,48	30,47
9	211,5	4,29	34,50
10	213,5	2,60	28,47
11	205,5	4,01	35,34
12	208,8	8,58	36,52
13	215,5	7,14	28,31
14	212,6	5,70	28,65
15	207,5	11,30	29,19
16	219,4	5,98	15,09
17	220,5	1,70	17

Tabela 5.29 – Solução: Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 2 (continua)

Configuração final dos trechos			
Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)
1	150	324	355,6
2	150	124	203,2
3	150	184	203,2
4	150	206	101,6
5	150	103	101,6
6	150	202	50,8
7	150	134	76,2

Tabela 5.29–Solução: Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 2 (conclusão)

Trecho	Coef. Rugosidade (H.W.)	Comprimento das Tubulações (m)	Diâmetro (mm)
8	150	227	101,6
9	110	167	203,2
10	110	166	101,6
11	110	152	76,2
12	110	168	76,2
13	110	177	50,8
14	110	225	152,4
15	150	254	152,4
16	110	263	152,4
17	110	133	101,6
18	110	321	50,8
19	110	105	76,2
20	110	169	101,6

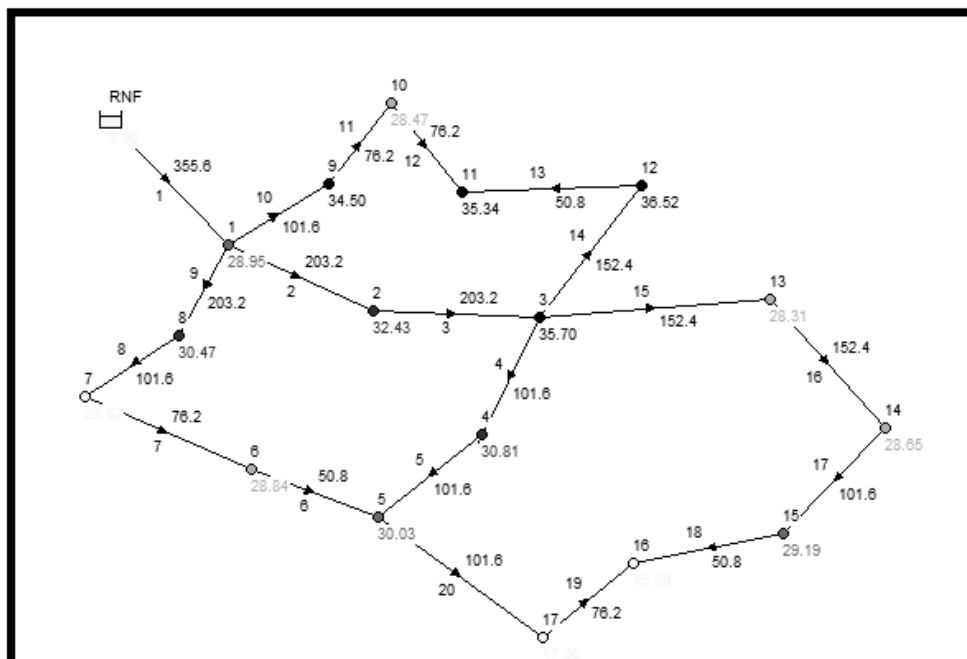


Figura 21- Simulação final Rede Exemplo 2 no EPANET 2.0 – Pressões nos nós e diâmetro dos trechos

O custo da configuração final dos trechos para a Rede Exemplo 2 através das intervenções propostas foi de R\$ 26.238,76, entretanto, utilizando uma outra hipótese que consiste na substituição do trecho 4 na quinta iteração, que atingiria em menos intervenções a pressão almejada, seria de R\$ 15.846,90.

