

I-130 - ABORDAGEM MULTI OBJETIVA PARA A REABILITAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Saulo de Tarso Marques Bezerra⁽¹⁾

Professor do Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco. Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba, mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande e doutor em Engenharia Mecânica, ênfase em Automação, pela UFPB. Atualmente é coordenador do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos - LAHER e vice-coordenador do Núcleo de Tecnologia.

Raomax Charles Moreira Matias

Ex-bolsista de IC do CNPq e graduando em Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco.

Heber Pimentel Gomes

Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPB. Coordenador do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica - LENHS da UFPB. Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba, mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande e doutor em Ingeniería Civil pela Universidad Politécnica de Madrid.

Flávia Lima Cordeiro de Moura

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Mestranda em Engenharia Urbana e Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba.

Júlia Lessa Feitosa Virgolino

Ex-bolsista de IC do CNPq e graduanda em Engenharia Civil na Universidade Federal da Paraíba.

Endereço⁽¹⁾: Rua Antônio Apolônio de Oliveira, 200 - Universitário - Caruaru - Pernambuco - CEP 55016-555 - Brasil - Tel: +55 (81) 2126-7772 - e-mail: s.bezerra@yahoo.com.br.

RESUMO

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 *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: Lógica fuzzy, redes hidráulicas, sistema de suporte à decisão.

INTRODUÇÃO

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 melhoria do desempenho de um sistema pode ser obtida através da substituição, limpeza, duplicação e reparação de tubulações, ou renovação de instalações existentes da rede (bombas, reservatórios etc.). A importância da reabilitação está intimamente ligada à diminuição do custo operacional e ao aumento da confiabilidade dos serviços prestados. Pode-se definir reabilitação como qualquer intervenção no sistema que prolongue sua vida útil, melhorando seu desempenho hidráulico, estrutural e da qualidade da água.

A alternativa ideal para os sistemas que possuem problemas é a reabilitação de todos os componentes 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 plenamente os seus sistemas. Neste caso, o processo de tomada de decisão para a reabilitação de sistemas urbanos de abastecimento de água constitui uma importante área de interesse. Estudos são imprescindíveis para hierarquizar as medidas mais urgentes e eficazes a serem tomadas. 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, o que, mesmo para o padrão americano, representa um alto custo.

O processo de tomada de decisão de reabilitação da maioria das redes hidráulicas implantadas no mundo se baseia na experiência dos projetistas (método de tentativa e erro). Este tipo de metodologia visa o balanceamento hidráulico do sistema, desconsiderando a busca de uma solução que minimize o impacto global da decisão para a sociedade. No entanto, esse é um problema complexo, devido, principalmente, à necessidade de se prover soluções que considerem na tomada de decisão as propriedades físicas do sistema, o prognóstico evolutivo do comportamento dinâmico da rede e a satisfação da sociedade, além da análise do tipo custo/benefício convencional.

Nas últimas décadas, os diversos modelos matemáticos convieram 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, mas, atualmente, a comunidade científica aponta desvantagens características dos métodos “tradicionais” de otimização, as quais estão relacionadas à necessidade de enquadrar objetivos reais e múltiplos nos modelos. Logo, a abordagem multiobjetiva apresenta-se como a melhor opção para analisar a reabilitação de redes urbanas de abastecimento de água.

OBJETIVO GERAL

Objetiva-se, com esta pesquisa, o desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão *fuzzy* que busque uma solução mais abrangente para a reabilitação de sistemas urbanos de distribuição de água, que considere além dos custos das intervenções físicas, a minimização do volume de água perdido por vazamentos e a redução dos impactos negativos à sociedade. As principais motivações para o desenvolvimento deste modelo multiobjetivo são: a definição explícita de objetivos múltiplos ao invés de tratar o problema como objetivo único, a geração de várias alternativas/soluções contendo todas as informações (custos, benefícios, vazamentos etc.) e a inclusão de variáveis reais consideradas no dia-a-dia dos gestores, como por exemplo, o impacto social proveniente da interrupção de vias públicas.

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 2.00.12 (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), a proteção ao meio ambiente (minimização de vazamentos) e as metas econômicas (minimização de custos). A Figura 1 apresenta o fluxograma do modelo proposto.

