



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL/MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO – SANEAMENTO AMBIENTAL

ADRIANO RICARDO ALMEIDA ALEXANDRE

**IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA POR MEIO DO ALGORITMO GENÉTICO COM DADOS
TRANSIENTES**

FORTALEZA

2005

ADRIANO RICARDO ALMEIDA ALEXANDRE

IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DO ALGORITMO
GENÉTICO COM DADOS TRANSIENTES

Esta dissertação foi submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Saneamento Ambiental, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo

FORTALEZA

2005

A369i

Alexandre, Adriano Ricardo Almeida

Identificação de vazamento em redes de distribuição de água por meio de algoritmo genético com dados transientes / Adriano Ricardo Almeida Alexandre. -- Fortaleza, 2005.

136 f. : il.

Orientador: Prof.^a Dr.^a John Kenedy de Araújo.

Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento.

1. Engenharia sanitária. 2. Engenharia ambiental. 3. Hidráulica – Modelos matemáticos. 4. Água – Distribuição. 5.

ADRIANO RICARDO ALMEIDA ALEXANDRE

IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTOS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA POR MEIO DO ALGORITMO
GENÉTICO COM DADOS TRANSIENTES

Esta dissertação foi submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Saneamento Ambiental, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. John Kenedy de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram direta e indiretamente para a concretização deste trabalho. Gostaria de externar minha gratidão a todas elas em particular:

ao Prof Dr. John Kenedy de Araújo, meu orientador, pelo conhecimento, amizade, paciência e incentivo decisivos em muitos momentos na realização deste trabalho;

ao Prof. e amigo Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro, pela disponibilidade e atenção;

ao Prof. Dr. Antonio Marozzi Righetto, pela disponibilidade e atenção;

a todos os colegas do Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos que compartilharam comigo nas angústias e dificuldades do caminho;

aos meus pais Aloísio Alexandre e Maria Lúcia pelo apoio e incentivo sempre presente em minhas realizações;

a minha esposa Silvânia e meus filhos André e Aline pelo companheirismo e incentivo no dia a dia da realização deste trabalho;

a bibliotecária e amiga Eliene Moura, pelas correções realizadas;

a EMLURB pela disponibilidade de liberação e flexibilização dos horários de trabalho permitindo maior facilidade para elaboração deste estudo;

a Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa pelo apoio financeiro;

a todos os professores e funcionários desta instituição da qual sou fruto, pela minha formação e conceitos de ética e profissionalismo;

aos meus irmãos Aluisio, Anísio, Aldísio, Fátima e Eugênia, pelo apoio afetivo;

Enfim, quero agradecer a Deus, pela minha existência.

*“Não se pode defender o que não se ama e não se
pode amar o que não se conhece”*

William Shakespeare

RESUMO

Um grande problema presente nas redes de distribuição de água no Mundo é a presença de índice de perdas, cuja parcela considerável decorre da presença de perdas físicas, tendo como o maior componente os vazamentos. Estes vazamentos ocasionam não só dificuldades operacionais e financeiras, como também desperdício deste recurso natural limitado. Constitui meta na sociedade moderna a diminuição deste grave problema. O presente trabalho aborda o tema e propõe uma metodologia de estudo de uma técnica de detecção e quantificação de vazamentos em redes de distribuição mediante modelagem deste parâmetro. O método empregado na solução do problema inverso é a utilização de dados transientes para calibração do parâmetro vazamento por meio do algoritmo genético. Na análise do fenômeno transiente, é utilizado o Método das Características. Uma rede exemplo é usada para estudar a identificação de vazamentos e avaliar a confiabilidade do método. Vários resultados foram apresentados e discutidos com a aplicação deste método em diferentes situações e comparados os resultados obtidos pelo algoritmo genético com o conhecimento prévio das condições permanentes iniciais e sem o uso deste conhecimento.

Palavras-chave: rede de distribuição de água, algoritmo genético, transiente em redes, método inverso, vazamentos.

