



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

## **ABORDAGEM MULTIOBJETIVA DE REABILITAÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS**

MONOGRAFIA SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE APROVAÇÃO  
NA DISCIPLINA DE TCC 2

POR

**Raomax Charlles Moreira Matias**

**Orientador: Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra**

Caruaru, Abril de 2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
NÚCLEO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PARECER DA COMISSÃO DE  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2**

*Raomax Charlles Moreira Matias*

**ABORDAGEM MULTIOBJETIVA DE REABILITAÇÃO DE  
REDES HIDRÁULICAS**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Recursos Hídricos

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato ALUNO **APROVADO COM NOTA**\_\_\_\_\_.

Caruaru, 23 de Abril de 2013.

---

Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra

---

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

---

Prof. Dr. Paulo Frassinete de Araujo Filho

---

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos

## Catálogo na fonte

Bibliotecária Simone Xavier CRB4 - 1242

M433a Matias, Raomax Charles Moreira.  
Abordagem multiobjetiva de reabilitação de redes hidráulicas. / Raomax Charles  
Moreira Matias. - Caruaru: O Autor, 2013.  
77f; il.; 30 cm.

Orientador: Saulo de Tarso Marques Bezerra  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de  
Pernambuco, CAA. Engenharia Civil, 2013.  
Inclui bibliografia

1. Redes hidráulicas. 2. Distribuição de água - otimização. 3. Distribuição de  
água – Reabilitação. I. Bezerra, Saulo de Tarso Marques. (orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2013-19)

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, referências de caráter, pessoas  
que sigo de exemplo e amo de coração.*

*Ao meu irmão, que muito amo.*

*À minha amiga e namorada Isabela Lins, pessoa  
muito importante pra mim.*

*Aos amigos dos meus pais, Edson Landin,  
Gilvan Rodrigues e José Jânio,*

*EXEMPLOS DE VERDADEIRA AMIZADE.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado muita paciência.

A meus pais, Francisco Matias da Silva e Francisca Elza Moreira  
por sempre estarem me incentivando e me ajudando.

Agradeço a meu irmão Antônio Raony Moreira Matias  
pelos conselhos e por seu carinho.

Agradeço a minha amiga e namorada Isabela Lins de Lima  
por toda paciência e dedicação.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Saulo de Tarso Marques Bezerra.

O autor agradece o apoio financeiro concedido pelo CNPq através do Edital Universal 2011 e  
da concessão de bolsa de iniciação científica.

## RESUMO

### **Abordagem Multiobjetiva de Reabilitação de Redes Hidráulicas**

Na medida em que os sistemas de distribuição de água envelhecem, há uma perda natural na qualidade do abastecimento (vazões e pressões insuficientes nos pontos de consumo, índices altos de perdas de água, interrupções no fornecimento, deterioração da qualidade da água etc.) e um aumento dos custos de operação e manutenção. Estes sistemas requerem maiores recursos financeiros para manter o fornecimento em níveis adequados e, na maioria dos casos, são adotadas soluções parciais para resolver problemas pontuais. A alternativa ideal seria a reabilitação de todos os componentes deteriorados e obsoletos, entretanto, esta solução não é viável do ponto de vista econômico. Objetivou-se, com esta pesquisa, o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão, utilizando a lógica *fuzzy* que busque uma solução mais abrangente para a reabilitação de sistemas de distribuição de água, que considere além dos custos das intervenções físicas, a minimização dos vazamentos nas redes hidráulicas e a redução dos impactos negativos à sociedade. A metodologia foi aplicada em duas redes fictícias e os resultados foram satisfatórios para os parâmetros analisados.

**Palavras-chave:** Reabilitação, Otimização, Redes Hidráulicas.

## **ABSTRACT**

### **Approach Multiobjective Rehabilitation Network Hydraulic**

To the extent that the water distribution systems age, there is a natural loss in quality of supply (flow rate and pressure in sufficient to points of consumption, high rates of water loss, outages, deterioration of water quality etc.) and increase costs of operation and maintenance. These systems require greater financial resources to maintain the supply at appropriate levels and, in most cases, are adopted partial solutions to solve specific problems. The ideal alternative would be the rehabilitation of all damaged and obsolete components, however, this solution is not feasible from an economic standpoint. The objective of this research, the development of a decision support fuzzy system the find a more comprehensive solution for the rehabilitation of water distribution systems, to consider besides the cost of physical interventions, the minimization of leaks in hydraulic networks and reducing negative impacts on society. The methodology was applied on two fictitious networks and the results were satisfactory for the analyzed parameters.

**Key words:** Rehabilitation, Optimization, Hydraulic Networks.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Rede ramificada (rede fictícia) .....	7
Figura 2.2 - Rede malhada com anel (rede fictícia) .....	8
Figura 2.3 - Esquema de um controlador fuzzy (BEZERRA, 2009) .....	10
Figura 2.4 - Representação gráfica e matemática da função de pertinência triangular .....	11
Figura 2.5 - Representação gráfica e matemática da função de pertinência trapezoidal .....	11
Figura 2.6 - Exemplo de defuzzificação através do método C-o-A.....	13
Figura 2.7 - Vídeo inspeção (Fonte: <a href="http://www.abratt.org.br">www.abratt.org.br</a> ).....	15
Figura 2.8 - Colapso parcial de uma rede com tubo cerâmico mostrado por vídeo inspeção (Fonte: <a href="http://www.abratt.org.br">www.abratt.org.br</a> ).....	15
Figura 2.9 - Interdição de ruas e avenidas.....	16
Figura 2.10 - Imagem de tubos enferrujados.....	16
Figura 2.11 - Imagem Pipebursting .....	17
Figura 2.12 - Tubulação nova inserida na tubulação antiga.....	17
Figura 2.13 - Polly-pigs.....	18
Figura 2.14 - Cabeçote de aspersão de revestimento em epóxi.....	20
Figura 2.15 - Método com perfuratriz direcional .....	22
Figura 3.1 - Modelo proposto de planejamento otimizado de reabilitação de redes de abastecimento de água.....	23
Figura 3.2 - Representação BoxPlot .....	29
Figura 3.3 - Variáveis do sistema fuzzy.....	33
Figura 3.4 - Variável linguística de entrada Custo (critério econômico) .....	33
Figura 3.5 - Variável linguística de entrada Vazamento (critério ambiental) .....	34
Figura 3.6 - Variável linguística de entrada Transtorno (critério social) .....	34
Figura 3.7 - Variável linguística de saída Peso .....	34
Figura 4.1 - Rede Exemplo 1 .....	39
Figura 4.2 - Nomenclatura das ruas do Rede Exemplo 1 .....	41
Figura 4.3 - Simulação final no EPANET - Pressões nos nós e diâmetro dos trechos.....	49
Figura 4.4 - Rede Exemplo 2 (modificada de GESSLER, 1985) .....	50
Figura 4.5 - Nomenclatura das ruas do Rede Exemplo 2.....	53
Figura 4.6 - Estado inicial da Rede Exemplo 2 .....	55
Figura 4.7 - Solução Final - Estado final da Rede Exemplo 2 .....	62



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores padronizados para o critério ambiental.....	30
Tabela 4.1 - Dados dos nós da Rede Exemplo 1 .....	39
Tabela 4.2 - Dados dos trechos da Rede Exemplo 1 .....	40
Tabela 4.3 - Custo das intervenções (HALHAL et al., 1997) .....	40
Tabela 4.4 - Valores padronizados para o critério social .....	41
Tabela 4.5 - Primeira iteração (Limpeza do Trecho 1).....	42
Tabela 4.6 - Segunda iteração (Limpeza do Trecho 2) .....	43
Tabela 4.7 - Terceira iteração (Limpeza do Trecho 3) .....	43
Tabela 4.8 - Quarta iteração (Substituição do Trecho 4) .....	44
Tabela 4.9 - Quinta iteração (Limpeza do Trecho 6).....	44
Tabela 4.10 - Sexta iteração (Limpeza do Trecho 5).....	45
Tabela 4.11 - Sétima iteração (Substituição do Trecho 1) .....	45
Tabela 4.12 - Oitava iteração (Substituição do Trecho 1).....	46
Tabela 4.13 - Nona iteração (Substituição do Trecho 7) .....	46
Tabela 4.14 - Décima iteração (Substituição do Trecho 8).....	47
Tabela 4.15 - Décima Primeira iteração (Substituição do Trecho 6).....	47
Tabela 4.16 - Décima Segunda iteração (Substituição do Trecho 1).....	48
Tabela 4.17 - Solução - Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 1 .....	48
Tabela 4.18 - Resultado final da reabilitação da Rede Exemplo 1 .....	48
Tabela 4.19 - Dados dos nós da Rede Exemplo 2 .....	50
Tabela 4.20 - Dados dos trechos da Rede Exemplo 2.....	51
Tabela 4.21 - Custos das intervenções - Rede Exemplo 2 .....	52
Tabela 4.22 - Valores padronizados para o critério ambiental.....	53
Tabela 4.23 - Valores padronizados para o critério social .....	54
Tabela 4.24 - Primeira iteração (Substituição do Trecho 1) .....	56
Tabela 4.25 - Segunda iteração (Substituição do Trecho 6) .....	57
Tabela 4.26 - Terceira iteração (Substituição do Trecho 4) .....	58
Tabela 4.27 - Quarta iteração (Substituição do Trecho 5) .....	59
Tabela 4.28 - Quinta iteração (Substituição do Trecho 4) .....	60
Tabela 4.29 - Parâmetros finais dos nós.....	61
Tabela 4.30 - Diâmetros finais dos trechos .....	61

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO .....	2
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS .....	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	4
2.1.1	Área Específica.....	4
2.1.2	Zonas de Pressão .....	5
2.1.3	Classificação das Redes Hidráulicas .....	6
2.2	LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	8
2.2.1	Variáveis Linguísticas.....	10
2.2.2	Funções de Pertinência .....	11
2.2.3	Fuzzificação .....	12
2.2.4	Defuzzificação .....	12
2.3	TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO ..	14
2.3.1	Técnicas Destrutivas de Reabilitação .....	15
2.3.2	Técnicas Não Destrutivas de Reabilitação .....	16
3	METODOLOGIA .....	23
3.1	EPANET .....	24
3.1.1	Capacidades de Modelagem Hidráulica.....	25
3.1.2	Capacidades de Modelagem da Qualidade da Água .....	25
3.2	CRITÉRIOS AVALIADOS .....	27
3.2.1	Critério Ambiental.....	27
3.2.2	Critério Econômico.....	30
3.2.3	Critério Social.....	31
3.3	SISTEMA FUZZY .....	32
3.3.1	Inferência Fuzzy .....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
4.1	REDE EXEMPLO 1.....	38

4.2	REDE EXEMPLO 2.....	49
5	CONCLUSÃO .....	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	65

## 1 INTRODUÇÃO

Um sistema de abastecimento de água é formado pela rede de tubulação mais o sistema de pressurização, impulsionado mediante um reservatório elevado ou através de um bombeamento direto. O projeto de um sistema de abastecimento depende, essencialmente, da demanda a ser atendida, do traçado das tubulações, da posição dos reservatórios elevados, das estações elevatórias, dos materiais das tubulações, da escolha adequada dos diâmetros dos trechos e dos componentes de controle. Ao longo da vida útil do sistema, mesmo que o projeto tenha sido bem projetado, surgirão situações que não foram consideradas inicialmente, tais como: ampliações da rede, surgimento de demandas em áreas não previstas, mudança do tipo de edificação, deterioração física dos componentes das instalações hidráulicas, ineficiência na operação relacionada com vazamentos, rompimentos de tubulações, falta de otimização operacional eletromecânica dos conjuntos moto-bomba, dentre outras. Estes aspectos refletem na qualidade do abastecimento (vazões e pressões insuficientes nos pontos de consumo, interrupções no fornecimento, qualidade da água etc.) e nos aspectos econômicos (custos elevados de energia elétrica, reparação e manutenção dos equipamentos etc.).

A reabilitação de redes hidráulicas é uma prática antiga, que vem sendo aplicada desde a implantação dos primeiros sistemas de abastecimento de água. No entanto, a reabilitação só se consolidou como uma técnica científica com o surgimento das tubulações de ferro fundido (CHEUNG, 2004). Um fato histórico que marcou o início do processo de reabilitação em sistemas de abastecimento de água foi a substituição, em 1810, de todas as tubulações de madeira da cidade de Thames (Inglaterra) por outras de ferro fundido. Outro fato marcante foi a substituição da tubulação principal que compunha o sistema de Braunfels (Alemanha), em 1932, por uma de maior diâmetro, após seus 271 anos de uso (SKEAT, 1961 *apud* CHEUNG, 2004). Desde então, o processo de reabilitação tem se tornado uma rotina em praticamente todas as regiões do mundo.

Nas décadas passadas, os métodos matemáticos de otimização serviram como ferramentas facilitadoras para a busca de soluções que fornecessem menores custos para os projetos de redes hidráulicas. Esses métodos (programação linear, não linear, dinâmica etc.) obtiveram vantagens em relação aos procedimentos anteriores de tentativa e erro, porém, atualmente não são satisfatórios. Recentemente, pesquisadores apontam desvantagens características dos métodos tradicionais de programação, as quais estão relacionadas às

difficultades de obtenção do ótimo global, aplicações a problemas complexos e, principalmente, no que se refere à necessidade de enquadrar objetivos reais e múltiplos.

O processo de reabilitação de uma rede de abastecimento é bastante complexo, se considerarmos as dimensões desse, a forma como é distribuído e o tipo de material que compõe a rede a ser reabilitada. As principais técnicas de reabilitação são destrutivas e causam grandes transtornos, pois, geralmente são interditadas grandes áreas para que possam ser executadas as obras. Outro fator que deve ser ressaltado é o impacto que uma obra desse porte causa quando implantada em uma área de proteção ambiental.

A troca de todos os componentes com defeito é uma solução inviável, difícil de ser executada, pois, detectar e trocar todos esses componentes defeituosos necessitaria de uma aparelhagem específica e isso acarretaria em grandes custos operacionais. Por outro lado, os recursos financeiros das empresas de saneamento são limitados ou insuficientes, logo, devem ser realizados estudos que possam indicar as medidas mais viáveis para cada caso.

A tomada de decisão proposta por esta pesquisa será auxiliada por operações com conjuntos *fuzzy*, que promovem uma melhor avaliação de valores e dados imprecisos na busca pela solução que melhor se adeque as condições impostas por limitantes econômicos, sociais e ambientais.

## **1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO**

A grande maioria das redes de abastecimento de água em operação necessita de ações de reabilitação para corrigir os problemas antes apontados. A alternativa ideal para os sistemas com problemas de operação é a reabilitação de todos os componentes hidráulicos deteriorados e obsoletos, entretanto, esta solução não é viável do ponto de vista econômico. Os recursos financeiros disponíveis nas empresas de saneamento são, geralmente, limitados e insuficientes para reabilitar os seus sistemas. A importância do tema é de tal magnitude que, em 1997, a Agência de Proteção Ambiental Americana estimou que o montante global para a reabilitação da infraestrutura dos sistemas de abastecimento de água dos EUA nos 20 anos subsequentes, seria de 138 bilhões de dólares (EPA, 1997), o que, mesmo para o padrão americano, representa um alto custo. Portanto, o desenvolvimento de metodologias é imprescindível para hierarquizar as medidas mais urgentes e eficazes a serem tomadas pelos gestores das companhias de saneamento. Há a necessidade de se prover soluções que

considerem na tomada de decisão os aspectos econômicos, sociais, políticos e ambientais, em substituição às análises convencionais do tipo custo/benefício.

Uma contribuição deste trabalho, em relação ao que já foi feito a nível nacional na pesquisa sobre a aplicação de métodos multicriteriais, está na abordagem do problema sob a ótica da lógica *fuzzy*. Com o uso desta metodologia, valores e conceitos são analisados como variáveis linguísticas que não representam fronteiras “exatamente” definidas, mas que interagem entre si, formando um corpo indivisível. Verifica-se um elevado número de publicações que adotaram os sistemas *fuzzy* em artigos de periódicos internacionais. No entanto, poucos trabalhos científicos sobre o processo decisório na área de Recursos Hídricos, baseado na lógica *fuzzy*, foram encontrados em publicações de pesquisadores brasileiros.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral da pesquisa foi desenvolver um sistema de apoio à decisão, utilizando à lógica *fuzzy* para a reabilitação de redes de abastecimento de água que introduziu na sua avaliação as perdas por vazamentos, viabilização econômica e os impactos sociais, contribuindo na democratização das decisões, dando subsídio aos dirigentes e técnicos competentes das companhias de abastecimento de água para a geração de alternativas econômicas que proporcionem menores impactos para a sociedade e para o meio ambiente.

Os objetivos específicos são:

- Propor um método para a análise multiobjetivo, que busca encontrar formas para solucionar e flexibilizar a complexidade dos problemas, que empregue técnicas avançadas de programação matemática.
- Contribuir na composição de critérios técnicos, discutindo relações conflitantes entre custos, vazamentos (impactos ambientais) e sociais, e os principais benefícios hidráulicos, bem como a transparência na definição dos pesos e na compreensão de tais critérios.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Chama-se de sistema de distribuição de água o conjunto formado pela rede de distribuição, reservatórios, subadutoras e estações elevatórias. Uma rede de distribuição de água é o conjunto de tubulações, conexões, registros e peças especiais, destinados a distribuir a água tratada de forma contínua, a todos os usuários do sistema. As tubulações são normalmente dispostas nas vias públicas, passando por baixo da pavimentação (enterradas), de modo a facilitar o fornecimento da água às edificações. Para que uma rede de distribuição possa funcionar perfeitamente, é necessário haver pressão satisfatória em todos os seus pontos de consumo. Nas regiões mais distantes ou em cotas elevadas, podem-se instalar bombas, chamadas *boosters*, cujo objetivo é fornecer energia de pressão ao sistema. Nos trechos de redes com pressão em excesso, são instaladas válvulas redutoras de pressão. A rede a ser implantada depende basicamente das características físicas e topográficas, do traçado do arruamento e da forma de ocupação da cidade em estudo.

É importante, também, o conceito de vazões de distribuição que é o consumo distribuído mais as perdas que normalmente acontecem nas tubulações distribuidoras.