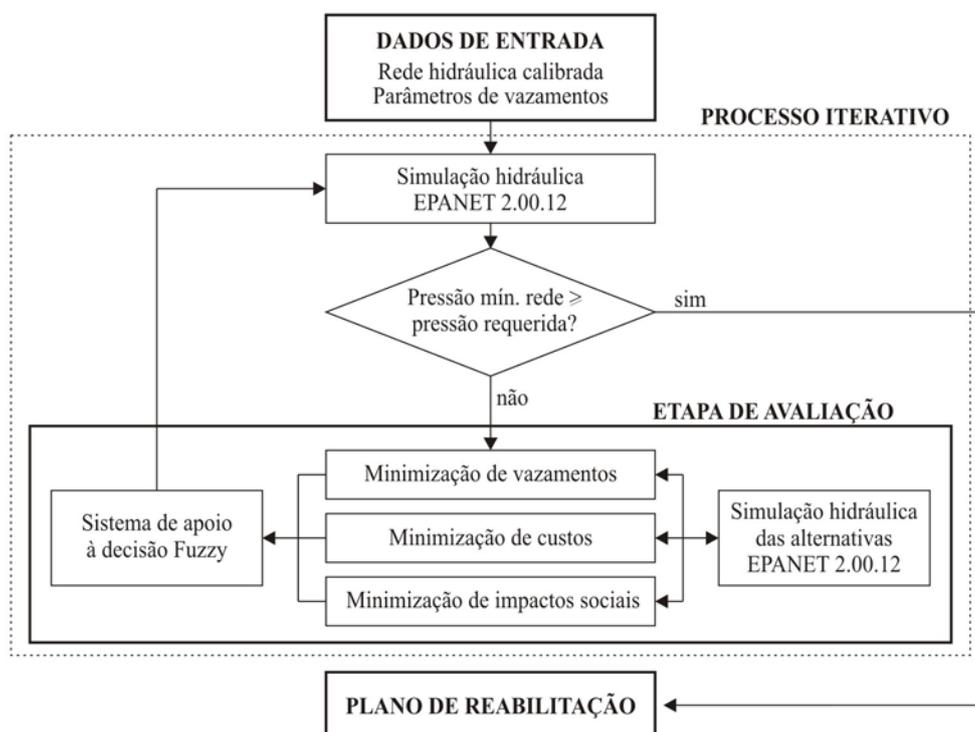


Figura 1: Modelo proposto de planejamento otimizado de reabilitação de redes de abastecimento

Critério Ambiental

O critério ambiental foi analisado com base no volume perdido por vazamentos e na idade das tubulações, porém, outros fatores podem ser facilmente incluídos na análise. 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 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 Equação 1.

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

onde QL_i é o volume perdido por vazamentos quantificado do nó i , H_i é a energia total disponível no nó i , Z_i é cota topográfica referente ao nó i , a é o expoente de perda referente ao setor de vazamentos que o nó i pertence; n é o conjunto de nós cujos trechos são interconectados ao nó i ; D_{ij} e L_{ij} são o diâmetro e o comprimento, respectivamente dos trechos j ligados ao nó i , e θ é a constante 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 (θ), que depende basicamente das características do sistema (idade e deterioração das tubulações, tipo de solo, dentre outras) e o

exponente de vazamento (a). O valor do coeficiente de vazamento θ 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.

Após a obtenção dos valores padronizados para o volume total de vazamentos para cada simulação, é calculado o valor final para o critério, levando em consideração também a idade da tubulação. A Tabela 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 1: Valores padronizados para o critério ambiental.

		Idade (anos)		
		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 é realizada pelo gestor ou 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 ambiental.

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 Equação 2.

$$G_c = \frac{C_{ij} - C_{i(j-1)}}{\Delta P} \quad \text{equação (2)}$$

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 ΔP é o ganho de pressão no nó mais desfavorável (m).

Com base nos dados originais da rede (1ª iteração) ou nos resultados obtidos na iteração anterior, efetua-se a simulação da rede no EPANET 2 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 Pressão. 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*.

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 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. Os valores maiores representam as intervenções que mais impactam nas ruas, ou seja, são as alternativas menos indicadas de serem adotadas.