ABSTRACT

A great present problem in the nets of distribution of water in the World is the presence of index of losses, whose considerable portion elapses of the presence of physical losses, tends as the largest component the leaks. These leaks cause not only operational and financial difficulties, as well as waste of this limited natural resource. It constitutes goal in the modern society the decrease of this it records problem. The present work approaches the theme and it proposes a methodology of study of a detection technique and quantification of leaks in distribution nets by of the modeling of this parameter. The employed method in the solution of the inverse problem is the use of data transients for calibration of the parameter leak through the genetic algorithm. In the analysis of the phenomenon transient, the Method of the Characteristics is used. A net example is used to study the identification of leaks and to evaluate the reliability of the method. Several results were presented and discussed with the application of this method in different situations and compared the results obtained by the genetic algorithm with the previous knowledge of the conditions permanent initials and without the use of this knowledge.

Key-words: net of distribution of water, genetic algorithm, transient in nets, inverse method, leaks.

LISTA DE FIGURAS

1 – Perdas no faturamento - prestadores de serviços regionais	23
2 – Perdas no faturamento - prestadores de serviços locais	23
3 – Percentual de água não faturada em diversas regiões do Mundo	24
4 – Perdas físicas por subsistema: origem e magnitude	25
5 – Pontos freqüentes de vazamentos em redes de distribuição (percentuais ilustrativos baseados em experiência da SANASA)	26
6 – Causas prováveis de falhas e rupturas em tubulações	27
7 – Algoritmo genético típico	50
8 – Conversão de decimal para binário	52
9 – Cruzamento uniforme	58
10 – Mutação simples	60
11 – Linhas Características no plano $x-t$	70
12 – Tubulação simples	70
13 – Região de validade para uma tubulação simples	71
14 – Excitação no nó de jusante	71
15 – Excitação nos nós a montante e jusante	72
16 – Malha de “discretização” do Método das Características	74
17 – Esquema de uma seção interna i de uma tubulação	75
18 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação	76
19 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação	77
20 – Esquema de um nó de consumo M	78
21 – Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica k	79
22 – Exemplo de fechamento e abertura de uma válvula	81
23 – Manobra suave de válvula.....	89
24 – Manobra brusca de válvula	90
25 – Valores médios da rugosidade absoluta para alguns materiais	91
26 – Rede exemplo hidráulica usada na calibração	97

27 – Cargas hidráulicas transientes observadas no nó 8 para os dois tipos de manobras de válvulas: suave ($t_f=30s$) e brusca($t_f=5s$)	102
28 – Cargas hidráulicas transientes observadas no nó 8 para os dois tipos de manobras de válvulas: suave ($t_f=30s$) e brusca($t_f=5s$)	116
29 – Cargas hidráulicas transientes observadas no nó 2 e no nó 8 para um vazamento no nó 3	122

LISTA DE TABELAS

1 – Características físicas dos tubos	97
2 – Demanda nos nós	98
3 – Cargas hidráulicas em estado permanente conhecidas	100
4 – Vazões em estado permanente conhecidas	100
5 – Estimativas de vazamentos - caso 1 - condições iniciais desconhecidas- estimaco preliminar (manobra suave)	102
6 – Estimativas de vazamentos - caso 2 - condies iniciais desconhecidas - estimaco preliminar (manobra brusca)	102
7 – Estimativas de vazamentos - caso 1 - condies iniciais desconhecidas - estimaco final (manobra suave)	103
8 – TABELA 8 – Estimativas de vazamentos - caso 2 - condies iniciais desconhecidas - estimaco final (manobra brusca)	103
9 – TABELA 9 – Estimativas de vazamentos - caso 1 - condies iniciais conhecidas- estimaco preliminar (manobra suave)	104
10 – Estimativas de vazamentos - caso 2- condies iniciais conhecidas - estimaco preliminar (manobra brusca)	104
11 – Estimativas de vazamentos - caso 1- condies iniciais conhecidas - estimaco final (manobra suave)	104
12 – Estimativas de vazamentos - caso 2- condies iniciais conhecidas- estimaco final (manobra brusca)	105
13 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condies iniciais desconhecidas – estimativa preliminar	106
14 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condies iniciais desconhecidas – estimativa final	106
15 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condies iniciais conhecidas – estimativa preliminar	108
16 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condies iniciais conhecidas – estimativa final	108
17 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condies iniciais desconhecidas - estimativa preliminar	110
18 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condies iniciais desconhecidas - estimativa final	110

