

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“LÓGICA FUZZY APLICADA À REABILITAÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS”

*Saulo de Tarso Marques Bezerra (1), Raomax Charlles Moreira Matias (2),
Heber Pimentel Gomes (3), Flávia Lima Cordeiro de Moura (4)*

(1) (2) Centro Acadêmico do Agreste - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brasil, (+5581) 2126.7772, s.bezerra@yahoo.com.br, raocharlles@yahoo.com.br.

(3) (4) Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil, (+5583) 3216.7037, heberp@uol.com.br, flavialcmoura@gmail.com.

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 geralmente não é viável. Objetivou-se, com esta pesquisa, o desenvolvimento de um sistema fuzzy de apoio à decisão que busque uma solução abrangente para a reabilitação de sistemas de distribuição de água, que considere além dos custos das intervenções físicas, a minimização do volume de água perdido por vazamentos nas redes 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.

Palabras claves: Lógica fuzzy; Redes hidráulicas; Sistema de suporte à decisão.

ABSTRACT

As the water distribution systems grow older, there is a natural loss in the quality of supply (insufficient flow and pressure at consumption points, high rates of water leaks, supply interruptions, deterioration of water quality etc.) as well as an increase in operational and maintenance costs. These systems require greater financial resources to maintain the supply in appropriate levels and, in the majority of cases, partial solutions are adopted in order to solve punctual problems. The ideal solution would be the rehabilitation of all the damaged and obsolete components; however, this alternative is not viable. The aim of this research is to develop a decision support system based on a fuzzy logic, which seeks a more comprehensive solution for the rehabilitation of water distribution systems, considering not only the costs of physical interventions but also the minimization of leaks in hydraulic networks and the reduction of negative impacts to the society. The methodology was applied in two fictitious networks and the results were satisfactory for the analyzed parameters.

Key words: Fuzzy logic; Hydraulic network; Decision support system.

SOBRE O AUTOR PRINCIPAL

Autor 1: Professor do curso de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (CAA/UFPE), Brasil. Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba, mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande e doutorado em Engenharia Mecânica, ênfase em Automação, pela Universidade Federal da Paraíba. Atualmente é coordenador do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos e vice-coordenador do Núcleo de Tecnologia do CAA. Tem

experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Engenharia Hidráulica, atuando principalmente nos seguintes temas: modelagem, otimização e eficientização de sistemas de distribuição de água.

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 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. De forma geral, a melhoria do desempenho de sistemas de distribuição de água pode ser obtida através da substituição, limpeza, duplicação e reparação de tubulações, ou renovação de instalações existentes da rede (bombas, reservatórios etc.).

A alternativa ideal para os sistemas que possuem problemas é a reabilitação de todos os componentes deteriorados e obsoletos, entretanto, esta solução geralmente não é viável economicamente. Os recursos financeiros disponíveis nas empresas de saneamento são 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.

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 do volume de água perdido por vazamentos) e as metas econômicas (minimização de custos). A Figura 1 apresenta o fluxograma do modelo proposto.

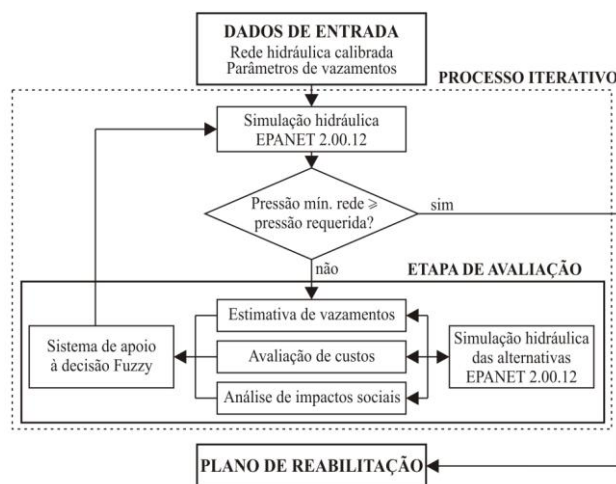


Figura 1. Modelo proposto de planejamento otimizado de reabilitação de redes

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 pode ser 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.

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

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 expoente de vazamento (a).