Quando a intervenção realizada for uma substituição, duplicação ou ampliação, adota-se o peso de acordo com a via onde o trecho se localiza. Após ocorrer a primeira intervenção no trecho, as próximas iterações terão o peso para o critério social igual a 1, favorecendo outras intervenções. Com a intervenção para a via prevista ao longo do processo iterativo, é preferível que as outras ações sejam realizadas neste trecho nas iterações seguintes, já que, na prática, quanto menos trechos forem substituídos, menor será o impacto à sociedade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Rede Exemplo 1

A rede hidráulica proposta por Alperovits e Shamir (1977) foi adotada como primeiro estudo de caso. Esta rede exemplo é utilizada com frequência para verificar a adequação e aplicabilidade de diferentes modelos matemáticos apresentados na literatura (GOMES *et al.*, 2008; GIL *et al.*, 2011; SEDKI e OUAZAR, 2012 etc.) e é composta por sete nós consumidores, conectados entre si por oito trechos que formam dois anéis (Figura 2). 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 apresentados nas Tabelas 2 e 3, enquanto os custos são apresentados na Tabela 4. Os diâmetros foram retirados dos trabalhos de

Savic e Waters (1997) e os coeficientes de Hazen-Williams foram retirados de Gomes *et al.*, 2008, que adotaram valores diferentes do trabalho original para simular condições diversas para os tubos.

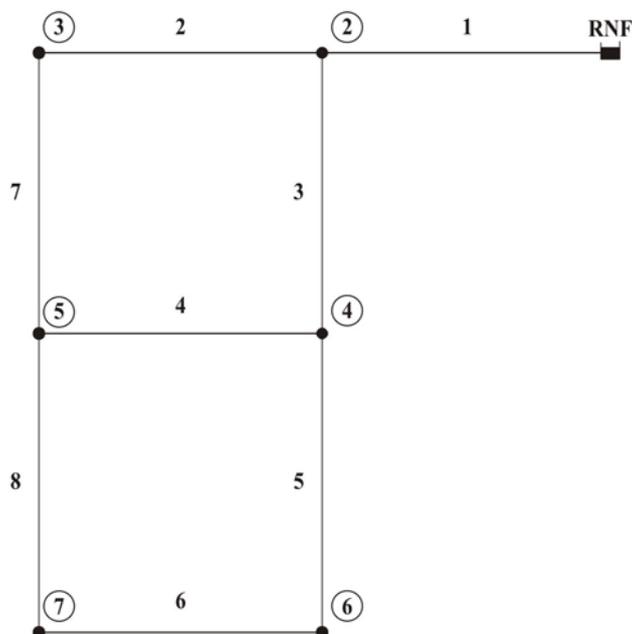


Figura 2: Rede Exemplo 1 (ALPEROVITS e SHAMIR, 1977).

Tabela 2: 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 3: Dados dos trechos da Rede Exemplo 1.

ID Trecho	Diâmetro (mm)	Coefficiente Hazen-Williams
1	457,2	110
2	254,0	110
3	406,4	115
4	101,6	125
5	406,4	130
6	254,0	125
7	254,0	120
8	25,4	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 do critério ambiental (Tabela 1). Quanto menor o valor adotado, maior a possibilidade de o trecho sofrer intervenção.

Os impactos econômicos (custos) das intervenções ou modificações nas tubulações da rede foram considerados por meio do gradiente de custo (Equação 2), assim como descreve a metodologia.

Tabela 4: Custo das intervenções (HALHAL *et al.*, 1997)

Diâmetro Interno (mm)	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 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 5). Em uma aplicação real, essas notas são adotadas de acordo com a análise subjetiva do técnico responsável pelo projeto de reabilitação da rede.

Tabela 5: Valores padronizados para o critério social.

Trecho	1 e 2	3 e 5	6	4	7 e 8
Substituição	10	9	5	5	4
Limpeza	1*	3	4	4	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 ampla adoção do método de Mamdani em seus modelos. Logo, optou pelo método Mamdani e funções de pertinência triangulares. O método de Mamdani é mais utilizado devido à sua simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana.

Na construção do sistema *fuzzy* 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” (Figura 3). As Figuras 4 a 7 apresentam, graficamente, as funções de pertinência das variáveis de entrada e saída.