19 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar	111
20 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa fina	111
21 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar	112
22 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final	113
23 – Estimativa de vazamento no nó 3 - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar	114
24 – Estimativa de vazamento no nó3 - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa final	114
25 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar (vazamento no nó 3)	116
26 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar (vazamento no nó 5)	116
27 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)	117
28 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (vazamento no nó 3)	117
29 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final (vazamento no nó 5)	117
30 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final (vazamentos simultâneos nos nós 3 e5)	118
31 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final (vazamentos simultâneos nos nós 3 e5)	119
32 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (vazamento no nó 5)	119
33 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)	119
34 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (vazamento no nó 3)	120
35 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (vazamento no nó 5)	120
36 – Estimativas de vazamento– caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)	120
37 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 2)	122

38 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 8)	123
39 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar (nós monitorados: nós 2 e 8)	123
40 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 2)	123
41 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 8)	124
42 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (nós monitorados: nós 2 e 8)	124
43 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 2)	125
44 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 8)	125
45 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (nós monitorados: nós 2 e 8)	126
46 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 2)	126
47 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 8)	126
48 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (nós monitorados: nó 2 e 8)	127

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CNUMAD- Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

PNCDA- Plano Nacional de Combate ao Desperdício da Água

IWSA- *Internacional Water Supply Association*

MTI-AG- Método Transiente Inverso com algoritmo genético

SNIS- Sistema de Informações de Saneamento

SANASA- Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A

SCADA- *Supervisory, Control And Data Aquisition*

CAGECE- Companhia de Água e Esgoto do Ceará

CECOP- Centro de Controle Operacional

MOC- Método das Características

EPA- *Environmental Protection Agency*

TMA- *Time Matching Approach*

SOGA- *Single Objective Genetic Algorithm*

MOGA- *Multiple Objective Genetic Algorithm*

SIG- Sistemas de Informações Geográficas

GIS- *Geographic Information System*

SKAT- *Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management*

ASCII- *American Standard Code for Information Interchange*

AG- algoritmo genético

DNA- ácido desoxirribonucléico

FORTTRAN- *Formula Translation*

EUA- Estados Unidos da América

IBM- *Internacional Business Machines*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Panorama da água disponível no mundo	15
1.2 Objetivo	17
1.3 Apresentação	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 Descrição das perdas de água em sistemas de abastecimento, tipos e causas	21
2.2 Métodos físicos e não físicos de detecção de vazamentos	28
2.3 Definições dos modelos hidráulicos de calibração de rede de distribuição de água	30
2.4 Descrição de pesquisas relacionadas ao estudo	32
2.5 Alguns programas de modelagem hidráulica disponíveis no mercado	40
2.6 O Algoritmo genético (AG)	46
2.6.1 Histórico sobre o algoritmo genético	46
2.6.2. Estrutura de um algoritmo genético e sua analogia biológica	48
2.6.3 Representação dos parâmetros	51
2.6.4 Operadores genéticos	55
2.6.5 A função objetivo	60
2.6.6 Critérios de parada	61
2.6.7 Vantagens e desvantagens do algoritmo genético (AG)	62
3 MATERIAIS E MÉTODOS	65
3.1 Materiais	65
3.2 O modelo hidráulico	65
3.3 Método das Características (MOC)	68
3.3.1 Condições de contorno	74
3.3.2 Cálculo da celeridade	82
3.3.3 Condição de estabilidade	82
3.3.4 Considerações finais	83
3.4 O problema inverso	84

	30
3.4.1 Definição e conceitos básicos	84
3.4.2 Tipos de solução para o problema inverso	85
3.4.3 Formulação do problema inverso e sua resolução	86
3.5 As estratégias de resolução	87
3.5.1 Condições iniciais	87
3.5.2 Manobra de válvula	89
3.5.3 Rugosidades e fatores de atrito	90
3.5.4 O parâmetro vazamento	92
3.5.5 Representação dos vazamentos no AG	93
3.5.6 Medida da eficiência da calibração	93
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
4.1 Introdução	95
4.2 Programas computacionais	95
4.3 Rede exemplo	96
4.4 Parâmetros do AG	98
4.5 Estudo da identificação dos vazamentos	99
4.5.1 Influência da severidade do efeito transiente pela mudança na manobra da válvula (situação 1)	101
4.5.2 Influência da variação do tamanho do registro transiente na calibração (situação 2) .	105
4.5.3 Influência da variação dos parâmetros do AG (situação 3)	109
4.5.4 Influência do local e a quantidade de vazamentos no processo de calibração (situação 4)	115
4.5.5 Influência do local e quantidade de nós monitorados (situação 5)	121
5 CONCLUSÃO	128
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