6. CONCLUSÃO

Os resultados das iterações demonstraram que mesmo seguindo a metodologia proposta, levando em consideração as notas correlacionadas dos critérios avaliados, a tomada de decisão deve ser feita cuidadosamente, analisando cada nova iteração e, garantindo assim, as melhores alternativas para implementação do plano de ação para a reabilitação da rede hidráulica. No caso específico da Rede Exemplo 2, a escolha de um caminho diferente do proposto pelas iterações (seguindo a sequência de maior Peso Total), como a substituição do trecho 4 na quinta iteração, atingiria as pressões pretendidas com um menor custo final e um número inferior de intervenções nos trechos, porém ocasionaria um maior transtorno na região, ou seja, reforça a ideia de que o modelo é apenas uma ferramenta prática que auxilia a tomada de decisão mas que a decisão final depende veemente da análise do técnico responsável da reabilitação e das prioridades impostas em cada situação específica.

Pode-se observar também que com a consideração das idades da tubulação no critério ambiental, propiciou-se uma maior tendência de escolha aos trechos mais antigos (maior probabilidade de deterioração), tornando-se o impacto que maior influenciou nas escolhas das intervenções. Em uma situação prática o ideal seria o estudo in loco de cada um dos trechos para melhor levantamento dos seus estados físicos.

Este trabalho desenvolveu um sistema de apoio à decisão para análise da reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento considerando múltiplos critérios de avaliação. Este modelo foi criado em três fases. A primeira etapa da metodologia proposta representa o levantamento de dados (estado da rede, demandas, comprimento dos trechos e dados da fonte de abastecimento) e a calibração do modelo da rede no simulador hidráulico EPANET 2.0. A etapa seguinte compreende o processo de tomada de decisão propriamente dito, onde os critérios são obtidos e relacionados entre si com base na Lógica Fuzzy. A terceira etapa, ou etapa de decisão, representa o planejamento otimizado da reabilitação do sistema de abastecimento de água, auxiliado pelo sistema de apoio a decisão, o responsável pode traçar um plano de ação baseado

na resposta final do modelo. Os critérios levados em consideração no sistema de apoio à decisão no presente trabalho foram a minimização de custos (econômico), vazamentos e idade das tubulações (ambiental) e impactos sociais (social).

Esta pesquisa apresentou um método multiobjetivo de reabilitação de sistemas de distribuição de água baseado na Lógica Fuzzy que considerou na tomada de decisão as propriedades físicas da rede, seu comportamento dinâmico a cada possível intervenção e a satisfação da sociedade, criando assim uma ferramenta prática que auxilie os dirigentes das companhias para adotarem alternativas econômicas que gerem menores impactos para a sociedade e para o meio ambiente. Porém para a aplicação prática deste modelo, é necessário a utilização de ferramentas computacionais apropriadas para calibração das redes de abastecimento por parte das empresas de saneamento.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABRANCHES, R. **Programa de Reabilitação de Redes - A Experiência da Unidade de Negócio Centro da Sabesp**. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp, São Paulo, Brasil, 2009.

ALEGRE, H. **Performance indicators for water supply services. Operations & Maintenance Committee**. International Water Association, 2000.

ALMEIDA, D.F.C. **Controle e Redução de Perdas Reais em Sistemas de Abastecimento de Água**. Disciplina de PHD 2537 – Águas em Ambientes Urbanos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2010.

BEZERRA, S. T. M. **Método de otimização para a reabilitação de redes de distribuição de água**. Dissertação de Mestrado, PPGECA, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2005.

BEZERRA, S. T. M. **Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia**. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia, João Pessoa, Brasil, 2009.

BEZERRA, S. T. M. & CHEUNG, P. B. **Perdas de água: Tecnologias de controle**. João Pessoa: Editora UFPB, 220p, 2013.

BRADKLEY, J. E. **An R package for reading EPANET files**. Artigo publicado no jornal Elsevier. IBM Research, Dublin, Irlanda, 2016.

BROCHETTO, V. **Perdas de água e gerenciamento de sistemas de abastecimento: um estudo de caso do município de Caxias do sul**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2015.