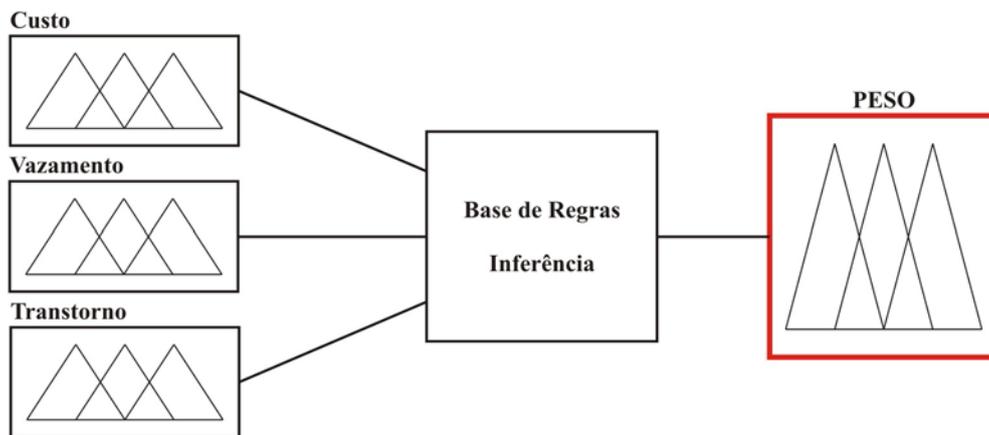


Figura 3: Variáveis do sistema *fuzzy* (entradas e saída).

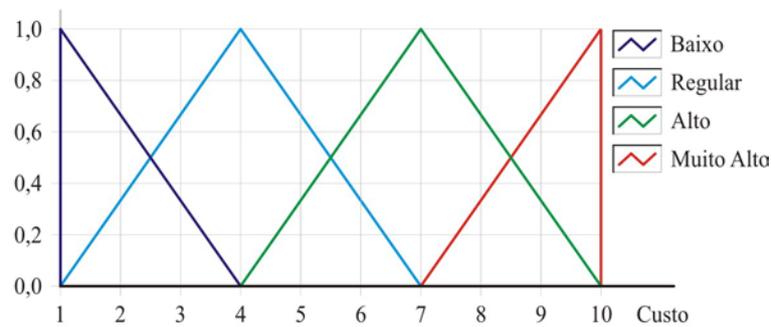


Figura 4: Variável linguística de entrada *Custo* (Critério Econômico).

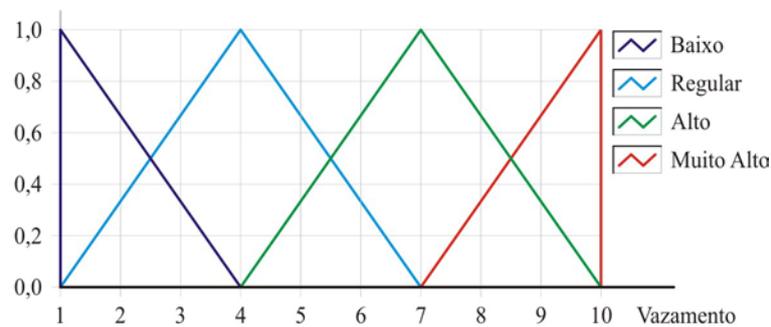


Figura 5: Variável linguística de entrada *Vazamento* (Critério Ambiental).

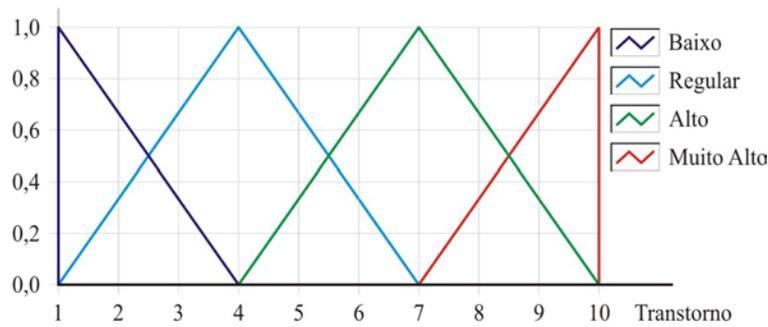


Figura 6: Variável linguística de entrada *Transtorno* (Critério Social).

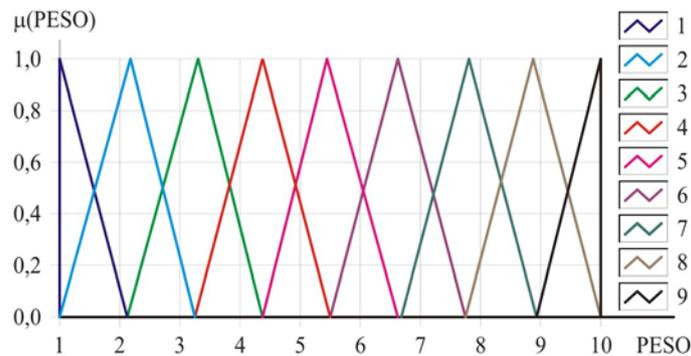


Figura 7: Variável linguística de saída *Peso*.