1 INTRODUÇÃO

1.1 Panorama da água disponível no mundo

A água é um dos bens mais essenciais à vida humana, porém a sua quantidade é limitada. Apesar de nosso Planeta ser coberto por água, apenas uma parcela desse volume é destinado às atividades humanas. Os oceanos e mares cobrem 97,2% da água existente na Terra, compreendendo cerca de 71% da sua superfície. A quantidade de água livre no Globo é de cerca de 1.370 milhões de km³. Dessa porção apenas 0,6% é reserva de água doce disponível, correspondendo a 8,2 milhões de km³. Desse valor, somente 1,2% se encontra nos rios e lagos e os outros 98,8% apresentam-se na forma subterrânea da qual metade está situada a mais de 800 metros, sendo inviável a sua captação (MOTA, 2000).

Enquanto a população mundial cresce desordenadamente, o volume de água que depende basicamente do ciclo hidrológico, formado pela a precipitação (chuvas), escoamento (rios) e fluxo de águas subterrâneas, permanece inalterado, não aumentando com isso as reservas hídricas de água doce.

Segundo Postel (1992) em seu livro *Last Oasis*, uma pequena fração de água do Planeta está se transformando em água doce através de um processo contínuo de evaporação e precipitação. São aproximadamente 40 mil km³ transferidos dos oceanos para a terra a cada ano, renovando o suprimento de água doce mundial, quantidade muito superior à necessária para a população mundial. Porém com a irregular distribuição de água no nosso Planeta, a superior evaporação relativamente à precipitação, em muitos lugares, o mau uso e as ações poluidoras dos mananciais, tem agravado o problema da escassez desse bem indispensável.

Em muitos lugares, a população já ultrapassou o ponto de ser abastecida pelos recursos hídricos disponíveis e, nestes locais, as taxas de crescimento são altas, agravando ainda mais o problema de falta de água. No Oriente Médio, nove entre quatorze países vivem em condições de escassez, dos quais seis devem duplicar a população em 25 anos. Naquela região, as excessivas retiradas de água dos aquíferos subterrâneos estão provocando uma progressiva salinização advinda do mar que provoca uma intrusão no subsolo.

O Brasil é detentor da maior reserva hídrica de água doce, aproximadamente 8% do que há no mundo. Aqui estão presentes o maior manancial superficial na Bacia Amazônica e o maior manancial de água subterrânea, o Aquífero Guarani (região dos Estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul e presente em outros países vizinhos pertencentes à bacia Platina), porém existe uma distribuição desigual, com 80% na Região Amazônica e o restante 20% em locais onde moram 95% da população do País. Em lugares como a Região Nordeste, há longos períodos de estiagem e a população tem que caminhar longas distâncias, pois os recursos hídricos são limitados e há escassez até para consumo humano. Contribui para agravar este problema o excessivo adensamento urbano, com o surgimento de grandes áreas urbanas ao redor de grandes cidades provocando o desequilíbrio, tanto pelo crescimento populacional como pelo aumento de fontes poluidoras das reservas hídricas.

O uso da água é um fator preocupante, mas é necessário que sejam tomados diversos cuidados quando se relaciona a consumo humano, pois, neste caso, deve-se obedecer a padrões de potabilidade, exigências necessárias para que a ingestão não provoque doenças de veiculação hídricas, como amebíase, giardíase e outras.

Segundo a Agenda 21, documento elaborado pela Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), realizada no Rio de Janeiro nos dias 3 a 14 junho de 1992, também conhecida por Eco/ 92.

[...] estima-se que 80 por cento de todas as moléstias e mais de um terço dos óbitos dos países em desenvolvimento sejam causados pelo consumo de água contaminada e, em média, até um décimo do tempo produtivo de cada pessoa se perde devido a doenças relacionadas com a água (CNUMAD, 1992, seção II, cap.18, item 18.47).

Durante este evento foram definidos prazos para que todos os países se envolvam na missão de cumprir metas, como a cobertura completa de abastecimento de água potável até 2025, o que exigiria investimentos anuais correspondentes ao dobro dos níveis atuais. Portanto, uma estratégia realista para atender as necessidades presentes e futuras é desenvolver serviços de baixo custo, mas adequados, e que possam ser implementados e sustentados pelas comunidades.