CAPRIGLIONI, M.S.S., BURGER, M.S. **Reabilitação de redes de ferro fundido em Curitiba**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, Brasil, 2005.

CARNEIRO, T. A., LEAL, S., 2008. **Sistema de Informações Gerenciais (SIG) e Sua Importância para Tomada de Decisões**. Trabalho de conclusão de curso, Faculdade de ciências humanas, exatas e letras de Rondônia-FARO, Brasil, 2008.

CHEUNG, P. B. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via Algoritmos Genéticos Multiobjectivos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2004.

DAVIS, D.N. **Agent-based decision-support framework for water supply infrastructure rehabilitation and development**. Computers, Environment and Urban Systems, v.24, n.3, p. 173-190, 2000.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Drinking water infrastructure needs survey. First report to the Congress**. Office of Water. EPA 812 - R - 97 - 001. January 1997. Washington D.C. USA, 1997.

ESTRELA, M.C., FERREIRA, S.A., MUELLER, T., KANNING, R.C., BARBOSA, V.M. Estudo de viabilidade de implementação de um sistema de reaproveitamento de resíduos de construção civil para famílias de baixa renda em Curitiba. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**- número 7, 2009.

FORMIGA K. T. M. & CHAUDHRY, F. H. **Utilização de algoritmos evolucionários multiobjectivos no dimensionamento de redes de abastecimento de água**. In: Seminário de Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento, João Pessoa, 2002.

GOMES, H. P., BEZERRA, S. T. M. **Reabilitação de Sistemas de Distribuição de Água**. In: GOMES, H. P., GARCIA, R. P., REY, P. L. I. (ed.), Abastecimento de Água – O Estado da Arte e Técnicas Avançadas, João Pessoa, PB, Brasil, pp. 47-66. Editora Universitária da UFPB, 2007.

GOMES H. P., BEZERRA S. T. M. & SRINIVASAN V. S. **An iterative optimization procedure for the rehabilitation of water supply pipe networks**. Water SA 34(2): 225-236, 2008.

LOUREIRO, D., TEIXEIRA COELHO, S. **EPANET 2.0 – Manual do Utilizador**. LNEC, Lisboa, Portugal, 2004.

MARRO, A.A., SOUZA, M.C., CAVALCANTE, E.R.S., BEZERRA, G.S., NUNES, R.O. **Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações**. Departamento de informática e Matemática Aplicada (DIMAp). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2014.

MAYS, L.W. **Urban water supply handbook**. New York: McGraw-Hill, 2002.

McILROY, M. S. Direct-reading electric analyzer for pipeline networks. **Journal American Water Works Association**, p.347-365, 1950.

MEDEIROS, F.I. **Simulador de tubulações com interface gráfica**. Relatório final de projeto de iniciação científica (PIBIC/CNPq/INPE), 2007.

MOREIRA, M. R. C. **Abordagem multiobjetiva de reabilitação de redes hidráulicas**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil, 2013.

OLIVEIRA, H.A., MELLI, R.V., MELLO, W.C. **Análise de reabilitação de sistemas de distribuição de água através de simulação hidráulica**. Trabalho de conclusão de curso, UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI, São Paulo, Brasil, 2010.

ONO, S. **Sistemas de suporte a decisão para gestão de água urbana-urbssd**. Trabalho para obtenção de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC/USP, 1998.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. de **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991. 332 p.

SARZEDAS, G.L. **Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água da região metropolitana de São Paulo**. Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de mestrado, São Paulo, Brasil, 2009.

TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. 3ª edição. Depto de engenharia hidráulica e sanitária da Escola

Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 2006.

TONETO, R.J. **Perdas de água dificultam o avanço do saneamento básico e agravam o risco de escassez hídrica no Brasil.** Estudo do instituto Trata Brasil, 2015.

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

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

VENTURINI, M.A.A.G., BARBOSA, P.S.F. **Metodologia de análise e decisão multicriterial para a reabilitação de sistemas de abastecimento de água.** Tese doutorado, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2003.