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

- SE** “Custo” é “Muito Alto” **E** “Vazamento” é “Muito Alto” **ENTÃO** “Peso” é 1
- SE** “Custo” é “Muito Alto” **E** “Vazamento” é “Baixo” **ENTÃO** “Peso” é 2
- 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 “Regular” **E** “Vazamento” é “Regular” **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 “Baixo” **E** “Transtorno” é “Baixo” **ENTÃO** “Peso” é 9

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 sejam atendidas. No caso particular da Rede Exemplo 1, o processo iterativo terminou na 12ª iteração, quando todos os nós alcançaram pressão superior à pressão mínima (30 mca). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6 e na Figura 8 (pressões e diâmetros resultantes da solução de reabilitação).

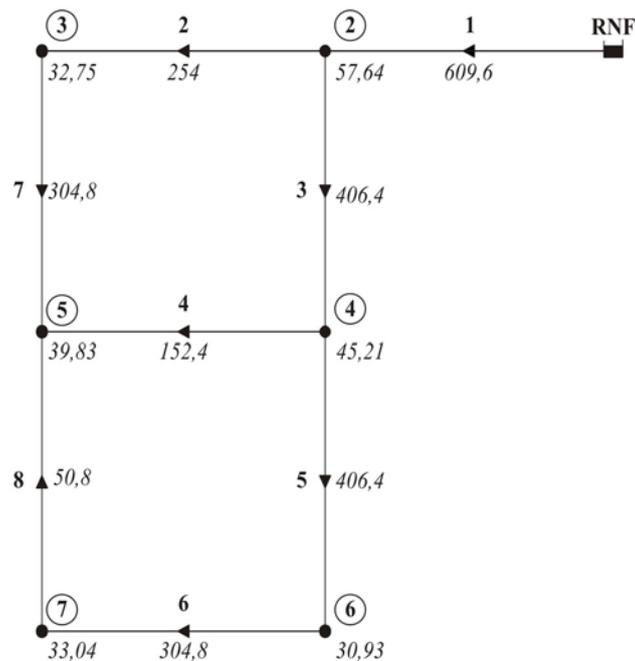


Figura 8: Solução da Rede Exemplo 1 - Pressões nos nós e diâmetro dos trechos.

Tabela 6: Solução da Rede Exemplo 1 - Diâmetros.

ID Trecho	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Coefficiente Hazen-Williams
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

Rede Exemplo 2

A Rede Exemplo 2 foi proposta inicialmente por Gessler (1985) e possui dois reservatórios, que abastecem dez nós interligados por 14 trechos (tubulações), sendo que alguns desses trechos apresentam suas tubulações duplicadas. A Figura 9 apresenta o esquema da Rede Exemplo 2.