Dentro desta visão, além do desenvolvimento de recursos humanos, busca-se a utilização de meios tecnológicos e científicos que aumentem a oferta de água tratada sem

utilização de novos aportes financeiros, com melhor racionalização e otimização dos recursos disponíveis.

Atualmente é notório o desperdício em sistemas de abastecimento de água e os percentuais do produto não faturados nas concessionárias brasileiras têm a média de 40,1% (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES DE SANEAMENTO – SNIS, 2002). Esta percentagem mostra-se elevada também em outros países, como na Grã-Bretanha, Taiwan e Hong-Kong, com 25 a 30%, conforme dados presentes no Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (PNCDA - 1998) e da IWSA (*Internacional Water Supply Association*). Aqui estão computadas as águas disponibilizadas, mas não regularizadas, incluindo as perdas físicas (vazamentos) e não físicas (SILVA *et al.* 1998).

Por tal razão, durante muitos anos, a humanidade desenvolve diversos métodos para detecção de vazamentos, que se dividem em físicos e não físicos. Os métodos físicos utilizam-se de equipamentos para a sua detecção e os não físicos se baseiam em modelos hidráulicos de calibração de redes de abastecimento de água.

O trabalho que ora desenvolve-se aborda um procedimento não físico de detecção de vazamento em redes de distribuição de água, o qual emprega o método transiente inverso, com o uso de algoritmos genéticos (MTI-AG) como ferramenta de otimização ou busca na identificação de vazamentos em redes de distribuição.

1.2 Objetivo

O problema de vazamento em canalizações foi estudado inicialmente por volta da década de 1920, por meio da indústria petrolífera, pois os seus produtos petróleo e derivados eram transportados em longas tubulações e um vazamento em potencial representa riscos ao meio ambiente e a operação. Foram usados para tanto, técnicas de geofonamento, radares de penetração ou profundidade, espectroscopia infravermelha, traçadores de odor e radioatividade e outros métodos físicos de detecção, relativamente confiáveis, mas muito onerosos.

Durante décadas, cientistas e pesquisadores desenvolveram técnicas para detecção de vazamentos para contrapor estes métodos, por intermédio de modelos matemáticos de

calibração relativamente simples, menos onerosos, entretanto, confiáveis e que podem ter grande valor econômico na sua escolha.

O presente estudo aborda uma calibração do parâmetro vazamento, mediante rotinas computacionais com a aplicação da análise transiente de uma rede exemplo de distribuição de água, provocado por um desequilíbrio do fluxo capaz de produzir grandes variações de pressões e velocidades conseqüentes de um distúrbio no regime permanente. Este método se mostra mais apropriado, pois reflete as condições reais do escoamento da água em sistemas de distribuição, já que é comum o uso de estações de bombeamento, válvulas de manobras e outros dispositivos capazes de provocar perturbações no fluxo do escoamento e surgimento de ondas de alta pressão.

A análise transiente mostra-se mais adequada, pois o efeito transiente se propaga através de todo o sistema de tubulações da rede a grandes velocidades em ondas muito superiores às velocidades médias de escoamento. Portanto, usa-se um modelo matemático baseado no Método das Características, fazendo a análise do transitório mediante equações explícitas para determinação das cargas e vazões. O regime permanente é determinado pelo método transiente (WYLIE; STREETER, 1978; CHAUDHRY, 1987), cujo efeito transitório é produzido pela manobra de uma válvula.

O método utiliza dados sintéticos obtidos de uma rede com os parâmetros conhecidos, com o intuito de obter as cargas transientes do(s) nó(s), que será(ão) considerado(s) como o(s) nó(s) monitorado(s) de uma rede exemplo. Estes dados serão considerados como os medidos. Após esta obtenção, realiza-se a análise transiente inversa que consiste na comparação das cargas transientes medidas com as cargas calculadas por um modelo matemático.

O objetivo geral trata da utilização da técnica de otimização para calibração e identificação do vazamento com o uso do algoritmo genético como ferramenta de busca, no intuito de maximizar a função objetivo obtida da análise transiente inversa em uma rede exemplo. Contribui esta pesquisa para a avaliação e a análise deste método (MTI-AG).