#### 2.1.1 Área Específica

Em um sistema de distribuição denomina-se de área específica cada área cujas características de ocupação a torna distinta das áreas vizinhas em termos de densidade demográfica e do tipo de consumidor predominante. Chama-se de vazão específica a vazão média distribuída em uma área específica.

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

- Áreas residenciais.
- Áreas comerciais.
- Áreas industriais.
- Áreas mistas.

### 2.1.2 Zonas de Pressão

Zonas de pressão em redes de distribuição são cada uma das partes em que a rede é subdividida visando impedir que as pressões dinâmicas mínimas e estáticas máxima ultrapassem os limites recomendados e preestabelecidos. Nota-se, então, que uma rede pode ser dividida em quantas zonas de pressão for necessário para atendimento das condições técnicas a serem satisfeitas.

Segundo alguns estudos, 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, para populações de até 5000 habitantes, pode-se trabalhar com até 6 mca com justificativas garantindo que não ocorrerá riscos de contaminação da rede.

No Brasil, a norma ABNT NBR 12.218/1994 recomenda que a rede de distribuição de água seja dividida em zonas de pressão. Nestes setores a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 50 mca, com exceção dos condutos principais que não abastecem consumidores ou condutos secundários. Sempre que possível, recomenda-se adotar as zonas de pressão coincidentes com os Distritos de Medição e Controle. Há um limite inferior para as pressões de serviço, de modo a garantir que a água chegue aos pontos de consumo com uma carga hidráulica suficiente para vencer as perdas nas instalações residenciais. A norma acima estabelece uma pressão dinâmica mínima de 10 mca.

Segundo Bezerra e Cheung (2013), dentre as ações de eficiência voltadas para a gestão eficiente de perdas de água provocadas por vazamentos, o controle da pressão apresenta-se como uma das alternativas mais eficientes para a diminuição do volume de água perdido em vazamentos nos sistemas de distribuição de água. Intuitivamente, é facilmente perceptível que a taxa do fluxo da água em um vazamento é maior quanto maior for a pressão. A influência da pressão nas perdas reais é conhecida há muito tempo pelos pesquisadores e técnicos das companhias de saneamento. No início dos anos 90, foram publicados no Reino Unido vários relatórios como resultado da *National Leakage Initiative*, destacando o *Report G - Managing Water Pressure*, que se tornou uma referência tradicional da relação entre pressão e volume de vazamento. De modo geral, uma diminuição de 10% na pressão em grandes sistemas implica em uma redução aproximada de 12% no volume perdido por vazamentos.



O controle de pressão, também denominado na literatura por gestão da pressão, busca minimizar as pressões e, ao mesmo tempo, garantir o fornecimento aos consumidores. O controle da pressão refere-se aos valores mínimo, médio e máximo, e a sua variação temporal e espacial. Os sistemas devem operar acima dos níveis mínimos de pressão, porém os níveis máximos de pressão também precisam ser estabelecidos e não excedidos. A pressão excessiva de água não só aumenta o volume perdido pelos vazamentos, mas também influencia no aumento do número de rompimentos nos tubos.

A Teoria FAVAD (*Fixed and Variable Area Discharge Paths*) relaciona a vazão perdida com pressão de serviço conforme a Eq. (2.1). A teoria apontou que furos em tubulações flexíveis aumentam de diâmetro conforme a pressão aumenta, influenciando o valor de  $N1$  da Eq. (2.1). Quanto mais rígido o material das tubulações, menor a influência da pressão no volume perdido nos vazamentos. Algo que parece óbvio, porém ainda não havia sido atestado pela comunidade científica (BEZERRA e CHEUNG, 2013).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{N1} \quad (2.1)$$

onde  $Q_0$  é o volume de vazamento inicial associado a pressão  $P_0$ ;  $Q_1$  é o volume de vazamento final associado a pressão  $P_1$ ; e  $N1$  é o expoente que depende do tipo de material. Segundo análises realizadas em países como Inglaterra, Malásia, Canadá, Chipre, Brasil, EUA, Austrália e Nova Zelândia, os valores obtidos para o coeficiente  $N1$  oscilam entre 0,5 e 1,5, mas ocasionalmente alguns valores são acima de 1,5. Um modo prático de avaliar o volume de vazamentos em setores de abastecimento é assumir uma linearidade entre a pressão e a vazão, ou seja,  $N1 = 1$ , onde geralmente se obtém valores próximos aos reais. Todavia, sempre que possível, o coeficiente deve ser determinado *in loco*.

### 2.1.3 Classificação das Redes Hidráulicas

Normalmente as redes de distribuição água constituem-se de tubulações principais, também denominadas de tubulações tronco ou mestras, alimentadas diretamente por um reservatório. Destas principais partem as secundárias das quais saem praticamente à totalidade das vazões dos ramais prediais. As redes hidráulicas possuem diversas classificações.

**De acordo com o tipo de traçado:**

- **Ramificada** - geralmente adotada em pequenas cidades, pequenas áreas, pouca largura urbana etc. Consiste em uma tubulação principal, da qual partem tubulações secundárias (Figura 2.1).

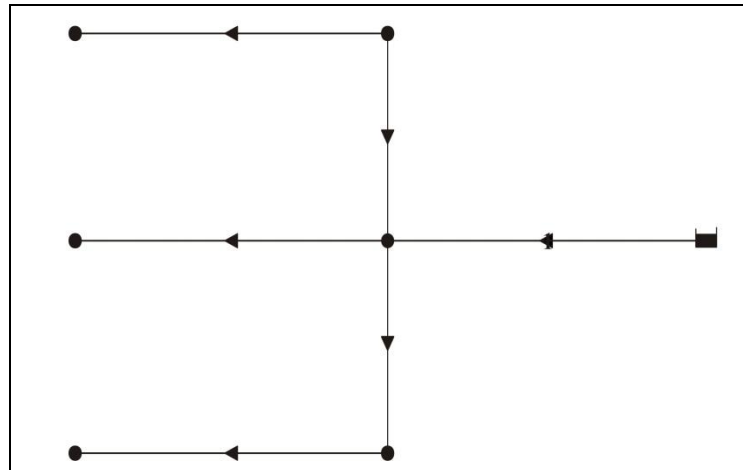


Figura 2.1 - Rede ramificada (rede fictícia)

- **Malhada** - normalmente adotada em grandes cidades e grandes áreas. Na rede malhada, da tubulação principal partem tubulações secundárias que se intercomunicam, evitando extremidades mortas (Figura 2.2). As redes malhadas com anéis consistem em tubulações mais grossas chamadas anéis, que circundam determinada área a ser abastecida e alimentam tubulações secundárias. As redes em anéis permitem a alimentação de um mesmo ponto por diversas vias, reduzindo o risco de desabastecimento. Na prática, a rede mista (malhada + ramificada) é a mais utilizada e apresenta um traçado malhado para os trechos principais e traçados ramificados nos trechos secundários.

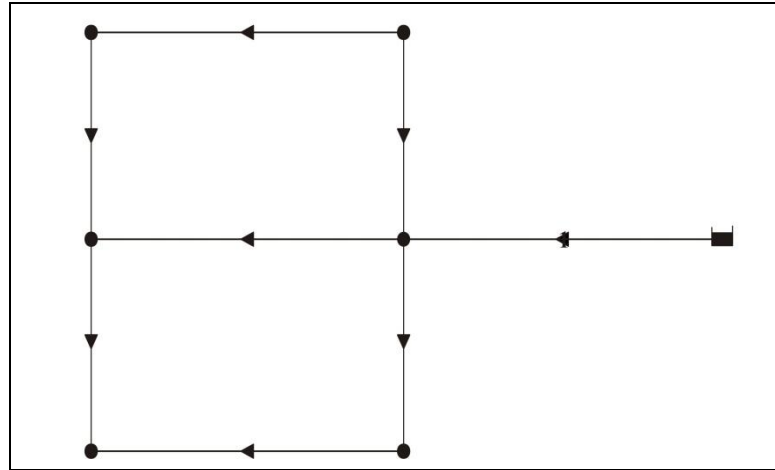


Figura 2.2 - Rede malhada com anel (rede fictícia)

### Com o tipo alimentação dos reservatórios:

- Com reservatório de montante.
- Com reservatório de jusante (Pulmão).
- Com reservatórios de montante e de jusante (grandes cidades).
- Sem reservatórios, alimentada diretamente da adutora (pequenas comunidades).
- Sem reservatório, alimentado diretamente pelo sistema de bombeamento.

## 2.2 LÓGICA FUZZY

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Dado um conjunto  $A$  em um universo  $X$ , os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica  $f_A(X)$ :

$$f_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } X \in A \\ 0 & \text{se e somente se } X \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ . Um conjunto *fuzzy*  $A$  em um universo  $X$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1]$  e representado por um conjunto de pares ordenados  $(\mu_A, x)$ .

$$A = \{ \mu_A(x) / x \mid x \in X \} \quad (2.3)$$

onde  $\mu_A(x)$  indica o quanto  $x$  é compatível com o conjunto  $A$ . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, com diferentes graus de pertinência.

Conjuntos *fuzzy* podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo  $X$  for discreto e finito, o conjunto *fuzzy*  $A$  é normalmente representado:

- Por um vetor contendo os graus de pertinência no conjunto  $A$  dos elementos correspondentes de  $X$ ;
- Por meio da seguinte notação.

$$\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i \quad (2.4)$$

Se o universo  $X$  for contínuo, emprega-se muitas vezes a seguinte notação (onde o símbolo de integral deve ser interpretado da mesma forma que o da soma no caso de um universo discreto):

$$\int_X (\mu_A(x) / x) \cdot dx \quad (2.5)$$

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.

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.

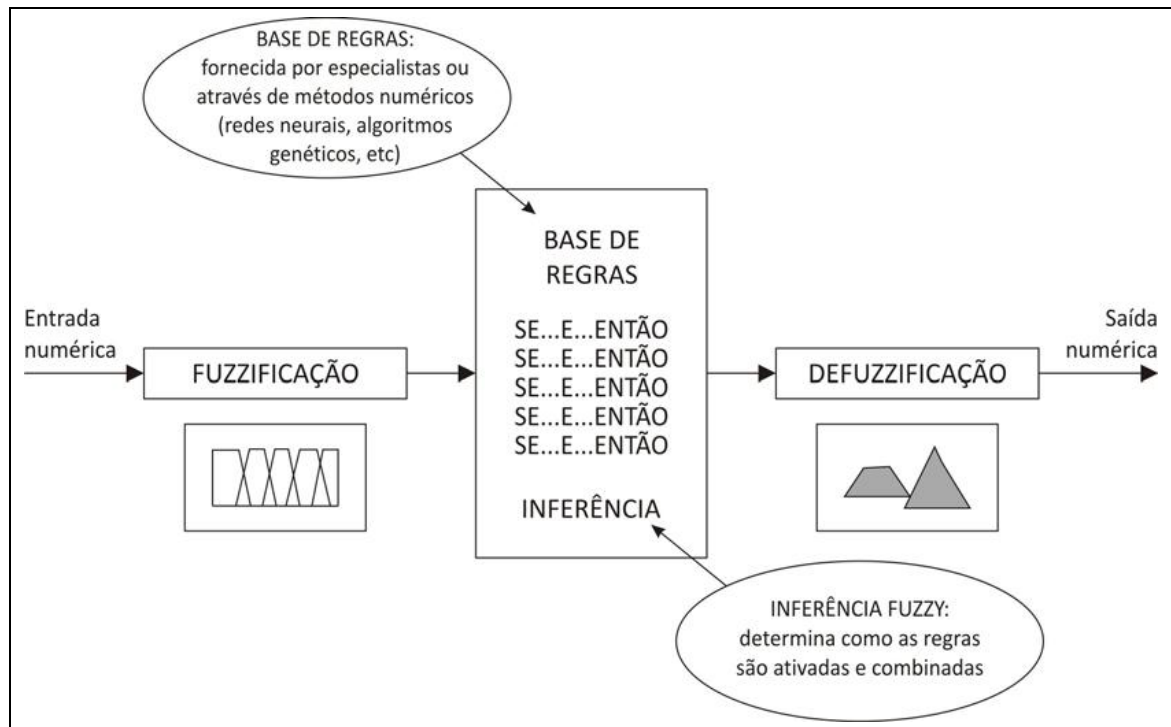


Figura 2.3 - Esquema de um controlador *fuzzy* (BEZERRA, 2009)

Uma variável *fuzzy* é uma variável cujos valores são rótulos de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um elemento poderia ser uma variável *fuzzy* assumindo valores de baixa, média, alta etc. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*. Os valores de uma variável podem ser sentenças de uma linguagem específica. Neste caso, a variável é uma variável linguística. Para ilustrar, os valores da variável *fuzzy* temperatura poderiam ser expressos como muito baixa, baixa, média, alta, muito alta. Os valores *fuzzy* são sentenças formadas a partir de rótulos (como, por exemplo, baixo e muito), da negação “não” e dos conectivos “e”. O comportamento e o desempenho de sistemas de inferência *fuzzy*, em geral, dependem de aspectos relacionados à sua estrutura, as formas das funções de pertinência, operadores utilizados para a implicação e a representação dos conectivos.

### 2.2.1 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a temperatura de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média e alta. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência.

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

### 2.2.2 Funções de Pertinência

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. Para exemplificar o quanto o contexto é relevante na definição de funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo, considere-se a variável linguística *estatura* (de pessoas), constituída dos seguintes termos:  $T(estatura) = \{baixa, média, alta\}$ . A esses se faz corresponder conjuntos *fuzzy* A, B e C, respectivamente, definidos por suas funções de pertinência.

As funções de pertinência, mais comuns são mostradas nas Figura 2.4 e Figura 2.5.

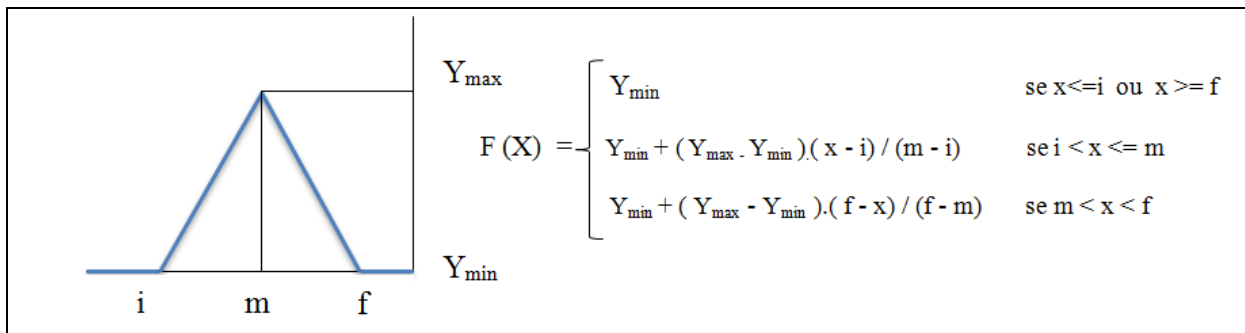


Figura 2.4 - Representação gráfica e matemática da função de pertinência triangular

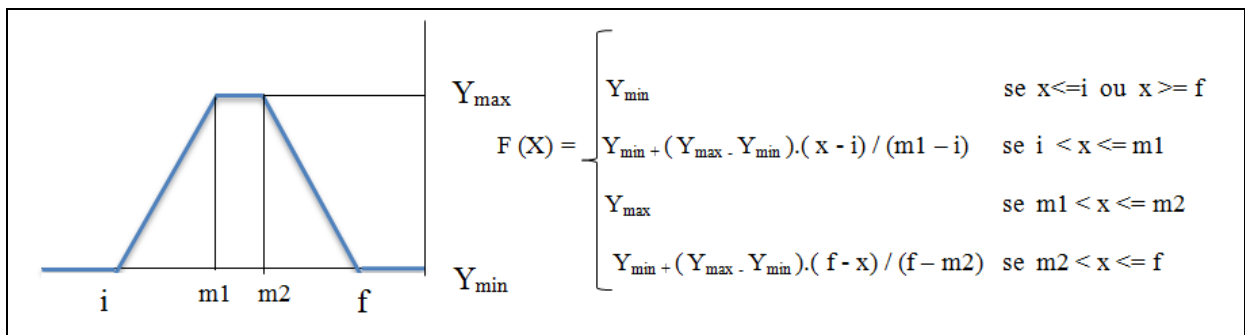


Figura 2.5 - Representação gráfica e matemática da função de pertinência trapezoidal

### 2.2.3 Fuzzificação

Neste estágio ocorre a *ativação* das regras relevantes para uma dada situação e o processo de fuzzificação trata do mapeamento inicial que tem de existir entre as variáveis de entradas (valores reais, por exemplo, leituras de sensores) e as regiões *fuzzy*, de maneira que estas reflitam o estado real do sistema. A base de dados do sistema consiste nas informações relevantes e definições para a discretização do processo, normalização do universo de medidas para o domínio das regiões *fuzzy* consideradas etc. As regras de controle da lógica *fuzzy* tomam o aspecto de regras de inferência do tipo “SE (antecedente) ENTÃO (consequente)”. O antecedente pode ser formado e composto por conjunções e disjunções de condições que têm a forma “variável de entrada *fuzzy*”. A aplicação de regras de controle utiliza um algoritmo de inferência, com todas informações existentes acerca do estado do sistema (o antecedente), para gerar novos conjuntos precisos que descrevem o estado pretendido para as saídas. Os consequentes também tomam a forma “variável de saída *fuzzy*”.

### 2.2.4 Defuzzificação

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência, a defuzzificação é a ação de interpretação de todas essas informações. O processo de defuzzificação encarrega-se de converter as regiões consequentes para valores reais de comando dos atuadores.

A saída do controlador *fuzzy* é um subconjunto *fuzzy* do universo da saída. Como o problema requer, geralmente, um sinal *crisp* (não-*fuzzy*), deve-se fazer uma interpretação do conjunto *fuzzy* resultado da análise. Esta interpretação é justamente denominada defuzzificação.

Os métodos mais utilizados são Centro de Gravidade (*centro da área*, C-o-A, *Center of Gravity*), Centro do Máximo (*método de defuzzificação pelas alturas*, C-o-M, *Center of Maximum*) e Média do Máximo (M-o-M, *Mean of Maximum*).