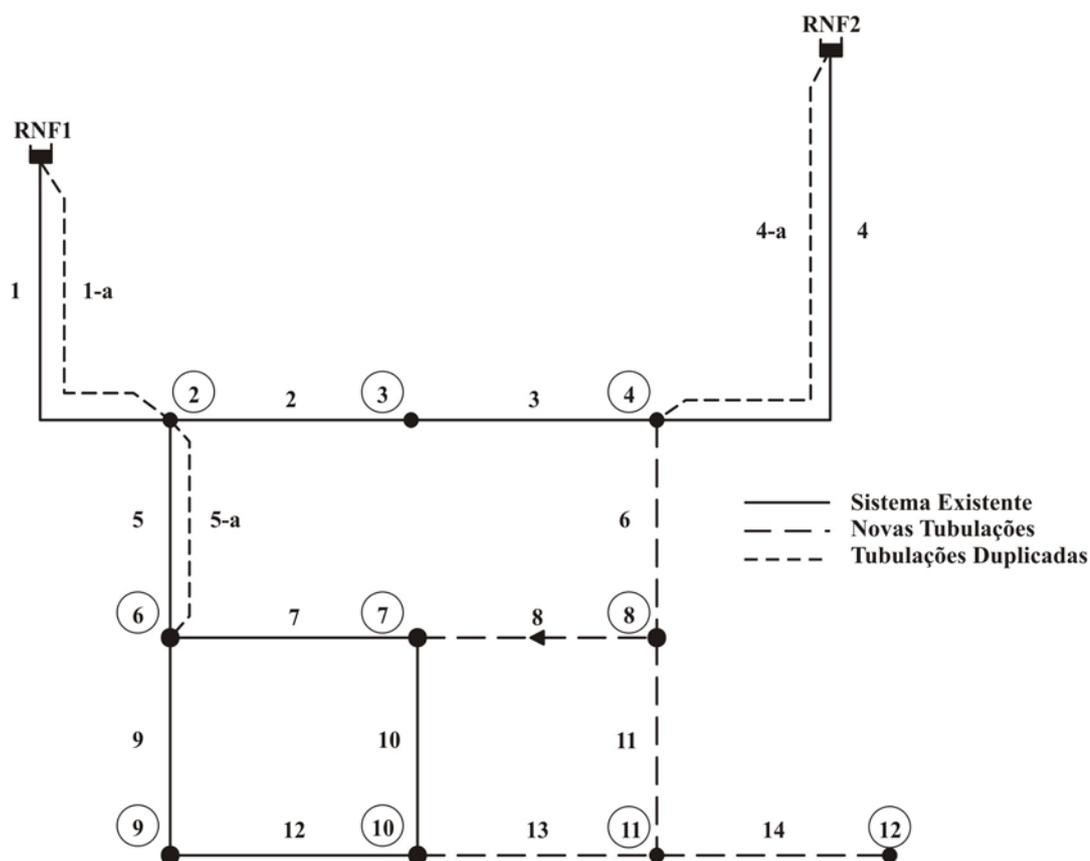


Figura 9: Rede Exemplo 2 (GESSLER, 1985).

Para a aplicação da metodologia proposta e facilitar a identificação dos trechos, foram adotados ruas por onde passam as tubulações. A identificação fictícia das ruas e os dados dos nós e dos trechos são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, que apresentam os valores das cotas, consumos, cargas hidráulicas, pressões, diâmetros, comprimentos e coeficientes de rugosidade. Os trechos das ruas A, C e D apresentam suas tubulações duplicadas e os trechos das ruas E, F e H (trechos tracejados) são os trechos da rede que foram ampliadas. Adotou-se, inicialmente, o diâmetro DN 150 para as novas tubulações e tubulações duplicadas.

Tabela 7: Dados dos nós da Rede Exemplo 2.

Nó Analisado	Cota (m)	Consumo (L/s)	Carga Hidráulica (m)	Pressão (m)
RNF 1	365,76	-	365,76	-
RNF 2	371,86	-	371,86	-
2	320,04	12,62	338,98	18,94
3	326,14	12,62	339,04	12,90
4	332,23	0,00	340,77	8,54
6	298,70	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 8: Dados dos trechos da Rede Exemplo 2.

Trecho	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 novos trechos foram retirados do próprio trabalho de Gessler (1985) e são mostrados na Tabela 9. Os impactos econômicos (custos) das intervenções ou modificações nas tubulações da rede foram considerados por meio do gradiente de custo (Equação 2), assim como descreve a metodologia.

Tabela 9: Custos das intervenções - Rede Exemplo 2.

Diâmetro (mm)	Material do Tubo	Custo (U\$/m)	
		Substituição	Limpeza
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	-

O estado inicial da rede é mostrado na Figura 10, 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, não é atendida em nenhum nó da rede e é o critério de parada do processo iterativo.