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 estimado o volume total perdido pelos vazamentos na rede. De posse desse conjunto de valores estimados de volume perdido, 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 uma tubulação antiga pode apresentar comprometimento funcional (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 (Equação 2). Em resumo, o gradiente de custo indica o preço por unidade de pressão ganha (no nó mais desfavorável).

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

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.

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 pelos serviços em áreas urbanas. Por exemplo, a abertura de valas, inevitavelmente, atrapalha o trânsito e o comércio local.

Neste trabalho, o critério social refere-se ao transtorno causado à sociedade que trafega no local ou região das intervenções. 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 deve analisar o funcionamento do trânsito no local, o comportamento do comércio no entorno das ruas que poderão ser interditadas, tudo isso para garantir uma melhor mobilidade e pleno funcionamento das vias.

Para avaliação do impacto social causado por intervenções realizadas em trechos dessa rede, foi adotado um conjunto de valores. Os valores são 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, 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 Iglesias *et al.* (2004) 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.

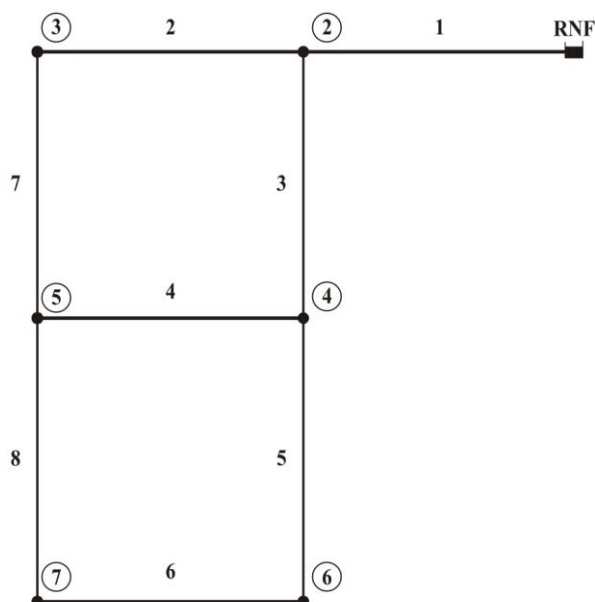


Figura 2. Rede Exemplo 1

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 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 do 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

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

Fonte: HALHAL *et al.* (1997).

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 menores transtornos 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.

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

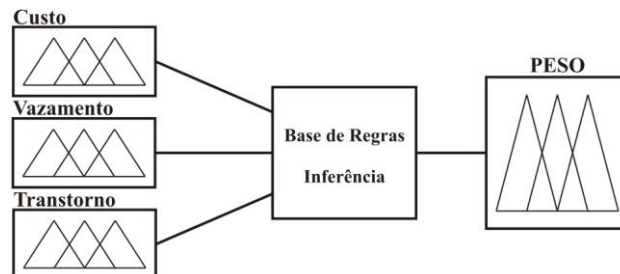


Figura 3. Variáveis do sistema fuzzy

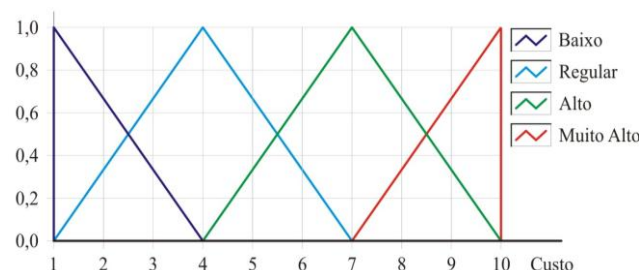


Figura 4. Variável linguística de entrada Custo (critério econômico)

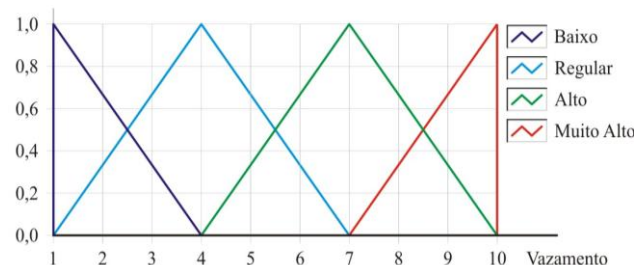


Figura 5. Variável linguística de entrada Vazamento (critério ambiental)