O método C-o-A calcula a saída discreta  $y$ , como o próprio nome sugere, calculando o centróide da área composta que representa o termo (função de pertinência) de saída *fuzzy* ( $\mu_{OUT}$ ). O cálculo da saída é dada pela Eq. (2.6). A Figura 2.6 apresenta um exemplo de defuzzificação através do método C-o-A.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \mu_{OUT}(y_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(y_i)} \quad (2.6)$$

onde  $y_i$  é a posição do centróide da função de pertinência individual.

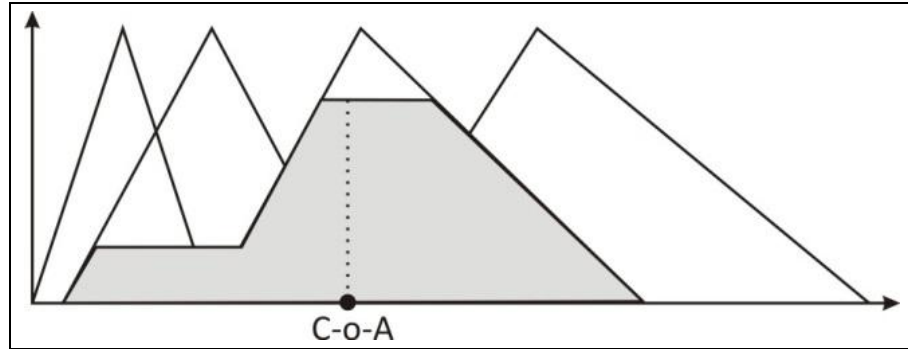


Figura 2.6 - Exemplo de defuzzificação através do método C-o-A

No método C-o-M, os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso da variável de saída são utilizados na defuzzificação, enquanto as áreas das funções de pertinência são ignoradas. Este método é indicado para aplicações de controle em malha fechada, onde a continuidade da saída do controlador é importante para garantir a estabilidade do sistema e não ocorrer oscilações. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência, conforme a Eq. (2.7).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \sum_{K=1}^N \mu_{0,K}(y_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{K=1}^N \mu_{0,K}(y_i)} \quad (2.7)$$

onde  $\mu_{0,K}(y_i)$  são os pontos de máximo (alturas) das funções de pertinência de saída; e  $y_i$  é a posição do máximo da função de pertinência individual.

O método M-o-M é indicado para reconhecimento de padrões, e calcula, como o nome sugere, a saída através da média dos máximos, conforme a Eq. (2.8).



$$y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad (2.8)$$

onde  $i$  é o  $i$ -ésimo elemento do universo de discurso; e  $n$  é o universo total desses elementos.

Em aplicações de malha fechada, é fundamental que a variável de saída seja contínua, para que não haja oscilações e instabilidade no processo, logo a literatura recomenda o uso do método de defuzzificação C-o-A. Este método conduz a um sinal de saída contínuo e não varia significativamente para pequenas mudanças nas variáveis de entrada. Portanto, seguindo recomendações da literatura, optou-se pelo método de defuzzificação C-o-A.

### 2.3 TÉCNICAS DE REABILITAÇÃO EM REDES DE ABASTECIMENTO

As técnicas de reabilitação são classificadas em destrutivas ou não destrutivas. O processo destrutivo é feito com a abertura de valas ao longo das tubulações, causando grandes transtornos, principalmente em vias urbanas. Já o procedimento não destrutivo caracteriza-se pela abertura de pequenas valas e poços de inspeção. Segundo RANGEL e SABRINA (2002), o impacto em procedimentos não destrutivos é cerca de 70% inferior as reabilitações feitas com procedimentos destrutivos. As técnicas não destrutivas são amplamente empregados nos Estados Unidos e em países da Europa. No Brasil, as grandes companhias estão adotando estas técnicas na implantação e reabilitação de novas redes hidráulicas.

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 correção da rede é a mais barata. Devido à escassez, ou até mesmo a falta de recursos disponíveis nos órgãos encarregados de realizar as manutenções, a reabilitação é feita com técnicas desapropriadas que acabam gerando grandes transtornos no entorno dos locais onde estão sendo executadas as obras. No Brasil e no mundo, já estão sendo utilizadas técnicas avançadas de inspeção que ajudam na escolha de qual técnica utilizar. O vídeo inspeção (Figura 2.7 e Figura 2.8) é uma técnica que auxilia na detecção de problemas (rachaduras, fissuras, trincas) 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.

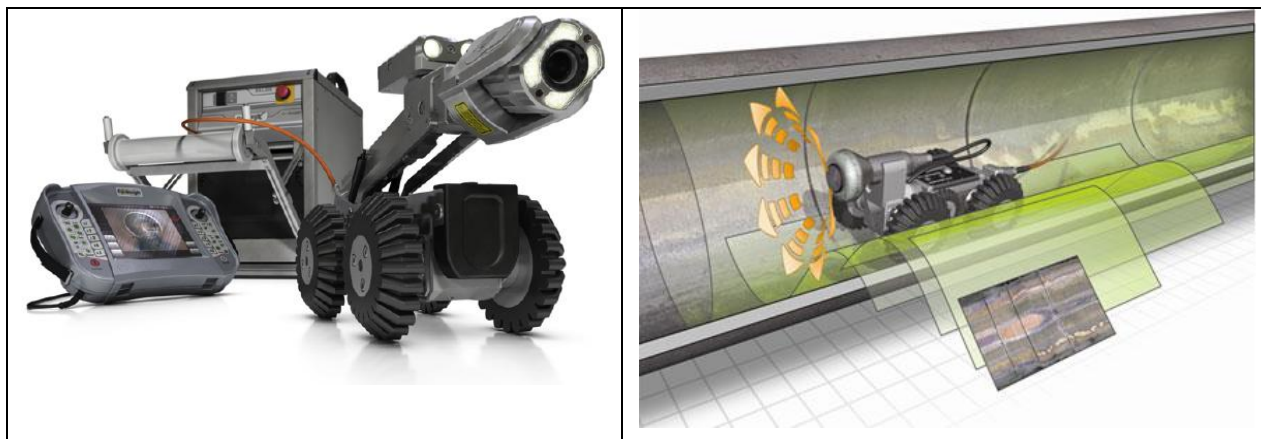


Figura 2.7 - Vídeo inspeção (Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))



Figura 2.8 - Colapso parcial de uma rede com tubo cerâmico mostrado por vídeo inspeção (Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))

### 2.3.1 Técnicas Destrutivas de Reabilitação

As técnicas destrutivas Figura 2.9 são mais usadas, entretanto, podem não ser a mais viável, pois causam grandes impactos sociais, transtornos no trânsito e ao comércio local. A grande quantidade de tubulação defeituosa, a falta de recursos das empresas responsáveis pelas obras, a falta de conhecimento de novas técnicas empregadas, são razões pela qual estes métodos são largamente adotados.



Figura 2.9 - Interdição de ruas e avenidas  
(Fonte: [www.semasaitajai.com.br](http://www.semasaitajai.com.br))

### 2.3.2 Técnicas Não Destrutivas de Reabilitação

#### Substituição de Tubulações - Método de *Pipe Bursting*

Quando as tubulações ou uma rede de abastecimento apresentam um grande número de vazamentos, encontram-se muito deterioradas, apresentam sua capacidade de transporte reduzida pela sedimentação de materiais ou por degradação da seção transversal a melhor solução é a troca da tubulação defeituosa.

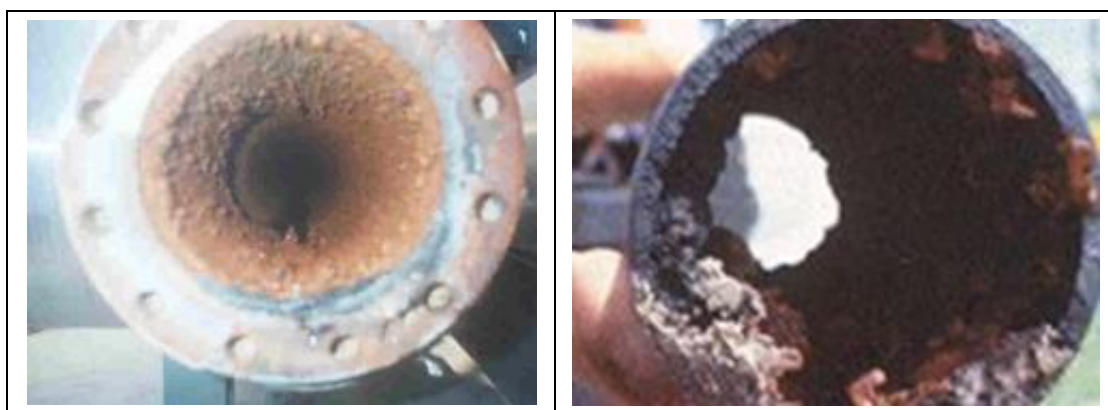


Figura 2.10 - Imagem de tubos enferrujados  
(Fonte: [www.semasaitajai.com.br](http://www.semasaitajai.com.br))

O método de *Pipe Bursting* é uma técnica na qual as tubulações defeituosas são arrebentadas por meio de um equipamento fragmentador, que exerce uma força radial no interior da tubulação, e simultaneamente uma nova tubulação de polietileno de alta densidade

(PEAD) é colocada substituindo à antiga. A nova tubulação pode apresentar ou não um diâmetro superior ao diâmetro antigo.

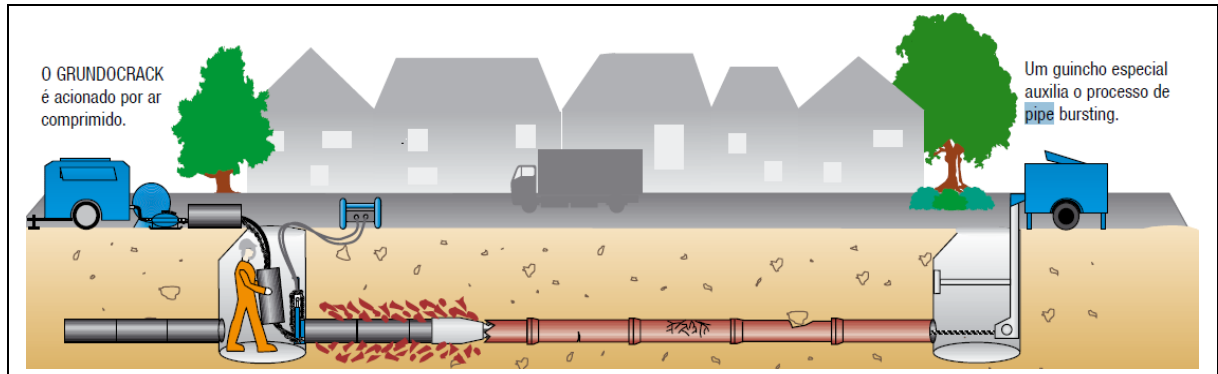


Figura 2.11 - Imagem *Pipebursting*  
(Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))

### Método de *Sliplining*

Esse método consiste em introduzir uma nova tubulação em outra pré-existente. Nesse método a nova tubulação apresenta um diâmetro inferior, isso não significa que haverá redução da capacidade de transporte de água já que a tubulação antiga, embora com diâmetro superior, apresenta maior rugosidade e vazamentos (GOMES e BEZERRA, 2007). A nova tubulação é geralmente de polietileno (PE) ou PVC, que dependendo do estado e do traçado da rede só poderão ser introduzidos tubos com até 600 metros.

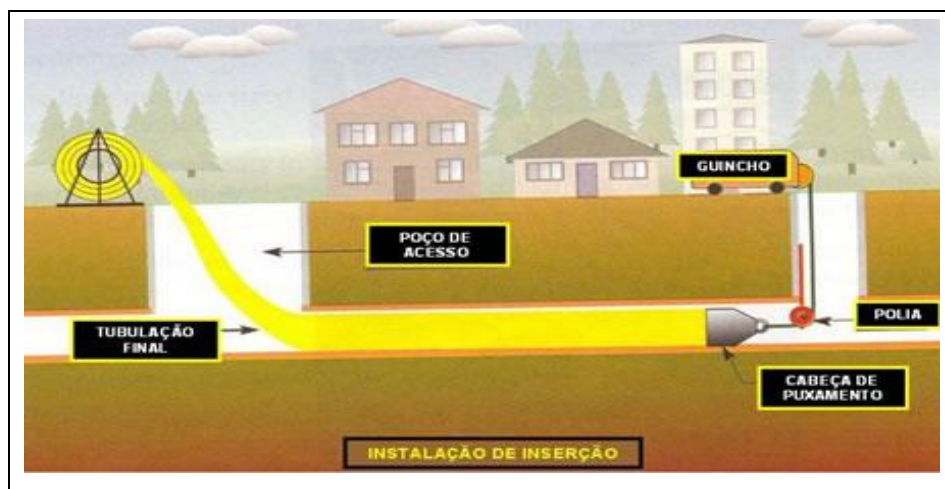


Figura 2.12 - Tubulação nova inserida na tubulação antiga  
(Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))



## Limpeza das Tubulações

Quando tubulações de uma rede de distribuição de água de grande importância têm sua capacidade de transporte (fluxo) reduzida devido a incrustações e a sedimentação de materiais nas seções internas do tubo, são utilizados métodos químicos e mecânicos de limpeza. O método mecânico utiliza os “*polly-pig*” e os raspadores de arraste hidráulico. *Polly-pig* (torpedo de poliuretano) é um instrumento que faz a limpeza e desobstrução interna dos tubos sem o uso de produtos químicos agressivos e sem a necessidade de remoção do tubo. Nos tubos de PVC, fibrocimento e concreto são usados *polly-pig* com uma fita composta de material abrasivo que não danificam o interior da tubulação; em tubos metálicos não revestidos usa-se *polly-pig* com escovas metálicas ou raspadores de arraste hidráulico. Os *polly-pig* são instrumentos que se assemelham a cápsulas com formato cilíndrico, base côncava e com um perfil parabólico. Quando inseridos na tubulação, os *polly-pig* devem seguir a direção de fluxo da água, são projetadas rotações enquanto eles movimentam-se no interior do tubo e ao mesmo que se desloca ele limpa a superfície interna e remove todo material estranho acumulado. Os *polly-pig* são monitorados por rádio transmissores, que acompanham toda sua movimentação ao longo do tempo. A desvantagem é a utilização desta técnica para redes com tubos de pequenos diâmetros e elevado número de peças especiais (válvulas, curvas etc.), devido a interrupções do seu movimento no interior do tubo, e por isso deve ser feita em trechos com pequenos comprimentos.

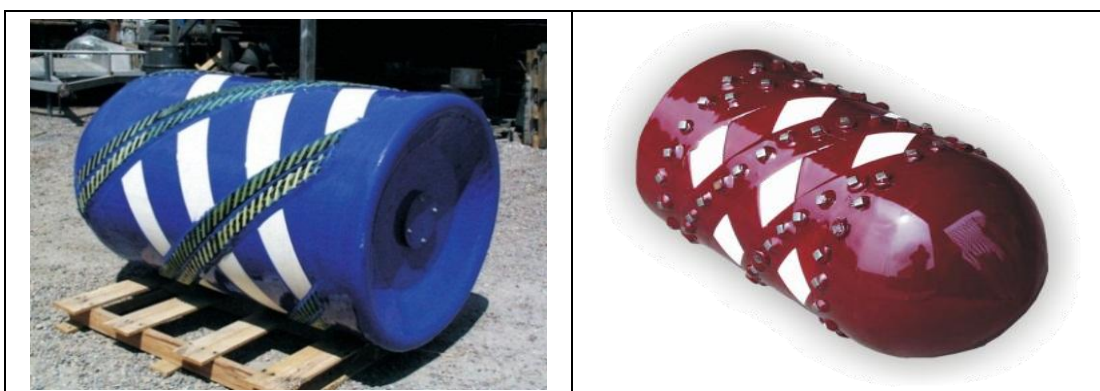


Figura 2.13 - *Polly-pigs*  
(Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))

A limpeza química é pouca empregada e retira todo material depositado na superfície das tubulações, válvulas, cotovelos e cruzetas. O tipo do material depositado e a sua

quantidade irá determinar que produto utilizar. O tempo de contato do tubo com o produto também é limitado já que se trata de um elemento químico que pode danificar a estrutura do tubo. Alguns produtos, além da limpeza, promovem a prevenção de futuras corrosões. Outra vantagem é a eliminação de biofilmes e microorganismos presentes nas tubulações com a qual esteve presente a solução química.

### **Aplicação de Revestimento com Argamassa de Cimento**

Esse procedimento consiste no revestimento interno dos tubos com argamassa de cimento com espessura de 3 a 6 mm sobre a superfície metálica. O revestimento deve ser precedido de uma limpeza interna para melhorar a aderência. Segundo VENTURINI e BARBOSA (2002), o uso do revestimento com argamassa de cimento em tubulações foi reportado pela primeira vez pela Academia Francesa de Ciência, em 1836, sendo a técnica mais usada nesse período para reabilitação de tubulações. O método é aplicado em tubulações com diâmetro que variam de 100 a 2000 mm. A desvantagem é a diminuição do diâmetro interno do tubo que poderá ser compensado com a diminuição da rugosidade do tubo.

### **Aplicação Revestimento por Aspersão (*Spray Lining*)**

O revestimento por aspersão é muito pouco usado em redes de distribuição de água, embora em alguns países seja usado extensivamente em ligações domiciliares de gás. Frequentemente, o principal objetivo da recuperação de redes de distribuição de água é a remoção de depósitos e corrosão, com a posterior aplicação de um revestimento que iniba a deterioração futura e vede pequenos vazamentos. Os materiais de uso mais comum para esse fim são argamassa de cimento ou resina epóxi, aplicadas por uma máquina de aspersão puxada através da rede a uma velocidade constante predeterminada.



Figura 2.14 - Cabeçote de aspersão de revestimento em epóxi

(Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))

### **Reparos Localizados Pontuais e Vedação**

Foram desenvolvidos diversos sistemas para reparos localizados em redes de distribuição de água, alguns destinados à vedação de juntas em redes pressurizadas. Nos Estados Unidos está sendo utilizada com frequência em redes hidráulicas as técnicas de reparos pontuais e vedação. Muitas técnicas são adaptações dos sistemas de revestimento para seção plena, especialmente aqueles baseados em inserção de tubos de feltro e resina com cura *in loco*. Atualmente, estes métodos possuem uma semelhança incrível com o cateterismo e instalação de “*Stents*” em sistemas coronários. Os aspectos econômicos dessas técnicas precisam ser verificados para cada caso, mas está claro que há situações em que os danos estão restritos a apenas parte do comprimento da rede, e o reparo dos defeitos individuais poderá ser mais vantajoso economicamente que a recuperação de toda a extensão da rede.