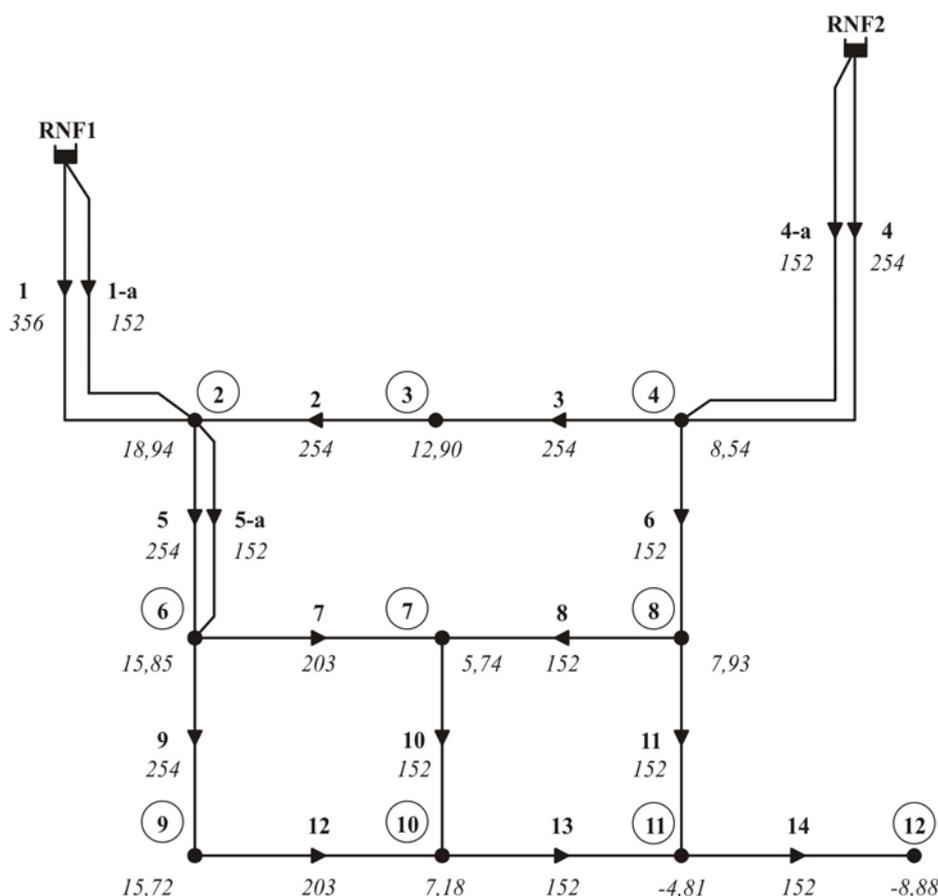


Figura 10: Estado inicial da Rede Exemplo 2.

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 alternativa. Com base no peso obtido para o volume de vazamentos em cada intervenção e da idade, determinaram-se os valores deste critério por meio da Tabela 1. Quanto menor o valor adotado, maior a possibilidade de o trecho sofrer intervenção.

Adotou-se pesos para a avaliação do critério social em função do trecho (rua) onde será feita a intervenção (Tabela 10). 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 10: 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

Sistema Fuzzy

Para resolução da Rede Exemplo 2, adotou-se o mesmo sistema *fuzzy* implementado para a Rede Exemplo 1. De modo semelhante a resolução da Rede Exemplo 1, a cada interação, o sistema *fuzzy* determina qual a melhor alternativa 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 interação, quando todos

os nós alcançaram pressão superior à pressão mínima (30 mca). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 11 e Tabela 12. A Figura 11 apresenta as pressões e diâmetros resultantes da solução de reabilitação.