De forma específica, pode-se dizer que este estudo visa:

- usar rotinas computacionais que reproduzem um simulador hidráulico proposto por Araújo (2003) baseado no Método das Características (MOC) para cálculo das cargas transientes, que serão utilizados na solução de um problema inverso por meio de um algoritmo genético (MTI-AG);
- empregar o método transiente inverso associado ao algoritmo genético (MTI-AG) visando a identificar e quantificar o vazamento em uma rede exemplo de distribuição de água em diferentes situações, com o conhecimento prévio das condições iniciais do regime permanente e sem este conhecimento.
- analisar e comentar os resultados obtidos pela aplicação do método, descrito neste estudo, nas diferentes situações propostas.

1.3 Apresentação

O trabalho além desta Introdução (1) é composto dos seguintes segmentos delineados na seqüência

O capítulo 2 engloba a revisão da literatura pertinente, privilegiando estudos sobre o desperdício da água, métodos de detecção de vazamentos, abordagens relacionadas com a metodologia deste estudo, tipos de simuladores hidráulicos disponíveis no mercado e o algoritmo genético.

O capítulo 3 fornece informações sobre os materiais utilizados e o método transiente inverso, com descrição das estratégias de solução do modelo.

O capítulo 4, por sua vez, aborda os resultados obtidos na identificação do vazamento da rede exemplo nas diferentes situações, mediante o modelo proposto pelo presente estudo. Os resultados são analisados e comentados.

O capítulo 5 traz a conclusão do estudo e adita sugestões para pesquisas futuras sobre o tema. Após este capítulo é referenciada a lista de trabalhos científicos que serviram de acervo teórico e prático com vistas a validar o produto da presente investigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo abordam-se cenários, definições e estudos relativos a vazamentos em redes de distribuição ou tubulações de água. Aqui são explicitados os aspectos da importância dos vazamentos e os trabalhos de diversos autores que contribuíram para o desenvolvimento de modelos de localização e identificação de vazamentos em redes de distribuição de água.

2.1 Descrição das perdas de água em sistemas de abastecimento, tipos e causas

A água é um recurso limitado e de fundamental importância para o bem estar físico, mental e social das pessoas. Nos últimos anos, fornecer água em quantidade e qualidade suficiente tem sido meta de muitos governos. Associado a esta preocupação constata-se a presença de inúmeros vazamentos em redes públicas de distribuição de água os quais fragilizam e oneram a operação destes sistemas.

Em sistemas públicos de abastecimento, as perdas de água, do ponto de vista operacional, correspondem aos volumes não contabilizados. Tais prejuízos englobam as perdas não físicas, que correspondem à água consumida e não registrada e as perdas físicas, a parcela não consumida.

As perdas não físicas originam-se de ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados ou que submedem, fraudes em hidrômetros, perdas localizadas pelo atrito do escoamento com as canalizações e outras. São também conhecidas como *perdas de faturamento*, uma vez que seu principal indicador é a relação entre o volume disponibilizado e o volume faturado.

As reduções das perdas não físicas permitem aumentar a receita e o desempenho financeiro do prestador do serviço, contribuindo indiretamente para ampliação da oferta efetiva, mediante aplicação da realidade tarifária sem o ônus do custo devido a esta perda.

As perdas físicas têm origem nos vazamentos, aparecendo nas diversas etapas dos sistemas de abastecimento de água: captação, reservação, adução de água bruta, tratamento,

adução de água tratada e distribuição. Alguns procedimentos operacionais como descargas excedentes para limpeza ou esvaziamento de redes ou adutoras; extravasamentos em reservatórios; lavagens de filtros; limpeza de flocladores e decantadores; podem ser considerados vazamentos quando os volumes utilizados são superiores aos estritamente necessários à correta operação do sistema.

As reduções das perdas físicas permitem diminuir os custos de operação e manutenção, como consumo de energia elétrica, produtos químicos e outros, permitindo aumentar a oferta de água tratada nos sistemas, sem necessidade de expansão do sistema produtor.

Em sistemas de abastecimento de água, as perdas físicas totais são aquelas ocorrentes entre a captação de água bruta e o cavalete do consumidor. Nos ramais prediais, em uma rede de distribuição, registra-se a maior quantidade de ocorrências (vazamentos), mas, em volume de água, as maiores perdas físicas aparecem no extravasamento de reservatórios, vazamentos nas adutoras de água tratada e nas tubulações da rede de distribuição.