A limpeza e pré-inspeção são essenciais para os sistemas de reparo localizado, tanto quanto foram para os métodos de recuperação integral. Para os métodos de reparo localizado pontual que requeiram uma ligação com a tubulação existente, todos os vestígios de graxa e entulho precisam ser removidos. Existem cinco categorias principais de sistemas de reparo localizado: reparos com luva ou feltro impregnado; sistemas de injeção de resina; reparos com robôs; recomposição da seção circular; e vedação de juntas. A comparação leva à questão do que constitui ou não um reparo “estrutural”.

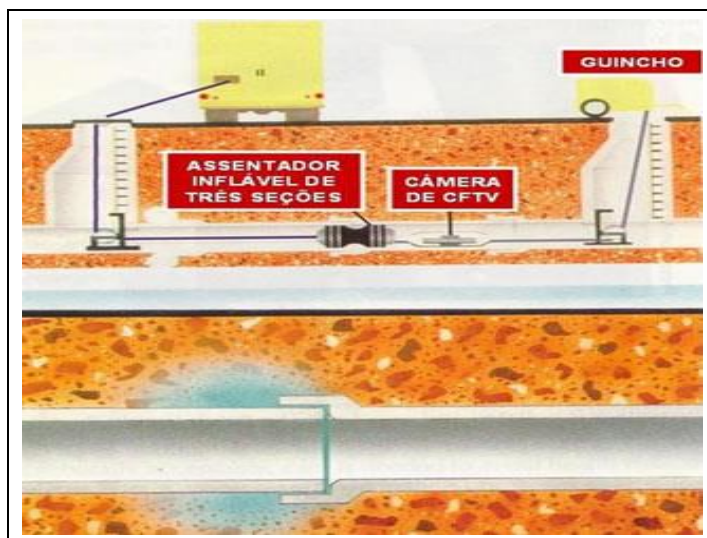


Figura 11 - Teste e vedação de juntas com utilização de assentador inflável  
(Fonte: [www.abratt.org.br](http://www.abratt.org.br))

### **Perfuratriz Direcional - Implantação de Tubulações por Métodos Não Destrutivos**

É um método usado em tubulações de água, gás e telecomunicações, e são geralmente utilizados tubos de polietileno de alta densidade (PEAD) e aço.

O método consiste na colocação de uma tubulação em paralelo a que existe sem a necessidade de abertura de valas, aumentando assim, a capacidade de transporte de água. Segundo WALSKI (1986), quando o crescimento da demanda supera, em curto prazo, a demanda prevista, a colocação de uma nova tubulação em paralelo à rede existente é a melhor opção para reabilitar o sistema. Para execução desse método é preciso uma máquina perfuratriz direcional (utiliza um equipamento montado na superfície) que introduza a nova tubulação. A perfuratriz executa um furo piloto com uma broca em forma de bisel que também lança jatos de lama betonítica (tipo de argila) em alta pressão, ao atingir o ponto final da escavação, a broca é submetida por um escarificador que alarga o diâmetro do furo até o diâmetro desejado. Tendo sido feito o furo, a nova tubulação é acoplada ao escarificador que percorre um caminho inverso ao da broca. O equipamento pode ser usado em solos com até 30% de rocha e consegue realizar desvios para contornar obstáculos e outras interferências existentes.





Figura 2.15 - Método com perfuratriz direcional  
(Fonte: [www.sondec.com.br](http://www.sondec.com.br))

### 3 METODOLOGIA

O modelo proposto para reabilitação será concebido em três etapas. A primeira etapa refere-se ao módulo de simulação, que será realizada com o simulador hidráulico EPANET (programa computacional aberto e livre). O EPANET foi escolhido por ser um simulador amplamente aceito pela comunidade internacional. A maioria dos sistemas de abastecimento de água existentes foi modelado neste programa (BISCOS *et al.*, 2003). A etapa seguinte representa o processo de tomada de decisão (otimização) propriamente dito, que é baseado na lógica *fuzzy*.

A terceira etapa representa a resposta final do modelo, ou seja, o planejamento otimizado da reabilitação do sistema de abastecimento de água (soluções alternativas). Minimização de custos, vazamentos e impactos sociais são os critérios que o sistema de apoio à decisão considera, simultaneamente, para gerar o planejamento. Tais planos refletem a relação de compromisso entre a satisfação da sociedade (minimização dos impactos sociais), a proteção ao meio ambiente (minimização do volume perdido por vazamentos) e as metas econômicas (minimização de custo). A Figura 3.1 apresenta o fluxograma do modelo proposto.

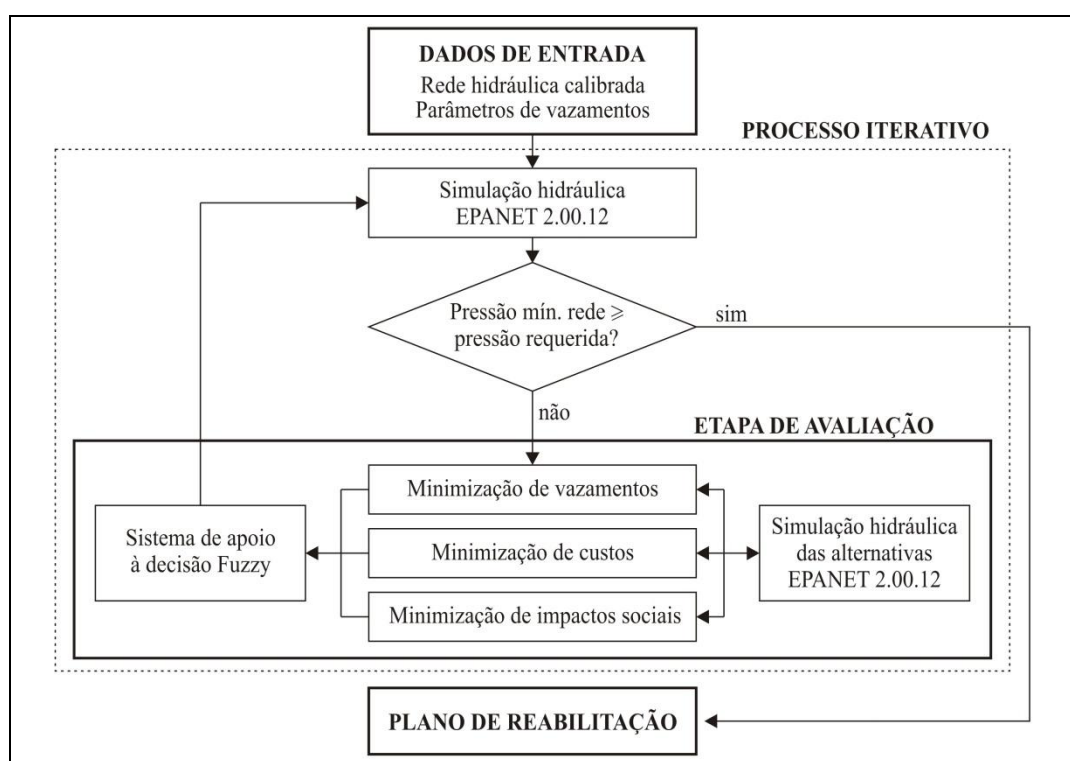


Figura 3.1 - Modelo proposto de planejamento otimizado de reabilitação de redes de abastecimento de água

### 3.1 EPANET

O EPANET 2.0 foi desenvolvido pela U. S. *Environmental Protection Agency* (USEPA). É um simulador de sistemas de abastecimento de água amplamente testado e credível. Obs.: A tradução do EPANET é referente à versão original em inglês 2.00.12.

O EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Uma rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter os valores da vazão em cada tubulação, 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 intervalos de cálculo. Adicionalmente, além de espécies químicas, o modelo simula o cálculo da idade da água e o rastreio da origem de água em qualquer ponto da rede.

O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efetuar simulações de sistemas pressurizados de distribuição. O estabelecimento de cenários de projeto (p.ex., expansão de uma rede existente), a calibração de modelos hidráulicos, a análise do decaimento do cloro residual e a avaliação dos consumos são alguns exemplos de aplicação do programa. O EPANET pode ajudar a analisar estratégias alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água do sistema, através de:

- Alterações na utilização de origens da água num sistema com múltiplas origens;
- Alteração de esquema de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável;
- Utilização de tratamento adicional, tal como a recloração;
- Seleção de tubulações para limpeza e substituição (reabilitação).

Em ambiente Windows, o EPANET fornece uma interface integrada para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos. Estes últimos incluem isolinhas.

### **3.1.1 Capacidades de Modelagem Hidráulica**

Uma rede completamente caracterizada (ou seja, incluindo todas as tubulações, sem simplificações) e uma modelagem hidráulica confiável constituem pré-requisitos essenciais para a correta modelagem de qualidade da água. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, onde se destacam como principais características:

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada;
- Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc;
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável;
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- Modelagem dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- Modelagem da relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (p.ex. aspersores de irrigação, ou consumos dependentes da pressão);
- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (p.ex., altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

### **3.1.2 Capacidades de Modelagem da Qualidade da Água**

Além da modelagem hidráulica, o EPANET fornece as seguintes possibilidades relativas à modelagem da qualidade da água:

- Modelagem do transporte de um constituinte não reativo (p.ex., um traçador) através da rede ao longo do tempo;

- Modelagem do transporte, mistura e transformação de um constituinte reativo, à medida que este sofre decaimento (p.ex., cloro residual) ou crescimento (p.ex., um subproduto da desinfecção) com o tempo;
- Modelagem do tempo de percurso da água através da rede;
- Cálculo da porcentagem de vazão que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (p.ex., cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes);
- Modelagem de reações de decaimento do cloro no volume do escoamento e na parede da tubulação;
- Utilização de cinéticas de ordem “n” para modelar reações no volume do escoamento em tubulações e reservatórios;
- Utilização de cinéticas de ordem 0 ou 1 para modelar reações na parede das tubulações;
- Definição de limites para a transferência de massa na modelagem de reações na parede;
- Permitir que as reações de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração-limite;
- Aplicação à rede de coeficientes de reação globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubulação;
- Possibilidade de relacionar o coeficiente de reação na parede com a rugosidade da tubulação;
- Definição de variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável como reatores de mistura completa, de escoamento em êmbolo ou ainda de mistura com dois compartimentos.

Aproveitando as possibilidades antes citadas, o EPANET pode efetuar os seguintes tipos de análise:

- Mistura de água a partir de diversas origens;
- Determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- Determinação da perda de cloro residual;

- Determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção;
- Rastreamento da propagação de contaminantes ao longo da rede.

### 3.2 CRITÉRIOS AVALIADOS

Para execução do trabalho foi preciso adotar critério de avaliação para ser possível, a partir desses critérios, avaliar de forma mais eficaz os parâmetros adotados como os vazamentos, custos e impacto social. Uma forma simples de fazer tais avaliações é trabalhar com esses critérios e avalia-los de forma independente.

#### 3.2.1 Critério 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.

A maioria dos modelos matemáticos que consideram os vazamentos na sua metodologia esta relacionada com algoritmos de otimização (WALSKI, 1986; LANSEY e BASNET, 1991; GIUSTOLISI e BERARDI, 2011; ZHONG e QU, 2012 etc.). Pouca atenção tem sido dada aos critérios que utilizam a aquisição de dados de campo para estimativa de parâmetros relacionados com as perdas de água (vazamentos).

Na presente pesquisa, a quantificação das perdas reais em sistemas de abastecimento de água é calculada através da pressuposta relação entre vazamento e pressão de serviço na rede. Utiliza-se a formulação proposta por Tucciarelli *et al.* (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. 3.1.

$$QL_i = (H_i - Z_i)^a \sum_{j=1}^n \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (3.1)$$

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  $\theta$  é o coeficiente de vazamentos, por unidade de superfície de tubulação, do trecho  $j$  do nó  $i$ .

A formulação proposta por Tucciarelli *et al.* (1999) considera o coeficiente de vazamentos ( $\theta$ ), 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  $\theta$  adotado é baseado no valor adotado por Formiga e Chaudhry (2002),  $10^{-7} \text{ m}^{-0,18} \text{ s}^{-1}$ .

O cálculo dos vazamentos na rede exemplo é efetuado para cada possível intervenção na rede em cada iteração. Cada simulação resulta de uma intervenção candidata (possível intervenção) e o vazamento total na rede foi calculado como a soma dos vazamentos em todos os trechos.

Para cada possível intervenção na rede, em cada iteração, é calculado o volume total perdido pelos vazamentos na rede. De posse desse conjunto de valores estimados de volume perdido por vazamentos, adota-se um intervalo de 1 a 10 para cada resultado das simulações. Para a composição dos valores padronizados é realizada uma análise estatística Boxplot sobre o volume perdido por vazamentos, de modo a definir os extremos (limites superior e inferior). Esses limites calculados são definidos para os valores 1 e 10, respectivamente, os demais valores são obtidos a partir de interpolação linear.

O BOXPLOT foi proposto em 1977 (TUKEY, 1997) e é um eficiente método para estabelecer um intervalo que sumariza um conjunto de dados. O método é baseado nas seguintes variáveis estatísticas:

- Valor mínimo do intervalo ou limite inferior.
- Primeiro quartil (Q1).
- Mediana (segundo quartil Q2).
- Terceiro quartil (Q3).
- Valor máximo do intervalo ou limite superior.

O cálculo dos limites para uma dada amostra é feito da seguinte forma:

- O limite superior é igual ao quartil 3 (Q3) mais três meios de IQR.
- O limite inferior é igual ao quartil 1 (Q1) mais três meios de IQR.
- IQR é igual ao quartil 3 (Q3) menos o quartil (Q1).
- Limite superior =  $Q3 + 1,5 \cdot IQR$ .
- Limite Inferior =  $Q1 - 1,5 \cdot IQR$ .

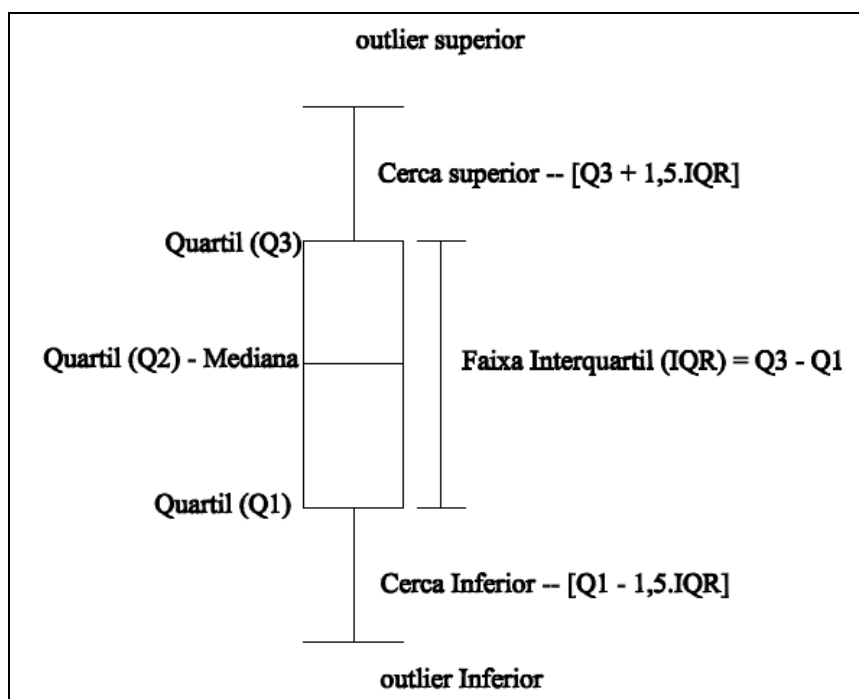


Figura 3.2 - Representação BoxPlot

Após a obtenção dos valores padronizados para o volume total de vazamentos para cada simulação, é calculado o valor final do critério, levando em consideração também a idade da tubulação. Tabesh e Saber (2012) determinaram que a idade das tubulações, entre todos os outros parâmetros físicos e hidráulicos da rede, foi o fator que possuiu maior influência na reabilitação das redes que analisaram. A Tabela 3.1 mostra o valor padronizado final para o critério ambiental a partir do cruzamento entre o volume de vazamentos (valor padronizado) e a idade da tubulação.



Tabela 3.1 - Valores padronizados para o critério ambiental

		Idade		
		5	10	15
Vazamento	0	10	10	9
	2	9	9	8
	4	8	7	7
	6	6	6	5
	8	5	4	3
	10	2	1	1

A determinação desses valores fica a critério do técnico responsável pelo projeto de reabilitação, logo, trata-se de uma análise subjetiva. A idade de uma tubulação é um fator importante a ser considerado, pois, por menos vazamentos que ela possa ter, uma tubulação antiga pode começar a apresentar comprometimento funcional em curto prazo (alta rugosidade, ferrugem, fissuras etc.). O valor padronizado final para cada intervenção será a representação para avaliação do critério de impacto ambiental.

### 3.2.2 Critério 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. (3.2).

$$G_c = (C_{ij} - C_{i(j-1)})/\Delta P \quad (3.2)$$

onde  $G_c$  é o gradiente de custo (\$/m),  $C_{i(j-1)}$  é 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  $\Delta P$  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.
- $C_{duplicação}$  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 ( $G_c$ ) devem ser padronizados para o intervalo [1, 10] com o auxílio da análise estatística Boxplot. Deste modo, os valores resultados das simulações estarão dentro dos intervalos das variáveis de entrada do Sistema *Fuzzy*.

### 3.2.3 Critério Social

Quando uma rede de distribuição é implantada pela primeira vez, a companhia de saneamento tem a oportunidade de instalar uma série de serviços com relativa facilidade, porque provavelmente são raros os moradores e empresas na região. Mais tarde, porém, a situação é completamente diferente e torna-se um desafio minimizar o impacto social causado

por prestadores de serviços trabalhando em uma área urbana. A abertura de valas, inevitavelmente, atrapalham o trânsito e o comércio local.