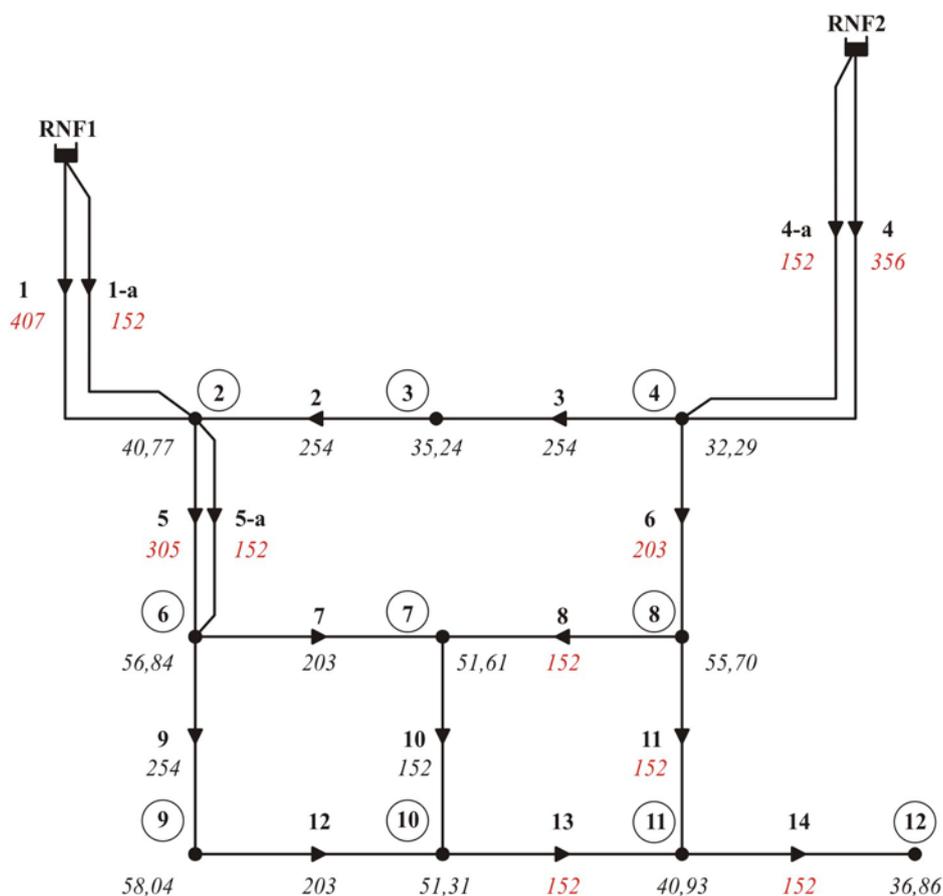


Figura 11: Solução da Rede Exemplo 2 - Pressões nos nós e diâmetro dos trechos.

Tabela 11: Solução da Rede Exemplo 2 - Pressões nos nós.

Nós	Cota (m)	Consumo (l/s)	Pressão (m)
RNF 1	365,76	-	-
RNF 2	371,86	-	-
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 12: Solução da Rede Exemplo 2 - Diâmetros.

Trecho	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

CONCLUSÕES

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.

O 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 dos pesos dos critérios apresentados.

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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido através do projeto “Abordagem Multiobjetiva para a Reabilitação de Redes de Abastecimento de Água” - Edital MCT/CNPq 14/2011 - Universal, e pelas bolsas de IC dos graduandos Raomax C. M. Matias e Júlia L. F. Virgolino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALPEROVITS, E.; SHAMIR, U. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, v. 13, n. 6, p. 885-900. 1977.
2. BEZERRA, S. T. M. Método de otimização para a reabilitação de redes de distribuição de água. Dissertação de Mestrado, PPGECA, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil. 2005.
3. BISCOS, C.; MULHOLLAND, M.; LE LANN, M. V.; BUCKLEY, C. A.; BROUCKAERT, C. J. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. *Water SA*, v. 29, n. 4, p. 393-404. 2003.
4. FORMIGA K. T. M.; CHAUDHRY, F. H. 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. 2002.
5. GESSLER, J. Pipe network optimization by enumeration. In: *Proceedings of Computer Applications for Water Resources*, ASCE, New York, N.Y., p. 572-581. 1985.
6. GIL, C.; BAÑOS, R.; ORTEGA, J.; MÁRQUEZ, A. L.; FERNÁNDEZ, A.; MONTOYA, M. G.; CABESTANY, J.; ROJAS, I.; JOYA, G. Ant colony optimization for water distribution network design, a comparative study. *Lecture Notes in Computer Science* 6692, p. 300-307. 2011.
7. GIUSTOLISI, O.; BERARDI, L. Water distribution network calibration using enhanced GGA and topological analysis. *Journal of hydroinformatics*, v. 13, n. 4, p. 621-641. 2011.
8. GOMES, H. P.; BEZERRA, S. T. M.; SRINIVASAN, V. S. An iterative optimisation procedure for the rehabilitation of water supply pipe networks. *Water AS*, v. 34, n. 2, p. 225-236. 2008.
9. GOMES, H. P.; BEZERRA, S. T. M.; CARVALHO, P. S. O.; SALVINO, M. M. Optimal dimensioning model of water distribution systems. *Water SA*, v. 35, n. 4, p. 421-432. 2009.
10. HALHAL, D.; WALTERS, G. A.; OUZAR, D.; SAVIC, D. A. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE, v. 123, n. 3, p. 137-146. 1997.
11. LANSEY, K.; BASNET, C. Parameter estimation for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 117, n. 1, p. 126-144. 1991.
12. SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*. ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77. 1997.
13. SEDKI, A.; OUAZAR, D. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems. *Advanced Engineering Informatics*, v. 26, n. 3, p. 582-591. 2012.
14. TABESH, M.; SABER, H. A. Prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using GIS. *Water Resources Management*, v. 26, n. 1, p. 225-241. 2012.
15. TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285. 1999.
16. WALSKI, T. M. Case study: Pipe network model calibration issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 112, n. 2, p. 238-249. 1986.
17. ZHONG, S. & QU, X. Calibration of hydraulic model in real-life water distribution system. *Applied Mechanics and Materials*, v. 155-156, p. 285-290. 2012.