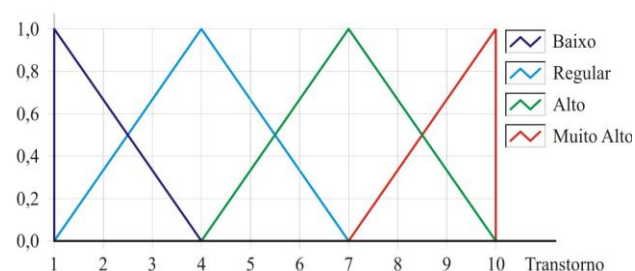


Figura 6. Variável linguística de entrada Transtorno (critério social)

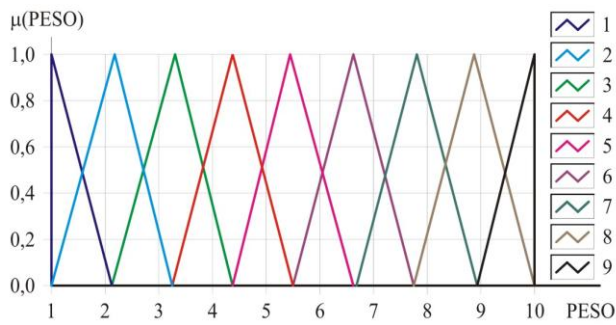


Figura 7. Variável linguística de saída Peso

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).

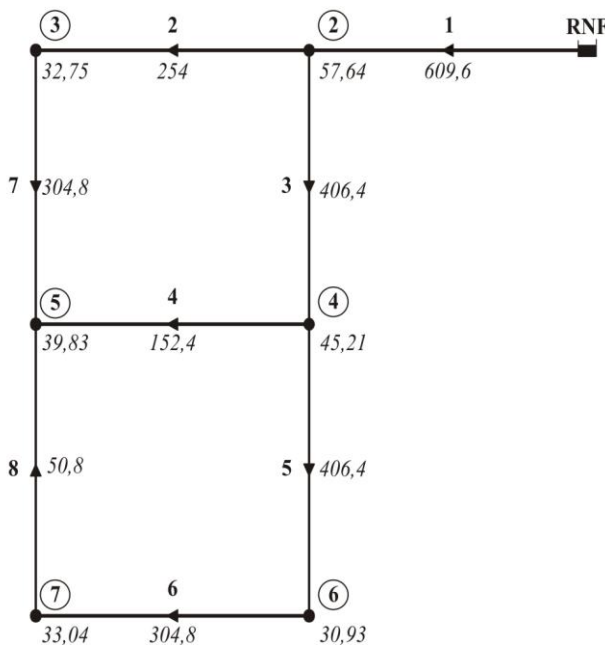


Figura 8. Solução da Rede Exemplo 1 - Pressões nos nós e diâmetro dos trechos

Tabela 6: Solução da Rede Exemplo 1

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.

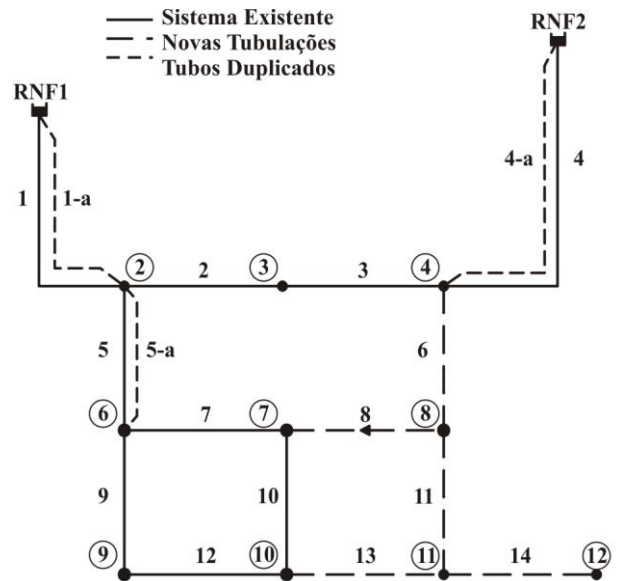


Figura 9. Rede Exemplo 2

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, 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 propostos para a ampliação da rede. Adotou-se, inicialmente, o diâmetro DN 150 para os tubos novos, inclusive para os dos trechos duplicados.