O critério social refere-se ao transtorno, impacto social, causado á sociedade que trafega no local ou região. Na prática, antes de qualquer intervenção em uma rede urbana, os gestores analisam os impactos causados e verificam as alternativas a serem realizadas. Neste modelo de reabilitação, esta análise é subjetiva, pois, o que pode ser muito impactante para um técnico, pode não ser tão impactante para outros. O responsável por esse tipo de decisão, para avaliação dos impactos, deve analisar bem o funcionamento do transito 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. Os valores foram adotados 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, adotamos o peso para essa substituição de acordo com a via onde foi 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.

### 3.3 SISTEMA FUZZY

Existem diferentes métodos de inferência *fuzzy* com diferentes propriedades. O *Fuzzy Logic toolbox* do MATLAB oferece duas opções: o Método de Mamdani e o Método de 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 Mandani 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 apresenta, 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, recomendações da literatura e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado pelas simulações, determinaram-se as variáveis de entrada “Custo” (critério econômico), “Vazamento” (critério ambiental) e “Transtorno” (critério social), e a variável de saída “Peso” (Tabela 4.3). As Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7 apresentam, graficamente, as funções de pertinência das variáveis de entrada e saída.

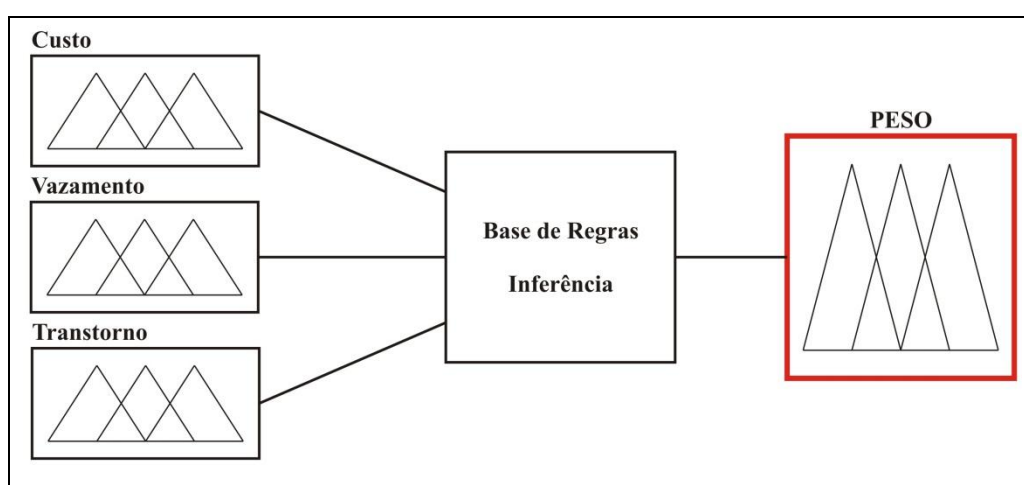


Figura 3.3 - Variáveis do sistema *fuzzy*

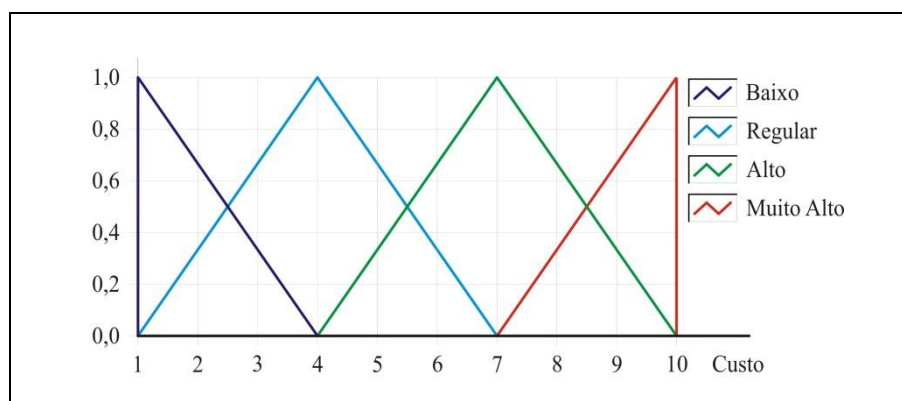


Figura 3.4 - Variável linguística de entrada *Custo* (critério econômico)

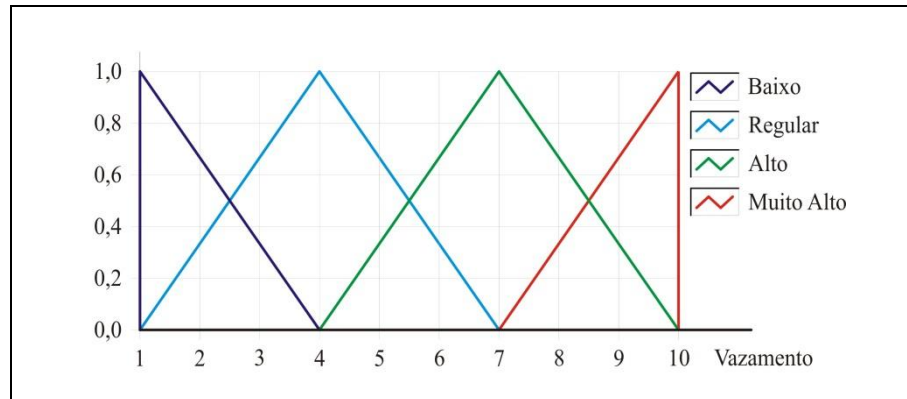


Figura 3.5 - Variável linguística de entrada *Vazamento* (critério ambiental)

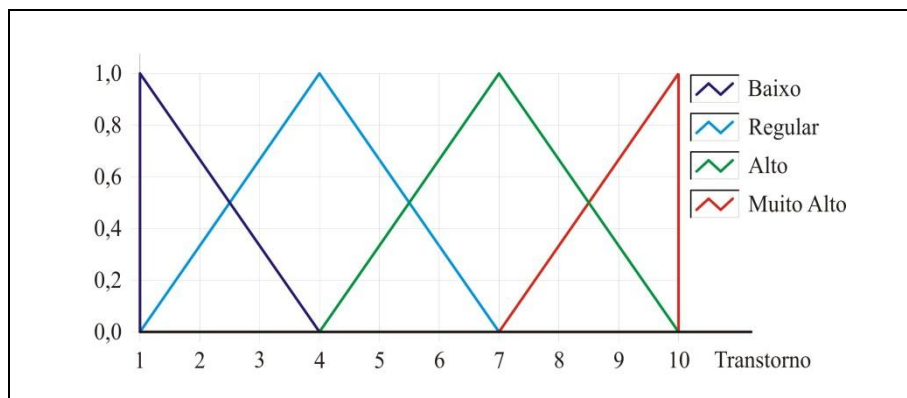


Figura 3.6 - Variável linguística de entrada *Transtorno* (critério social)

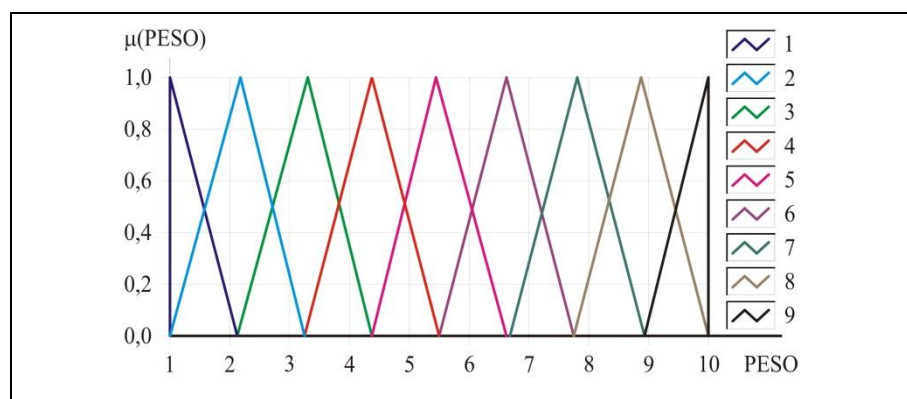


Figura 3.7 - Variável linguística de saída *Peso*

### 3.3.1 Inferência Fuzzy

A inferência *fuzzy* é utilizada para se obter conclusões sobre um conjunto de leis **SE ENTÃO**. Além disso, em geral, os sistemas *fuzzy* podem ser agrupados em dois modelos de sistema de inferência *fuzzy* o de Mamdani e o de Sugeno.

O primeiro é constituído por modelos linguísticos, ou seja, a base das regras é estritamente linguística e baseia-se na utilização da linguagem natural para descrever o comportamento dos sistemas.

O modelo Mamdani apresenta como característica básica o fato de tanto os antecedentes como os consequentes serem mapeados por conjuntos linguísticos. Para cada regra de inferência, caso tenhamos mais de uma variável de entrada, é necessário aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, a fim de que seja gerado um conjunto consequente. No caso de existirem “n” regras, serão gerados “n” conjuntos consequentes, que são combinados. Os controladores *fuzzy* baseados em regras relacionam os conjuntos *fuzzy* do seguinte modo:

Foram estabelecidas 54 regras de interferência *fuzzy* para determinação da variável de saída “Peso”, que relacionam as variáveis de entrada com as de saída. As regras são:

**SE** *Custo* é “Muito Alto” **E** *Vazamento* é “Muito Alto” **ENTÃO** *Peso* é 1

**SE** *Custo* é “Muito Alto” **E** *Vazamento* é “Alto” **ENTÃO** *Peso* é 1

**SE** *Custo* é “Muito Alto” **E** *Vazamento* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 2

**SE** *Custo* é “Muito Alto” **E** *Vazamento* é “Baixo” **ENTÃO** *Peso* é 2

**SE** *Custo* é “Alto” **E** *Vazamento* é “Muito Alto” **ENTÃO** *Peso* é 2

**SE** *Custo* é “Alto” **E** *Vazamento* é “Alto” **ENTÃO** *Peso* é 2

**SE** *Custo* é “Alto” **E** *Vazamento* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 3

**SE** *Custo* é “Alto” **E** *Vazamento* é “Baixo” **ENTÃO** *Peso* é 4

**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Muito Alto” **ENTÃO** *Peso* é 3

**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Alto” **ENTÃO** *Peso* é 4

**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 5

**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Baixo” **ENTÃO** *Peso* é 6

**SE** *Custo* é “Baixo” **E** *Vazamento* é “Muito Alto” **ENTÃO** *Peso* é 4

**SE** *Custo* é “Baixo” **E** *Vazamento* é “Alto” **ENTÃO** *Peso* é 5

**SE** *Custo* é “Baixo” **E** *Vazamento* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 6

**SE Custo é “Baixo” E Vazamento é “Baixo” ENTÃO Peso é 7**  
**SE Vazamento é “Muito Alto” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 1**  
**SE Vazamento é “Muito Alto” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 1**  
**SE Vazamento é “Muito Alto” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Vazamento é “Muito Alto” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Vazamento é “Alto” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 1**  
**SE Vazamento é “Alto” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Vazamento é “Alto” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Vazamento é “Alto” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 4**  
**SE Vazamento é “Regular” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Vazamento é “Regular” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Vazamento é “Regular” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 4**  
**SE Vazamento é “Regular” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 5**  
**SE Vazamento é “Baixo” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Vazamento é “Baixo” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 4**  
**SE Vazamento é “Baixo” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 5**  
**SE Vazamento é “Baixo” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 6**  
**SE Custo é “Muito Alto” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 1**  
**SE Custo é “Muito Alto” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 1**  
**SE Custo é “Muito Alto” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Custo é “Muito Alto” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Custo é “Alto” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Custo é “Alto” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 2**  
**SE Custo é “Alto” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Custo é “Alto” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 4**  
**SE Custo é “Regular” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Custo é “Regular” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 4**  
**SE Custo é “Regular” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 5**  
**SE Custo é “Regular” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 6**  
**SE Custo é “Baixo” E Transtorno é “Muito Alto” ENTÃO Peso é 3**  
**SE Custo é “Baixo” E Transtorno é “Alto” ENTÃO Peso é 4**  
**SE Custo é “Baixo” E Transtorno é “Regular” ENTÃO Peso é 5**  
**SE Custo é “Baixo” E Transtorno é “Baixo” ENTÃO Peso é 6**

**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Regular” **E** *Transtorno* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 7  
**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Regular” **E** *Transtorno* é “Baixo” **ENTÃO** *Peso* é 7  
**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Baixo” **E** *Transtorno* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 7  
**SE** *Custo* é “Regular” **E** *Vazamento* é “Baixo” **E** *Transtorno* é “Baixo” **ENTÃO** *Peso* é 8  
**SE** *Custo* é “Baixo” **E** *Vazamento* é “Regular” **E** *Transtorno* é “Regular” **ENTÃO** *Peso* é 9  
**SE** *Custo* é “Baixo” **E** *Vazamento* é “Baixo” **E** *Transtorno* é “Baixo” **ENTÃO** *Peso* é 9

As últimas regras, que consideram as três variáveis de entrada, foram adotadas para abranger as situações onde as intervenções não são recomendadas, logo, os conjuntos de saída atribuídos para estas regras possuem valores altos.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para execução da metodologia proposta foi utilizada duas Redes Exemplos amplamente trabalhadas no meio científico. As redes já foram largamente usadas como rede teste para outros modelos propostos.

O ideal seria que metodologia fosse aplicada sobre uma rede preexistente, só assim poderíamos comparar os resultados obtidos com a realidade da rede. Em virtude do pouco tempo e, de certa forma da dificuldade de obtenção desses parâmetros reais, optou-se pela uso de redes trabalhadas e outros modelos.

### 4.1 REDE EXEMPLO 1

A rede hidráulica proposta por Alperovits e Shamir (1977) foi adotada como o primeiro estudo de caso. Esta rede exemplo é utilizada com frequência para verificar a adequação e aplicabilidade de diferentes modelos matemáticos apresentados na literatura (SAVIC e WALTER, 1997; SURIBABU e NEELAKANTAN, 2006; GIL *et al.*, 2011; SEDKI e OUAZAR, 2012 etc.).

Esta rede é composta por seis nós consumidores, conectados entre si por oito trechos que formam dois anéis (Figura 4.1). As demandas nos nós foram majoradas em 30% em relação aos valores adotados inicialmente, para assim, simularmos um aumento da demanda não previsto no projeto original. Os dados da rede são mostrados nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2, enquanto os custos são apresentados na Tabela 4.3. Os diâmetros foram retirados dos trabalhos de Savic e Waters (1997) e Iglesias *et al.* (2004).

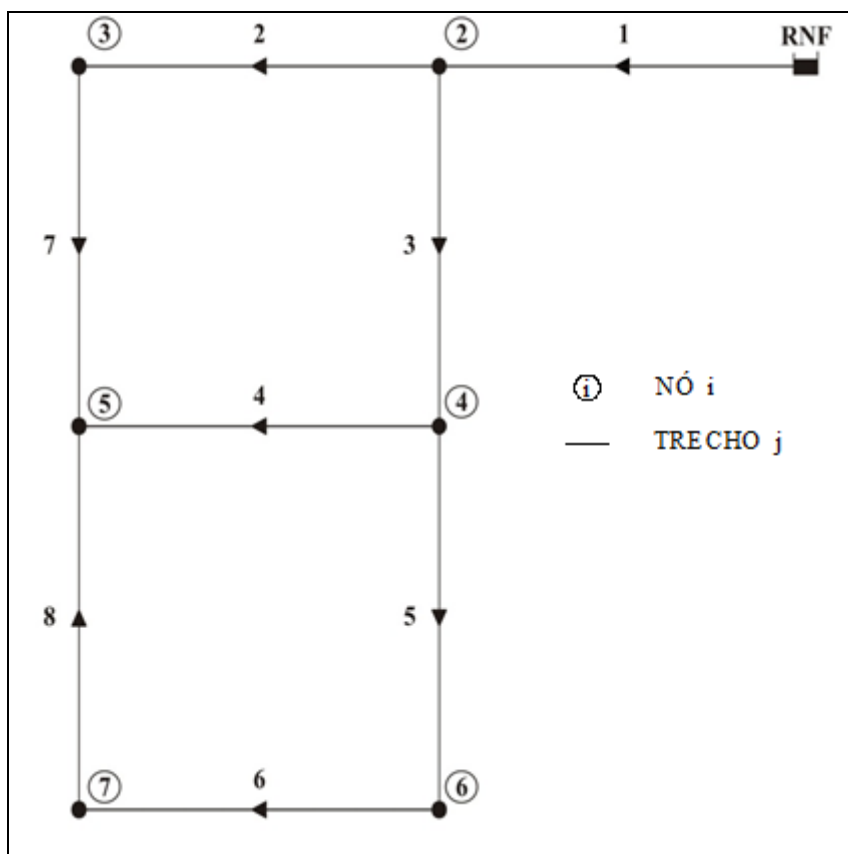


Figura 4.1 - Rede Exemplo 1

Tabela 4.1 - Dados dos nós da Rede Exemplo 1

ID Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Pressão (mca)
1	210	-	-
2	150	36,11	45,04
3	160	36,11	7,21
4	155	43,33	30,17
5	150	97,50	4,96
6	165	119,17	15,29
7	160	72,22	11,73

Tabela 4.2 - Dados dos trechos da Rede Exemplo 1

ID Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento Tubulações (m)	Coef. Rugosidade (H.W.)
1	457,2	1000	110
2	254,0	1000	110
3	406,4	1000	115
4	101,6	1000	125
5	406,4	1000	130
6	254,0	1000	125
7	254,0	1000	120
8	25,4	1000	120

Para aplicação do critério ambiental, adotaram-se valores fictícios para a idade das tubulações, considerando que quanto mais próximo o trecho do reservatório, maior a idade do tubo. Com base no volume de vazamentos e idade determinaram-se os valores (pesos) do critério ambiental (Tabela 3.1). Quanto menor o valor adotado, maior a possibilidade de o trecho sofrer intervenção.

Tabela 4.3 - Custo das intervenções (HALHAL *et al.*, 1997)

Diâmetro Interno	Custo (\$)/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	10,00	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
254,0	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
457,2	130,00	15,00	145,00	87,79
508,0	170,00	50,00	220,00	113,91
558,8	300,00	50,00	350,00	195,86
609,6	550,00	50,00	600,00	340,89

Para a 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 em 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 necessidade de abrir valas. Logo, as notas foram adotadas de modo a refletir que a opção “limpeza” causa transtornos menores que a “substituição” Tabela 4.4. Em uma aplicação real, essas notas são adotadas de acordo com a análise subjetiva do técnico responsável pelo projeto de reabilitação da rede.

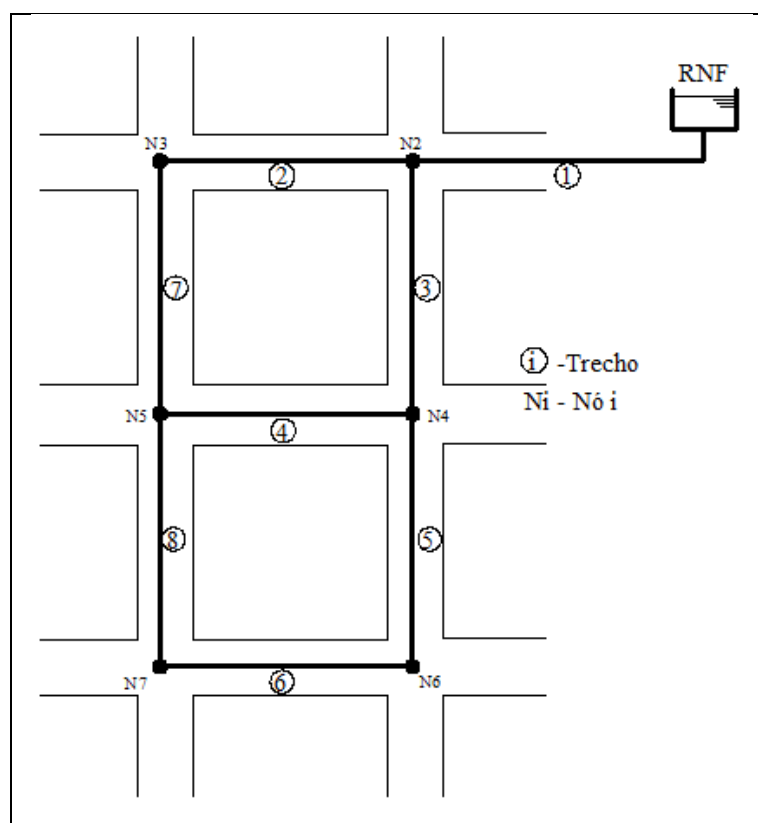


Figura 4.2 - Nomenclatura das ruas do Rede Exemplo 1

Tabela 4.4 - Valores padronizados para o critério social

	Rua				
	A	B	C	D	E
Trecho	1 e 2	3 e 5	6	4	7 e 8
Substituição	10	9	5	5	4
Limpeza	1*	3	4	4	3

\*O valor 1 (menor peso) indica a melhor ação a ser realizada para a via

A cada iteração, o sistema *Fuzzy* determina qual a melhor opção de intervenção com base em base em uma análise multiobjetiva, até que todas as condições impostas sejam atendidas. No caso caso particular da Rede Exemplo 1, o processo iterativo terminou na 12ª iteração, quando todos os nós todos os nós alcançaram pressão superior à pressão mínima de 30 mca (essa pressão mínima foi foi estabelecida com base no trabalho original). Os resultados obtidos são apresentados nas A configuração final da rede foi obtida realizando a substituição do 1º trecho pelo diâmetro imediatamente superior, como foi determinado pela 12ª iteração.

Tabela 4.17 e Tabela 4.18 e na Figura 4.3 (pressões e diâmetros resultantes da solução de reabilitação).

A evolução na configuração da rede, após cada intervenção realizada ao término de cada iteração, é mostrada nas tabelas 4.5 à Tabela 4.16.

Tabela 4.5 - Primeira iteração (Limpeza do Trecho 1)

1º ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	110	1,09	1,00	10,00	2,05
	Limpeza	457,2	1000	110	1,17	1,00	1,00	0,94
2	Substituição	254	1000	110	1,04	1,00	10,00	2,03
	Limpeza	254	1000	110	1,03	4,64	1,00	1,48
3	Substituição	406,4	1000	115	1,53	3,96	9,00	2,69
	Limpeza	406,4	1000	115	2,53	5,40	3,00	1,80
4	Substituição	101,6	1000	125	1,02	5,51	5,00	2,25
	Limpeza	101,6	1000	125	1,09	6,81	4,00	2,02
5	Substituição	406,4	1000	130	10,00	5,96	9,00	5,46
	Limpeza	406,4	1000	130	10,00	6,52	3,00	4,14
6	Substituição	254	1000	125	10,00	6,53	5,00	5,18
	Limpeza	254	1000	125	10,00	6,83	4,00	4,70
7	Substituição	254	1000	120	1,21	7,62	4,00	2,35
	Limpeza	254	1000	120	1,12	7,71	3,00	2,05
8	Substituição	25,4	1000	110	1,04	7,50	4,00	2,30
	Limpeza	25,4	1000	110	1,30	7,69	3,00	2,08

Tabela 4.6 - Segunda iteração (Limpeza do Trecho 2)

2° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	140	1,17	2,74	10,00	2,47
2	Substituição	254	1000	110	1,03	1,00	10,00	2,03
	Limpeza	254	1000	110	1,03	4,52	1,00	1,48
3	Substituição	406,4	1000	115	1,42	4,00	9,00	2,71
	Limpeza	406,4	1000	115	2,23	5,43	3,00	1,79
4	Substituição	101,6	1000	125	1,01	5,23	5,00	2,29
	Limpeza	101,6	1000	125	1,07	6,84	4,00	2,03
5	Substituição	406,4	1000	130	10,00	6,00	9,00	5,47
	Limpeza	406,4	1000	130	10,00	6,57	3,00	4,14
6	Substituição	254	1000	125	7,04	6,46	5,00	4,97
	Limpeza	254	1000	125	10,00	6,85	4,00	4,70
7	Substituição	254	1000	120	1,17	7,54	4,00	2,33
	Limpeza	254	1000	120	1,10	7,78	3,00	2,06
8	Substituição	25,4	1000	110	1,03	7,46	4,00	2,28
	Limpeza	25,4	1000	110	1,20	7,74	3,00	2,07

Tabela 4.7 - Terceira iteração (Limpeza do Trecho 3)

3° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	140	1,28	1,52	10,00	2,25
2	Substituição	254	1000	140	2,45	1,00	10,00	2,46
3	Substituição	406,4	1000	115	1,22	3,40	9,00	2,47
	Limpeza	406,4	1000	115	1,40	5,13	3,00	1,67
4	Substituição	101,6	1000	125	10,00	5,12	5,00	4,53
	Limpeza	101,6	1000	125	10,00	6,83	4,00	4,70
5	Substituição	406,4	1000	130	1,31	5,80	9,00	3,08
	Limpeza	406,4	1000	130	2,41	6,51	3,00	1,85
6	Substituição	254	1000	125	1,22	6,34	5,00	2,26
	Limpeza	254	1000	125	1,20	6,84	4,00	2,06
7	Substituição	254	1000	120	3,03	6,95	4,00	2,27
	Limpeza	254	1000	120	5,57	7,76	3,00	3,75
8	Substituição	25,4	1000	110	5,35	7,38	4,00	3,82

	Limpeza	25,4	1000	110	3,00	7,72	3,00	2,21
--	---------	------	------	-----	------	------	------	------

Tabela 4.8 - Quarta iteração (Substituição do Trecho 4)

4° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	140	1,05	1,00	10,00	2,04
2	Substituição	254	1000	140	1,09	1,00	10,00	2,05
3	Substituição	406,4	1000	140	1,29	4,37	9,00	2,82
4	Substituição	101,6	1000	125	3,08	3,30	5,00	1,77
	Limpeza	101,6	1000	125	1,03	6,81	4,00	2,01
5	Substituição	406,4	1000	130	10,00	5,40	9,00	5,28
	Limpeza	406,4	1000	130	10,00	6,41	3,00	4,13
6	Substituição	254	1000	125	4,65	6,03	5,00	4,00
	Limpeza	254	1000	125	6,74	6,83	4,00	4,30
7	Substituição	254	1000	120	1,09	6,68	4,00	1,95
	Limpeza	254	1000	120	1,08	7,78	3,00	2,06
8	Substituição	25,4	1000	110	1,02	7,13	4,00	2,16
	Limpeza	25,4	1000	110	1,18	7,72	3,00	2,06

Tabela 4.9 - Quinta iteração (Limpeza do Trecho 6)

5° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	140	1,51	1,05	10,00	2,19
2	Substituição	254	1000	140	2,76	1,00	10,00	2,51
3	Substituição	406,4	1000	140	1,32	4,48	9,00	2,84
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,53	1,00	3,53
5	Substituição	406,4	1000	130	1,42	5,84	9,00	3,11
	Limpeza	406,4	1000	130	3,60	6,58	3,00	2,13
6	Substituição	254	1000	125	1,21	6,32	5,00	2,26
	Limpeza	254	1000	125	1,36	6,90	4,00	2,12
7	Substituição	254	1000	120	3,38	6,90	4,00	2,33
	Limpeza	254	1000	120	5,47	7,90	3,00	3,76
8	Substituição	25,4	1000	110	8,91	7,42	4,00	4,87
	Limpeza	25,4	1000	110	4,64	7,81	3,00	3,38

Tabela 4.10 - Sexta iteração (Limpeza do Trecho 5)

6° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	140	1,34	1,09	10,00	2,14
2	Substituição	254	1000	140	2,21	1,00	10,00	2,40
3	Substituição	406,4	1000	140	1,21	4,59	9,00	2,86
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,58	1,00	3,53
5	Substituição	406,4	1000	130	1,28	5,98	9,00	3,09
	Limpeza	406,4	1000	130	2,68	6,73	3,00	1,88
6	Substituição	254	1000	140	1,25	6,41	5,00	2,26
7	Substituição	254	1000	120	2,67	7,03	4,00	2,29
	Limpeza	254	1000	120	8,61	8,02	3,00	4,7
8	Substituição	25,4	1000	110	6,18	7,52	4,00	4,15
	Limpeza	25,4	1000	110	3,38	7,96	3,00	2,33

Tabela 4.11 - Sétima iteração (Substituição do Trecho 1)

7° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	457,2	1000	140	1,28	1,28	10,00	2,13
2	Substituição	254	1000	140	2,04	1,00	10,00	2,35
3	Substituição	406,4	1000	140	1,18	4,70	9,00	2,88
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,64	1,00	3,53
5	Substituição	406,4	1000	140	1,31	6,40	9,00	3,12
6	Substituição	254	1000	140	1,21	6,47	5,00	2,26
7	Substituição	254	1000	120	2,45	7,22	4,00	2,37
	Limpeza	254	1000	120	7,41	8,14	3,00	4,42
8	Substituição	25,4	1000	110	5,36	7,70	4,00	3,94
	Limpeza	25,4	1000	110	3,01	8,10	3,00	2,29



Tabela 4.12 - Oitava iteração (Substituição do Trecho 1)

8° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	508	1000	140	1,91	5,51	1,00	1,73
2	Substituição	254	1000	140	2,07	1,00	10,00	2,36
3	Substituição	406,4	1000	140	1,18	4,83	9,00	2,90
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,61	1,00	3,53
5	Substituição	406,4	1000	140	1,32	6,47	9,00	3,13
6	Substituição	254	1000	140	1,22	6,42	5,00	2,26
7	Substituição	254	1000	120	2,50	7,11	4,00	2,32
	Limpeza	254	1000	120	7,59	8,16	3,00	4,50
8	Substituição	25,4	1000	110	5,49	7,68	4,00	3,98
	Limpeza	25,4	1000	110	3,06	8,12	3,00	2,30

Tabela 4.13 - Nona iteração (Substituição do Trecho 7)

9° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	558,8	1000	140	3,85	6,00	1,00	2,34
2	Substituição	254	1000	140	2,01	1,00	10,00	2,35
3	Substituição	406,4	1000	140	1,17	4,19	9,00	2,77
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,10	1,00	3,51
5	Substituição	406,4	1000	140	1,31	6,46	9,00	3,13
6	Substituição	254	1000	140	1,21	6,22	5,00	2,26
7	Substituição	254	1000	120	2,41	6,80	4,00	2,17
	Limpeza	254	1000	120	7,22	8,33	3,00	4,41
8	Substituição	25,4	1000	110	5,24	7,68	4,00	3,89
	Limpeza	25,4	1000	110	2,95	8,28	3,00	2,33

Tabela 4.14 - Décima iteração (Substituição do Trecho 8)

10° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	558,8	1000	140	6,77	6,01	1,00	3,10
2	Substituição	254	1000	140	2,52	1,00	10,00	2,47
3	Substituição	406,4	1000	140	1,37	4,37	9,00	2,82
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,10	1,00	3,51
5	Substituição	406,4	1000	140	1,63	6,62	9,00	3,24
6	Substituição	254	1000	140	1,43	6,30	5,00	2,29
7	Substituição	304,8	1000	140	4,61	6,82	1,00	2,89
8	Substituição	25,4	1000	110	2,44	7,00	4,00	2,27
	Limpeza	25,4	1000	110	4,98	8,35	3,00	3,74

Tabela 4.15 - Décima Primeira iteração (Substituição do Trecho 6)

11° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	558,8	1000	140	8,27	6,50	1,00	3,58
2	Substituição	254	1000	140	2,44	1,00	10,00	2,45
3	Substituição	406,4	1000	140	1,48	4,67	9,00	2,89
4	Substituição	152,4	1000	140	10,00	5,25	1,00	3,52
5	Substituição	406,4	1000	140	1,85	7,10	9,00	3,47
6	Substituição	254	1000	140	1,57	6,50	5,00	2,31
7	Substituição	304,8	1000	140	4,00	7,44	1,00	2,89
8	Substituição	50,8	1000	140	2,35	8,27	1,00	2,32

Tabela 4.16 - Décima Segunda iteração (Substituição do Trecho 1)

12° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	558,8	1000	140	2,93	6,52	1,00	1,89
2	Substituição	254	1000	140	1,45	1,00	10,00	2,17
3	Substituição	406,4	1000	140	1,15	4,54	9,00	2,85
4	Substituição	152,4	1000	140	7,71	5,45	1,00	3,36
5	Substituição	406,4	1000	140	1,21	7,02	9,00	3,25
6	Substituição	304,8	1000	140	10,00	7,34	1,00	3,90
7	Substituição	304,8	1000	140	2,20	7,50	1,00	2,11
8	Substituição	50,8	1000	140	3,87	8,16	1,00	2,91

A configuração final da rede foi obtida realizando a substituição do 1° trecho pelo diâmetro imediatamente superior, como foi determinado pela 12° iteração.

Tabela 4.17 - Solução - Configuração final dos trechos da Rede Exemplo 1

ID Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Coeficiente H.W
1	609,6	1000	140
2	254,0	1000	140
3	406,4	1000	140
4	152,4	1000	140
5	406,4	1000	140
6	304,8	1000	140
7	304,8	1000	140
8	50,8	1000	140

Tabela 4.18 - Resultado final da reabilitação da Rede Exemplo 1

ID Nó	Cota (m)	Demanda (l/s)	Pressões (mca)
2	150	36,11	57,64
3	160	36,11	32,75
4	155	43,33	45,21
5	150	97,50	39,83
6	165	119,17	30,93
7	160	72,22	33,04

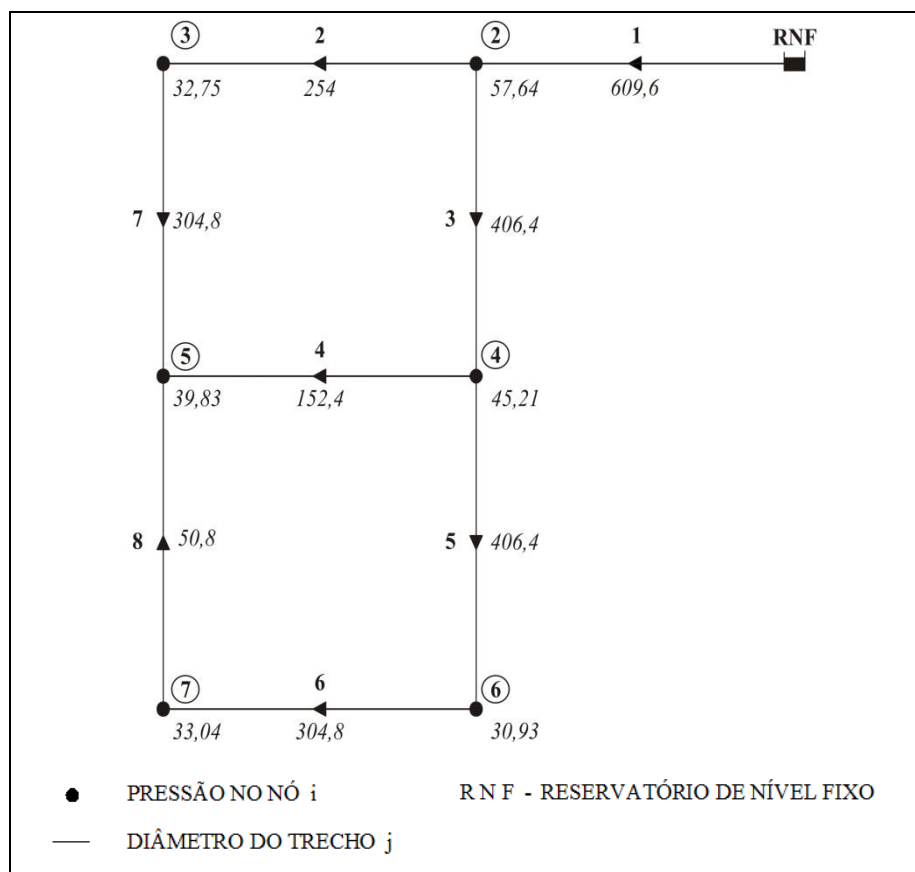


Figura 4.3 - Simulação final no EPANET - Pressões nos nós e diâmetro dos trechos

## 4.2 REDE EXEMPLO 2

A Rede Exemplo 2 foi proposta inicialmente por Gessler (1985), trata-se de uma rede de distribuição que possui dimensões maiores que a Rede Exemplo 1, e difere, também, quanto às opções de reabilitação apresentadas. A rede possui dois reservatórios que abastecem dez nós consumidores, esses nós são interligados por 14 trechos (tubulações), sendo que alguns desses trechos apresentam suas tubulações duplicadas. Quanto às opções de reabilitação, além de substituição e limpeza, foi considerada a implantação de trechos novos (expansão da rede) e duplicação de algumas tubulações. A Figura 4.4 apresenta o esquema da Rede Exemplo 2

Para execução do trabalho e facilitar a identificação dos trechos, foram adotados ruas por onde passam as tubulações. Note que os trechos das ruas A, C e D1 apresentam suas tubulações duplicadas e os trechos das ruas E2, F e H2 (trecho tracejado) são os trechos da rede que foram ampliadas. A identificação fictícia das ruas está mostrada na Figura 4.4 e os parâmetros dos nós e dos trechos são mostrados nas Tabela 4.19 e Tabela Tabela 4.20.