Tabela 7. Dados dos nós da Rede Exemplo 2

ID Nó	Cota (m)	Consumo (L/s)	Pressão (m)
RNF 1	365,76	-	-
RNF 2	371,86	-	-
2	320,04	12,62	18,94
3	326,14	12,62	12,90

4	332,23	0,00	8,54
6	298,70	18,93	15,85
7	295,66	18,93	5,74
8	292,61	18,93	7,93
9	289,56	12,62	15,72
10	289,56	18,93	7,18
11	292,61	18,93	-4,81
12	289,56	12,62	-8,88

Tabela 8. 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 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 (\$/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.

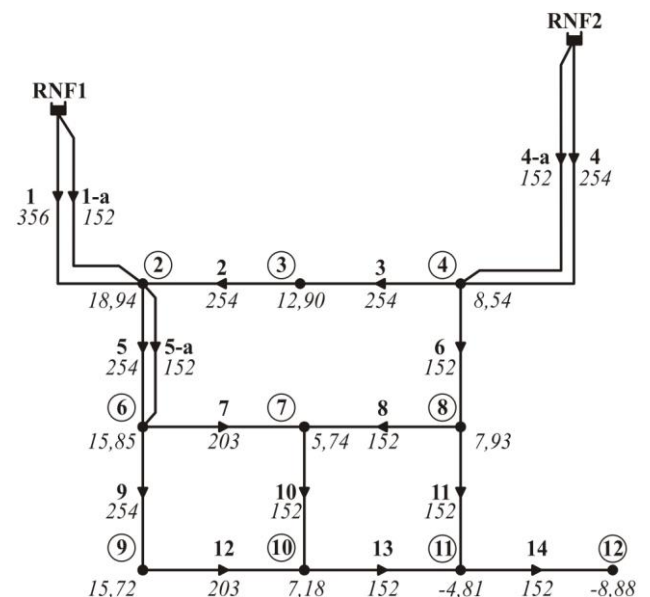


Figura 10. Estado inicial da Rede Exemplo 2

Para aplicação do critério ambiental, adotaram-se valores fictícios para a idade das tubulações. A partir do cálculo dos vazamentos feitos em cada interação (análise 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

Opção	Rua					
	A	B	C	D1	D2	
Substituição	2	4	3	4	3	
Limpeza	8	6	7	6	7	
Opção	Rua					
	E1	E2	F	G	H1	H2
Substituição	3	2	4	5	4	3
Limpeza	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 iteração, 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 iteração, quando todos os nós alcançaram pressão superior à pressão mínima (30 mca). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 11 e 12. A Figura 11 apresenta as pressões e diâmetros resultantes da solução de reabilitação.

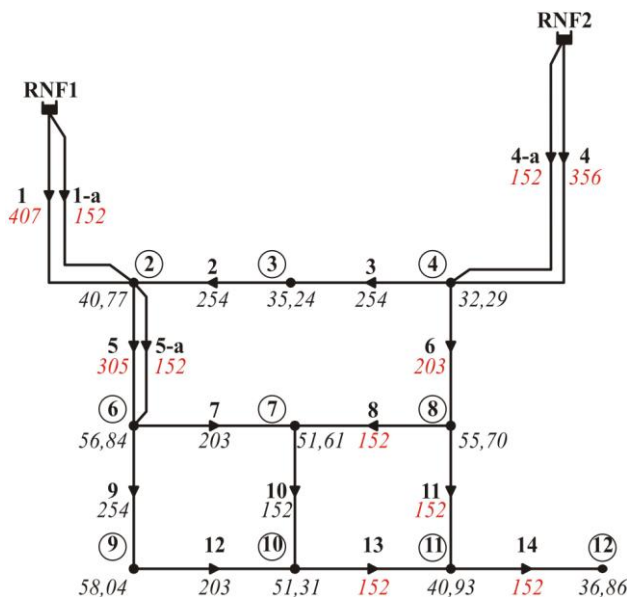


Figura 11. Solução da Rede Exemplo 2 - Pressões nos nós e diâmetros dos trechos

Tabela 11. Resultados da Rede Exemplo 2

ID 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

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

A primeira fase do modelo proposto consiste no levantamento de dados (cadastro da rede, demandas nodais, registros de manutenção e operação,