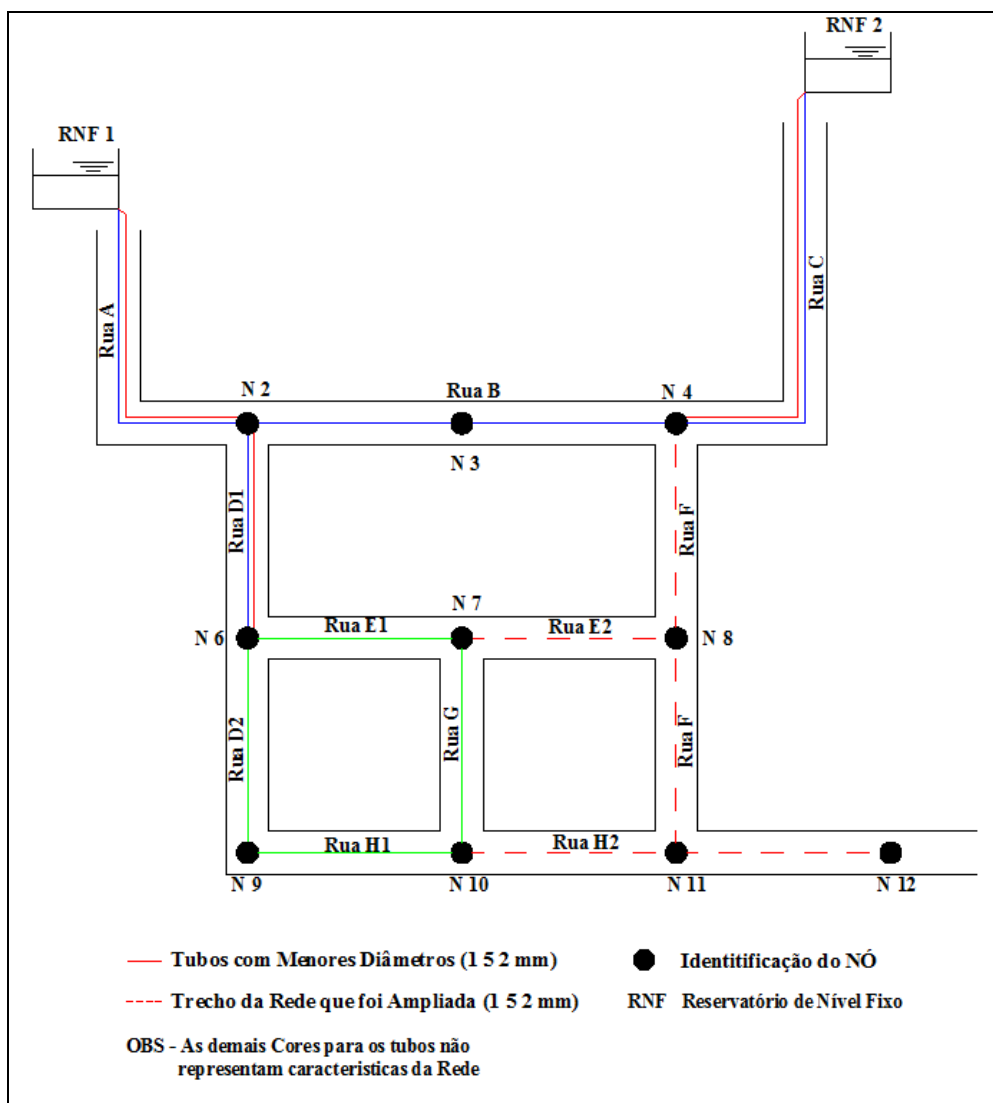


Figura 4.4 - Rede Exemplo 2 (modificada de GESSLER, 1985)

Tabela 4.19 - Dados dos nós da Rede Exemplo 2

ID Nó	Cota (m)	Consumo (L/s)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (m)
RNF 1	365,76	-	365,76	0,00
RNF 2	371,86	-	371,86	0,00
2	320,04	12,62	338,98	18,94
3	326,14	12,62	339,04	12,90
4	332,23	0	340,77	8,54
6	298,7	18,93	314,55	15,85
7	295,66	18,93	301,40	5,74
8	292,61	18,93	300,54	7,93

9	289,56	12,62	305,28	15,72
10	289,56	18,93	296,74	7,18
11	292,61	18,93	287,80	-4,81
12	289,56	12,62	280,68	-8,88

Tabela 4.20 - Dados dos trechos da Rede Exemplo 2

ID Trecho	ID Rua	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Coefficiente H.W
1	A	356	4828	75
1-a	A	152	4828	120
2	B	254	1609	80
3	B	254	1609	80
4	C	254	6437	80
4-a	C	152	6437	120
5	D	254	1609	80
5-a	D	152	1609	120
6	F	152	1609	120
7	E	203	1609	100
8	E	152	1609	120
9	D	254	1609	80
10	G	152	1609	100
11	F	152	1609	120
12	H	203	1609	100
13	H	152	1609	120
14	H	152	1609	120

Os custos envolvidos nas intervenções de limpeza, substituição e implantação de um trecho novo dos tubos foram retirados do próprio trabalho de Gessler (1985) e são mostrados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Custos das intervenções - Rede Exemplo 2

<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Custo (U\$/m)</b>		
	<b>Material do Tubo</b>	<b>Custo da Subst.</b>	<b>Limpeza</b>
152,0	PVC	49,54	47,57
203,0	PVC	63,32	51,51
254,0	PVC	94,82	55,12
305,0	PVC	132,87	58,07
356,0	FOFO	170,93	60,70
407,0	FOFO	194,88	63,00
458,0	FOFO	232,94	-
509,0	FOFO	264,10	-

Para aplicação do critério ambiental, adotaram-se valores fictícios para a idade das tubulações. A partir do cálculo dos vazamentos feitos em cada interação (conjunto de todas as intervenções realizadas na rede, naquela interação), foram obtidos pesos para cada um desses vazamentos. Com base no peso obtido para o volume de vazamentos em cada intervenção e da idade, determinaram-se os valores (pesos) do critério de impacto ambiental Tabela 3.1. Quanto menor o valor adotado, maior a possibilidade de o trecho sofrer intervenção.

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 (Tabela 4.23). Devido ao impacto social ser uma análise subjetiva, os pesos são adotados com base na experiência de quem analisa e não baseados na literatura. Vale salientar que os menores valores de peso correspondem às ações que deverão ser realizadas preferencialmente.

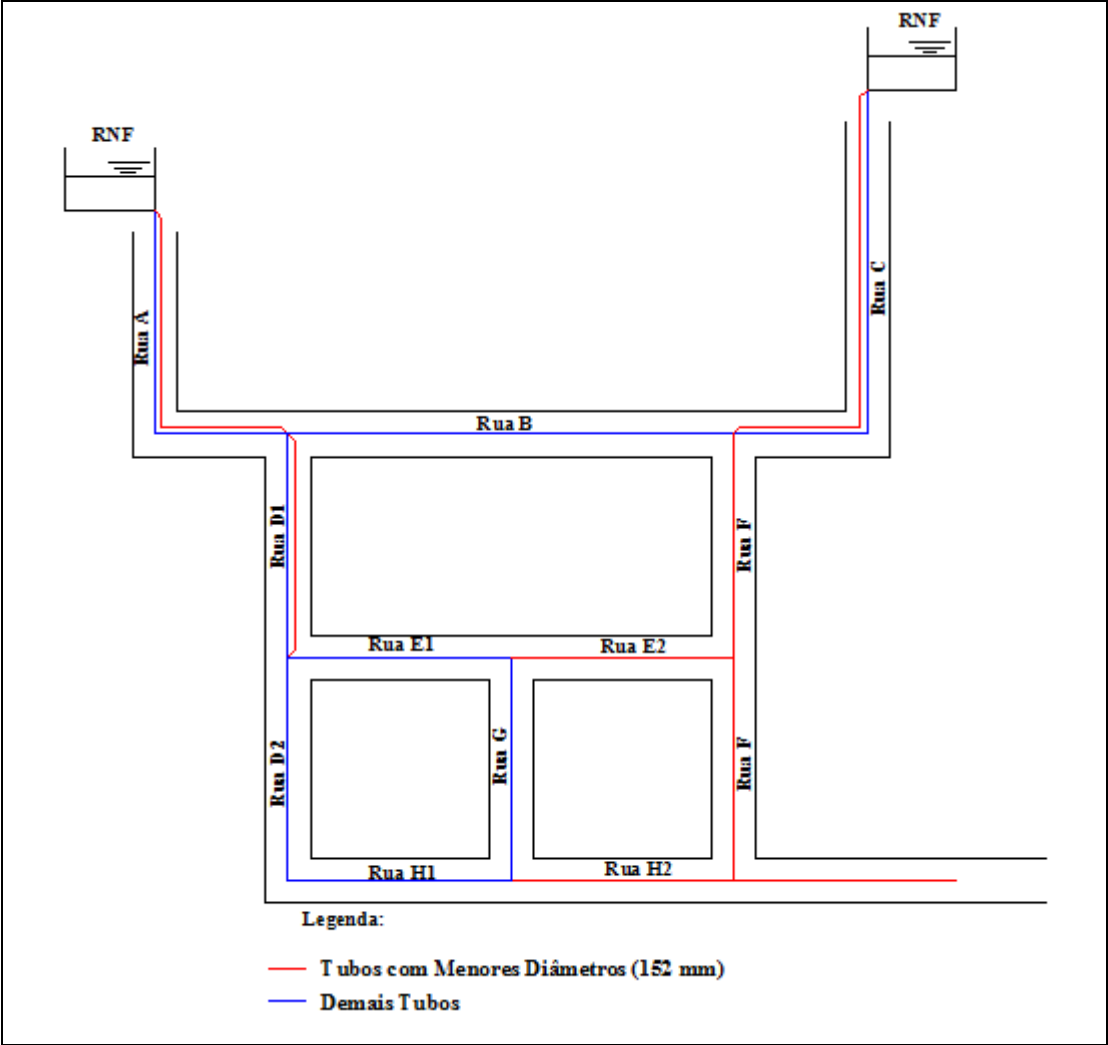


Figura 4.5 - Nomenclatura das ruas do Rede Exemplo 2

Tabela 4.22 - Valores padronizados para o critério ambiental

		Idade (anos)		
		5	10	15
Vazamento	0	10,00	10,00	9,00
	2	9,00	9,00	8,00
	4	8,00	7,00	7,00
	6	6,00	6,00	5,00
	8	5,00	4,00	3,00
	10	2,00	1,00	1,00



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. Devido ao impacto social ser uma análise subjetiva, os pesos são adotados com base na experiência de quem analisa e não baseados na literatura. Vale salientar que os menores valores de peso correspondem às ações que deverão ser realizadas preferencialmente.

Tabela 4.23 - Valores padronizados para o critério social

Rua		A	B	C	D1	D2	E1	E2	F	G	H1	H2
Opção	Substituição	2	4	3	4	3	3	2	4	5	4	3
	Limpeza	8	6	7	6	7	7	8	6	4	6	7

Os impactos econômicos (custos) das intervenções ou modificações nas tubulações da rede foram considerados por meio do gradiente de custo (Eq. 3.2), assim como descreve a metodologia.

O estado inicial da rede é mostrado na Figura 4.6, onde podemos observar a configuração da rede (seus diâmetros iniciais) e as pressões nos nós. A pressão mínima, que neste exemplo é de 30 mca, é o critério de parada do processo iterativo.

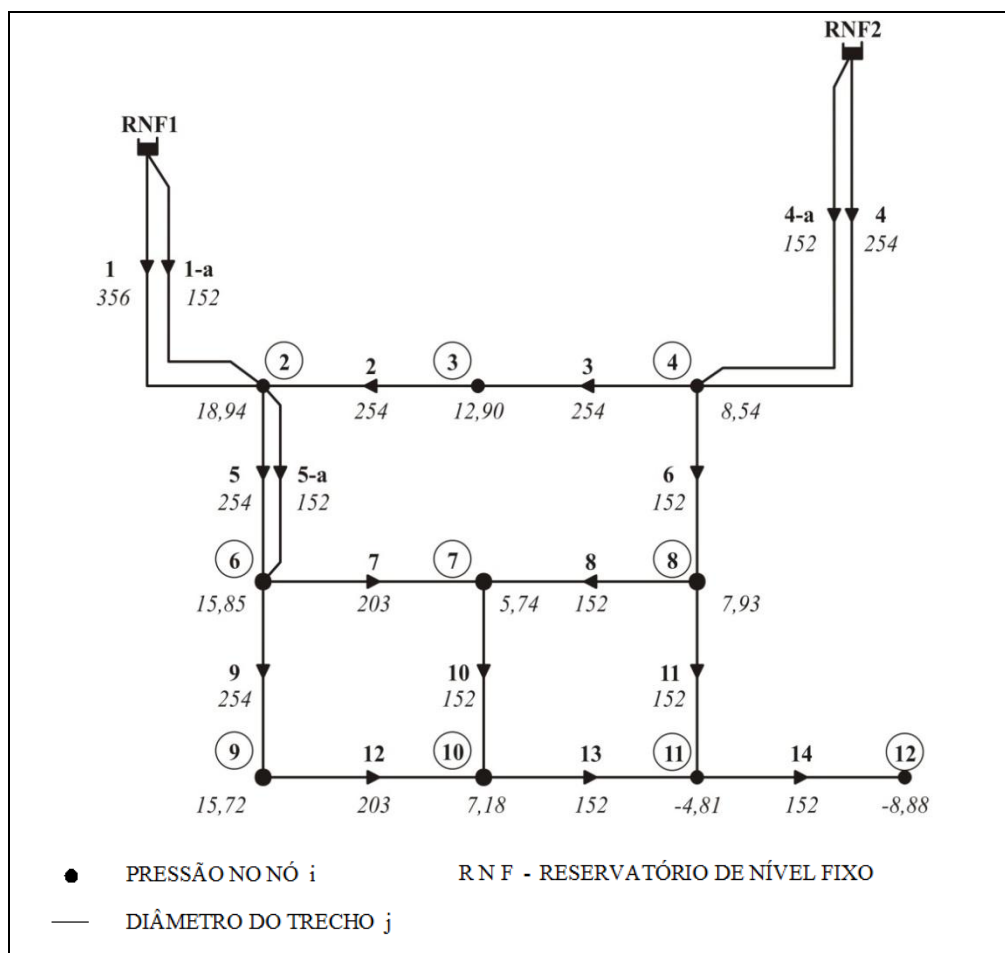


Figura 4.6 - Estado inicial da Rede Exemplo 2

### Sistema *Fuzzy*

Para resolução da Rede Exemplo 2, adotou-se o mesmo Sistema Fuzzy implementado para a Rede Exemplo 1. Do mesmo modo da Rede Exemplo 1, a cada iteração, o sistema *Fuzzy* determina qual a melhor opção de intervenção com base em uma análise multiobjetiva, até que todas as condições impostas forem atendidas. No caso particular da Rede Exemplo 2, o processo iterativo terminou na 5ª iteração, quando todos os nós alcançaram pressão superior à pressão mínima 30 mca (essa pressão mínima foi estabelecida com base no trabalho original). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 4.29 e Tabela 4.30. A Figura 4.7 apresenta as pressões e diâmetros resultantes da solução de reabilitação.

A evolução na configuração da rede, após cada intervenção realizada ao término de cada iteração, é mostrada nas tabelas 4.24 à Tabela 4.28.

Tabela 4.24 - Primeira iteração (Substituição do Trecho 1)

1º ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	356	4828	75	1,314	1,000	2	0,995
	Limpeza	356	4828	75	2,180	1,084	8	2,26
1-a	Substituição	152	4828	120	1,623	5,690	2	1,74
2	Substituição	254	1609	80	10,000	6,580	4	4,61
	Limpeza	254	1609	80	10,000	6,660	6	5,57
3	Substituição	254	1609	80	10,000	6,600	4	4,61
	Limpeza	254	1609	80	10,000	6,650	6	5,57
4	Substituição	254	6437	80	2,078	1,230	3	1,04
	Limpeza	254	6437	80	4,251	4,320	7	3,54
4-a	Substituição	152	6437	120	1,898	5,778	3	3,01
5	Substituição	254	1609	80	1,213	2,180	4	1,35
	Limpeza	254	1609	80	1,533	4,390	6	2,14
5-a	Substituição	152	1609	120	1,144	5,726	4	1,94
6	Substituição	152	1609	120	1,069	5,286	4	1,93
7	Substituição	203	1609	100	1,558	6,600	3	1,79
	Limpeza	203	1609	100	3,831	6,770	7	3,95
8	Substituição	152	1609	120	8,358	7,650	2	4,21
9	Substituição	254	1609	80	1,921	6,550	3	1,83
	Limpeza	254	1609	80	3,124	6,700	7	3,19
10	Substituição	152	1609	100	2,272	6,800	5	2,49
	Limpeza	152	1609	100	10,000	6,825	4	4,70
11	Substituição	152	1609	120	1,165	7,550	4	2,46
12	Substituição	203	1609	100	1,820	6,750	4	2,13
	Limpeza	203	1609	100	5,011	6,820	6	4,52
13	Substituição	152	1609	120	1,231	7,680	3	2,06
14	Substituição	152	1609	120	1,191	7,660	3	2,05

Tabela 4.25 - Segunda iteração (Substituição do Trecho 6)

2º ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	407	4828	120	3,65	3,15	1	1,40
1-a	Substituição	152	4828	120	4,12	6,60	1	2,56
2	Substituição	254	1609	80	10,00	6,38	4	4,52
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,07	6	5,66
3	Substituição	254	1609	80	10,00	6,76	4	4,68
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,13	6	5,68
4	Substituição	254	6437	80	4,17	1,24	3	1,83
	Limpeza	254	6437	80	10,00	4,73	7	4,99
4-a	Substituição	152	6437	120	3,96	6,00	3	2,42
5	Substituição	254	1609	80	1,21	1,00	4	1,34
	Limpeza	254	1609	80	1,52	1,00	6	1,61
5-a	Substituição	152	1609	120	1,14	2,00	4	1,35
6	Substituição	152	1609	120	1,08	2,00	4	1,34
7	Substituição	203	1609	100	1,54	5,85	3	1,77
	Limpeza	203	1609	100	3,75	6,77	7	3,86
8	Substituição	152	1609	120	6,42	7,85	2	3,72
9	Substituição	254	1609	80	1,91	5,37	3	1,77
	Limpeza	254	1609	80	3,10	6,47	7	3,16
10	Substituição	152	1609	100	2,28	6,70	5	2,44
	Limpeza	152	1609	100	10,00	7,21	4	4,81
11	Substituição	152	1609	120	1,16	7,05	4	2,15
12	Substituição	203	1609	100	1,80	6,42	4	2,08
	Limpeza	203	1609	100	4,92	6,24	6	4,47
13	Substituição	152	1609	120	1,22	7,62	3	2,05
14	Substituição	152	1609	120	1,19	8,04	3	2,15

Tabela 4.26 - Terceira iteração (Substituição do Trecho 4)

3º ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	407	4828	120	4,63	4,660	1	2,680
1-a	Substituição	152	4828	120	5,23	6,780	1	3,040
2	Substituição	254	1609	80	2,53	5,76	4	2,100
	Limpeza	254	1609	80	4,67	6,62	6	4,330
3	Substituição	254	1609	80	9,36	6,70	4	4,830
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,02	6	5,650
4	Substituição	254	6437	80	2,89	1,00	3	1,05
	Limpeza	254	6437	80	5,80	4,40	7	4,190
4-a	Substituição	152	6437	120	2,32	5,82	3	1,820
5	Substituição	254	1609	80	2,69	1,00	4	1,330
	Limpeza	254	1609	80	5,38	2,20	6	3,250
5-a	Substituição	152	1609	120	2,18	3,24	4	1,470
6	Substituição	203	1609	120	10,00	4,76	1	3,480
7	Substituição	203	1609	100	5,20	6,70	3	3,180
	Limpeza	203	1609	100	10,00	6,93	7	5,870
8	Substituição	152	1609	120	10,00	7,24	2	4,130
9	Substituição	254	1609	80	10,00	5,70	3	3,930
	Limpeza	254	1609	80	10,00	6,63	7	5,790
10	Substituição	152	1609	100	10,00	6,50	5	5,160
	Limpeza	152	1609	100	10,00	7,00	4	4,750
11	Substituição	152	1609	120	10,00	6,21	4	4,450
12	Substituição	203	1609	100	10,00	6,46	4	4,560
	Limpeza	203	1609	100	10,00	6,99	6	5,650
13	Substituição	152	1609	120	7,05	7,32	3	4,030
14	Substituição	152	1609	120	10,00	7,65	3	4,500

Tabela 4.27 - Quarta iteração (Substituição do Trecho 5)

4º ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	407	4828	120	5,71	5,42	1	2,960
1-a	Substituição	152	4828	120	6,62	7,23	1	3,320
2	Substituição	254	1609	80	10,00	6,46	4	4,560
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,11	6	5,670
3	Substituição	254	1609	80	10,00	6,76	4	4,680
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,15	6	5,680
4	Substituição	305	6437	120	6,24	5,31	1	2,950
4-a	Substituição	152	6437	120	5,52	6,74	1	3,070
5	Substituição	254	1609	80	2,48	1,00	4	1,33
	Limpeza	254	1609	80	3,57	1,57	6	2,180
5-a	Substituição	152	1609	120	1,66	2,10	4	1,410
6	Substituição	203	1609	120	6,74	2,00	1	2,470
7	Substituição	203	1609	100	2,93	6,72	3	1,890
	Limpeza	203	1609	100	10,00	7,03	7	5,890
8	Substituição	152	1609	120	10,00	6,95	2	4,030
9	Substituição	254	1609	80	3,17	5,55	3	1,830
	Limpeza	254	1609	80	4,24	6,64	7	4,250
10	Substituição	152	1609	100	1,87	6,37	5	2,360
	Limpeza	152	1609	100	9,67	7,12	4	4,790
11	Substituição	152	1609	120	2,05	5,77	4	2,070
12	Substituição	203	1609	100	2,82	6,36	4	2,110
	Limpeza	203	1609	100	7,11	7,13	6	5,450
13	Substituição	152	1609	120	1,80	7,21	3	2,040
14	Substituição	152	1609	120	1,85	7,58	3	2,150

Tabela 4.28 - Quinta iteração (Substituição do Trecho 4)

5° ITERAÇÃO								
Trecho	Ação	Diâmetro	Comprimento	Coeficiente H.W	PESOS (Critérios)			
					Econômico	Ambiental	Social	Peso Total
1	Substituição	407	4828	120	6,73	3,64	1	2,640
1-a	Substituição	152	4828	120	9,83	6,75	1	3,680
2	Substituição	254	1609	80	10,00	6,29	4	4,490
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,15	6	5,680
3	Substituição	254	1609	80	10,00	6,66	4	4,640
	Limpeza	254	1609	80	10,00	7,19	6	5,690
4	Substituição	305	6437	120	4,35	4,25	1	2,40
4-a	Substituição	152	6437	120	4,00	6,28	1	2,480
5	Substituição	305	1609	120	10,00	10,00	1	4,990
5-a	Substituição	152	1609	120	10,00	5,74	4	4,290
6	Substituição	203	1609	120	10,00	3,09	1	3,080
7	Substituição	203	1609	100	4,92	5,72	3	3,030
	Limpeza	203	1609	100	10,00	6,80	7	5,850
8	Substituição	152	1609	120	10,00	6,47	2	3,900
9	Substituição	254	1609	80	10,00	4,10	3	3,490
	Limpeza	254	1609	80	10,00	6,25	7	5,660
10	Substituição	152	1609	100	10,00	5,95	5	4,910
	Limpeza	152	1609	100	10,00	7,16	4	4,800
11	Substituição	152	1609	120	10,00	5,40	4	4,190
12	Substituição	203	1609	100	10,00	5,26	4	4,160
	Limpeza	203	1609	100	10,00	7,00	6	5,650
13	Substituição	152	1609	120	10,00	6,18	3	4,070
14	Substituição	152	1609	120	10,00	7,04	3	4,290

A cada iteração, o sistema *fuzzy* determina qual a melhor opção de intervenção com base em uma análise multiobjetiva, até que todas as condições impostas fossem atendidas. No caso particular da Rede Exemplo 2, o processo iterativo terminou na 5ª iteração, quando todos os nós alcançaram pressão superior à pressão mínima (30 mca). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 4.29 e Tabela Tabela 4.30. A Figura 4.7 apresenta as pressões e diâmetros resultantes da solução de reabilitação.

Tabela 4.29 - Parâmetros finais dos nós

ID Nós	Cota (m)	Consumo (l/s)	Pressão (m)
RNF 1	365,76	-82,13	0
RNF 2	371,86	-63,00	0
2	320,04	12,62	40,77
3	326,14	12,62	35,24
4	332,23	0,00	32,29
6	298,70	18,93	56,84
7	295,66	18,93	51,61
8	292,61	18,93	55,70
9	289,56	12,62	58,04
10	289,56	18,93	51,31
11	292,61	18,93	40,93
12	289,56	12,62	36,86

Tabela 4.30 - Diâmetros finais dos trechos

ID Trecho	ID Rua	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Coefficiente H.W
1	A	407	4828	120
1-a	A	152	4828	120
2	B	254	1609	80
3	B	254	1609	80
4	C	356	6437	120
4-a	C	152	6437	120
5	D	305	1609	120
5-a	D	152	1609	120
6	F	203	1609	120
7	E	203	1609	100
8	E	152	1609	120
9	D	254	1609	80
10	G	152	1609	100
11	F	152	1609	120
12	H	203	1609	100
13	H	152	1609	120
14	H	152	1609	120



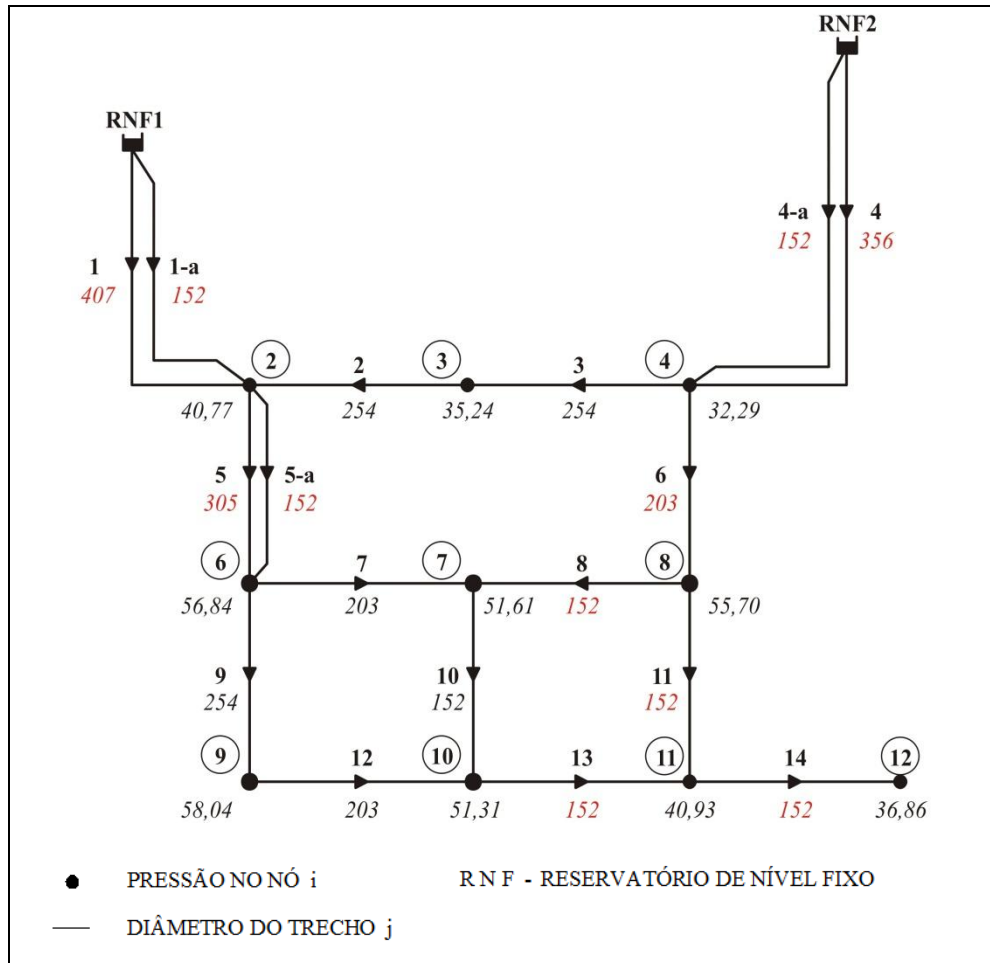


Figura 4.7 - Solução Final - Estado final da Rede Exemplo 2

## 5 CONCLUSÃO

Um sistema de apoio à decisão para análise da reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento considerando objetivos múltiplos foi desenvolvido neste trabalho. Esse modelo foi concebido em três fases distintas. A primeira fase (etapa preliminar) da metodologia proposta compreende o levantamento de dados (cadastro da rede, demandas nodais, registros de manutenção e operação, observações de campo e dados das fontes de abastecimento) e a calibração do modelo da rede hidráulica. A etapa seguinte representou o processo de tomada de decisão (otimização) propriamente dito, que foi baseado na Lógica Fuzzy. A terceira etapa representa a resposta final do modelo (etapa de decisão), ou seja, o planejamento otimizado da reabilitação do sistema de abastecimento de água (soluções alternativas). Minimização de custos, vazamentos e impactos sociais são os critérios que o sistema de apoio à decisão considera, simultaneamente, para gerar o planejamento. Tais planos refletem a relação de compromisso entre a satisfação da sociedade (minimização dos impactos sociais), a proteção ao meio ambiente (minimização de vazamentos) e as metas econômicas (minimização de custo). Análises de sensibilidades foram desenvolvidas com intuito de identificar o valor ideal para os pesos dos critérios aqui analisados.

A análise de reabilitação de redes de distribuição de água considera algumas hipóteses, para efeito de simplificação, no processo de planejamento. Tais hipóteses referem-se ao estado da rede (estado dos trechos, reabilitados ou não reabilitados), que permanece inalterável durante o período de análise, aos investimentos financeiros disponíveis, que devem ser empregados no primeiro ano do projeto e as avaliações dos critérios (custo, benefício, vazamentos e confiabilidade). As vantagens que podem ser apontadas da análise multiobjetivo estão relacionadas à simplicidade do procedimento de cálculo para obtenção de ações de reabilitação de curto prazo (implementadas no primeiro período).

Esta pesquisa apresentou um método multiobjetivo de reabilitação de sistemas de distribuição de água que considerou na tomada de decisão as propriedades físicas, o prognóstico evolutivo do comportamento dinâmico da rede e a satisfação da sociedade, em substituição às análises do tipo custo/benefício convencionais, dando subsídio aos dirigentes das companhias para adotarem alternativas econômicas que proporcionem menores impactos para a sociedade e para o meio ambiente. Apesar do desenvolvimento tecnológico dos últimos anos, as empresas de saneamento ainda necessitam de ferramentas computacionais apropriadas e efetivas que possam ser aplicadas nos problemas de operação e manutenção de

seus sistemas. Espera-se que o produto final possa ser aplicado na solução de problemas normalmente encontrados. Posteriormente, o sistema desenvolvido será implementado no código fonte do programa computacional EPANET 2.00.12 e será aplicado no sistema de distribuição de água de Maceió.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALPEROVITS, E. & SHAMIR, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research* 13(6): 885-900.

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

BEZERRA, S. T. M. 2009. 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.

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

BISCOS, C., MULHOLLAND, M., LE LANN, M. V., BUCKLEY, C. A. & BROUCKAERT, C. J. 2003. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. *Water SA* 29(4): 393-404.

BUBTIENA, A. M., EL SHAFEI, A. H. & JAFAR, O. 2012. Review of rehabilitation strategies for water distribution pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology* 61(1): 23-31.

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

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.

FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R. AZEVEDO, J. M. M.; EIJI, A. I. Manual de Hidráulica. São Paulo: Ed. EDGARD BLUCHER. 8ª Ed., 1998.

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

- GIL, C., BAÑOS, R., ORTEGA, J., MÁRQUEZ, A. L., FERNÁNDEZ, A., MONTOYA, M. G., CABESTANY, J., ROJAS, I. & JOYA, G. 2011. Ant colony optimization for water distribution network design: a comparative study. *Lecture Notes in Computer Science* 6692: 300-307.
- GIUSTOLISI, O. & BERARDI, L. 2011. Water distribution network calibration using enhanced GGA and topological analysis. *Journal of hydroinformatics* 13(4): 621-641.
- GOMES, H. P., BEZERRA, S. T. M., 2007, 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.
- GOMES H. P., BEZERRA S. T. M. & SRINIVASAN V. S. 2008. An iterative optimisation procedure for the rehabilitation of water supply pipe networks. *Water SA* 34(2): 225-236.
- GOMES H. P., BEZERRA S. T. M., CARVALHO, P. S. O. & SALVINO, M. M. 2009. Optimal dimensioning model of water distribution systems. *Water SA* 35(4): 421-432.
- IGLESIAS, P. L., SOLANO, F. J. M., MIQUEL, V. S. F., GARCÍA, R. P. 2004. Genetic algoritmos modificado para diseño de redes de abastecimiento de agua. Proc. Seminary Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. UFPB, João Pessoa.
- LANSEY, K. & BASNET, C. 1991. Parameter estimation for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management* 117(1): 126-144.
- PEARSON, J. M.; SHIM, J.P. 1994. An empirical investigation into decision support systems capabilities: A proposed taxonomy. *Information e Management* 27.
- PORTO, R. M. Hidráulica Básica. São Carlos: EESC/USP, 1998.
- SAVIC, D. A. & WALTERS, G. 1997. A genetic algorithms for least-cost design of water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning e Management* 125(2): 67-77.
- SEDKI, A. & OUAZAR, D. 2012. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems. *Advanced Engineering Informatics* 26(3): 582-591
- SILVESTRE, P. Hidráulica Geral. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 1973.

- SOUZA, L.; MATSURA, E.E. & MIRANDA, J. H. Teoria de conjuntos *fuzzy* aplicada al estudio de la dinámica del agua y de los solutos en el suelo. In: Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo, 2005, Coruna. Estudios en La Zona no Saturada del Suelo, vol. VII, 2005.
- SURIBABU, C. R. & NEELAKANTAN, T. R. 2006. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. *Urban Water Journal* 3(2): 111-120.
- TABESH, M. & SABER, H. A. 2012. Prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using GIS. *Water Resources Management* 26(1): 225-241.
- TUCCIARELLI, T., CRIMINISI, A. & TERMINI, D. 1999. Leak Analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(3): 277-285.
- TUKEY, J. 1977. *Exploratory data analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- VENTURINI, M.A.G. & BARBOSA, P.S.F. Subsídios à escolha de técnicas de reabilitação de redes de distribuição de água. In: SEREA - Seminário Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água: O Estado da Arte e Questões Avançadas. Anais... João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2002.
- WALSKI, T. M. 1986. Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. *Journal of Water Resources Planning and Management* 112(2): 238-249.
- WALSKI, T.M. 1986. Making Water System Rehabilitation Decisions. Water Forum '86', ASCE, New York, N.Y., pp. 467-474.
- WALTERS, G.A.; HALHAL, D.; SAVIC, D.A. & OUAZAR, D. (1999). Improved Design of Anytown Distribution Network using Structured Messy Genetic Algorithms. *Urban Water*, v. 1, p. 23-38.
- ZADEH, L. A. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8 (3): 338-353.
- ZHONG, S. & QU, X. 2012. Calibration of Hydraulic Model in Real-Life Water Distribution System. *Applied Mechanics and Materials* 155-156: 285-290.