observações de campo e dados das fontes de abastecimento) e na calibração do modelo da rede hidráulica. A etapa seguinte da metodologia representa o processo de tomada de decisão propriamente dito, que é baseado na lógica fuzzy. Esta etapa apresenta a resposta final do modelo (etapa de decisão), ou seja, o planejamento da reabilitação do sistema de abastecimento de água investigado. Minimização de custos, vazamentos e impactos sociais são os critérios que o sistema de apoio à decisão considera, simultaneamente, para gerar o planejamento. A solução apontada reflete a relação de compromisso entre a satisfação da sociedade (minimização dos impactos sociais), a proteção ao meio ambiente (minimização das perdas reais provocadas por 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. Posteriormente, o sistema desenvolvido será implementado no código fonte do programa computacional EPANET 2. Espera-se que o produto final possa ser aplicado na solução de problemas normalmente encontrados.

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

- Alperovits, E. e Shamir, U. 1977. “Design of optimal water distribution systems”. Water Resources Research 13, n. 6, pp. 885-900.
- Bezerra, S. T. M. 2005. “Método de otimização para a reabilitação de redes de distribuição de água”. Dissertação de Mestrado, PPGECA/UFCG, Campina Grande, Brasil.
- Biscos, C.; Mulholland, M.; Le Lann, M. V.; Buckley, C. A. e Brouckaert, C. J. 2003. “Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP”. Water SA 29, n. 4, pp. 393-404.
- Formiga K. T. M. e 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.
- Gessler, J. 1985. “Pipe network optimization by enumeration”. In: Proceedings of Computer Applications for Water Resources, ASCE, New York, N.Y., pp. 572-581.
- Gil, C.; Baños, R.; Ortega, J.; Márquez, A. L.; Fernández, A.; Montoya, M. G.; Cabestany, J.; Rojas, I. e Joya, G. 2011. “Ant colony optimization for water distribution network design, a comparative study”. Lecture Notes in Computer Science 6692, pp. 300-307.
- Giustolisi, O. e Berardi, L. 2011. “Water distribution network calibration using enhanced GGA and topological analysis”. Journal of hydroinformatics 13, 4, pp. 621-641.
- Gomes, H. P.; Bezerra, S. T. M. e Srinivasan, V. S. 2008. “An iterative optimisation procedure for the rehabilitation of water supply pipe networks”. Water SA 34, 2, pp. 225-236.
- Gomes, H. P.; Bezerra, S. T. M.; Carvalho, P. S. O. e Salvino, M. M. 2009. “Optimal dimensioning model of water distribution systems”. Water SA 35, 4, pp. 421-432.
- Halhal, D.; Walters, G. A.; Ouzar, D. e Savic, D. A. 1997. “Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm”. Journal of Water Resources Planning and Management 123, 3, pp. 137-146.
- Iglesias, P. L.; Solano F. J. M.; Miquel, V. S. F. E García, R. P. (2004) “Genetic algoritmos modificado para diseño de redes de abastecimento de agua”. In: Anais do 4º SEREA – Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, Brasil.
- Lansley, K. e Basnet, C. 1991. “Parameter estimation for water distribution networks”. Journal of Water Resources Planning and Management 117, 1, pp. 126-144.
- Sedki, A. e Ouazar, D. 2012. “Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems”. Advanced Engineering Informatics 26, 3, pp. 582-591.
- Tabesh, M. e Saber, H. A. 2012. “Prioritization model for rehabilitation of water distribution networks using GIS”. Water Resources Management 26, 1, pp. 225-241.

- Tucciarelli, T.; Criminisi, A. e Termini, D. 1999. "Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation". Journal of Hydraulic Engineering 125, 3, pp. 277-285.
- Walski, T. M. 1986. "Case study: Pipe network model calibration issues". Journal of Water Resources Planning and Management 112, 2, pp. 238-249.
- Zhong, S. e Qu, X. 2012. "Calibration of hydraulic model in real-life water distribution system". Applied Mechanics and Materials 155-156, pp. 285-290.