A estimativa de perdas de água em sistemas de abastecimento pode ser feita pela comparação entre o volume de água transferido de um ponto para um ou vários outros pontos da rede que estejam sobre a influência do primeiro. Por meio de pesquisa de campo, utilizando a análise de histogramas e controle estatístico dos registros contínuos das vazões macromedidas de setores da rede, é possível identificar e separar as perdas físicas das não físicas. A oferta noturna estabilizada durante a madrugada, retirando os consumos noturnos de alguns usuários (hospitais, fábricas e outros), representa, em quase a sua totalidade, os vazamentos na rede. A perda não física será a diferença entre a perda total na distribuição (água não contabilizada) e a perda física levantada.

Vários são os indicadores de perdas nos sistemas de distribuição de água, tal como o índice de *Perda de Faturamento ou Água Não Faturada*, que corresponde ao valor da divisão da diferença entre o volume disponibilizado e o volume faturado pela quantidade disponibilizada. É um índice importante para avaliação, do ponto de vista financeiro, porém em nosso País é comum a prática de cobrança de consumo mínimo (em média 10m³/mês),

mesmo que o consumidor tenha utilizado água abaixo deste limite. Portanto este indicador pode não representar esta realidade de perda.

Para efeito de ilustração do problema da perda, apresenta-se na seqüência gráficos de índice de *Água Não Faturada* no Brasil para diversas regiões, dentro de uma série histórica anual, de 1999 a 2002, para prestadores de serviços regionais (concessionárias estaduais) e locais (sistemas autônomos municipais), nos quais é constatada a média nacional por volta de 40,5% em 2002.

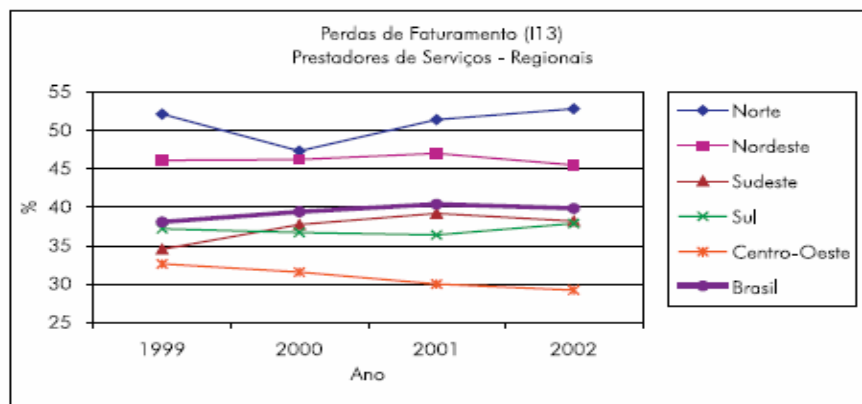


FIGURA 1 – Perdas no faturamento - prestadores de serviços regionais

Fonte: Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS (2002, p.51).

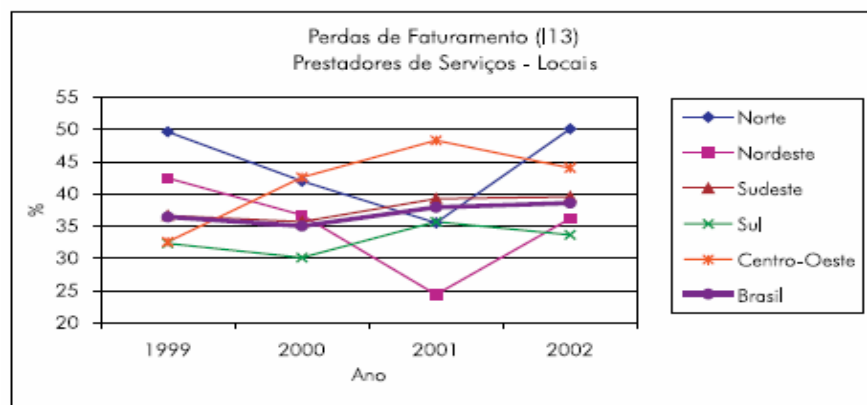


FIGURA 2 – Perdas no faturamento - prestadores de serviços locais

Fonte: Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS (2002, p.57).

Se compararmos com o gráfico de índice de perda de *Água Não Faturada* de outros países, vê-se a média destes países em 1995, com cerca de 17%, menor do que a nacional, mas não desprezível.

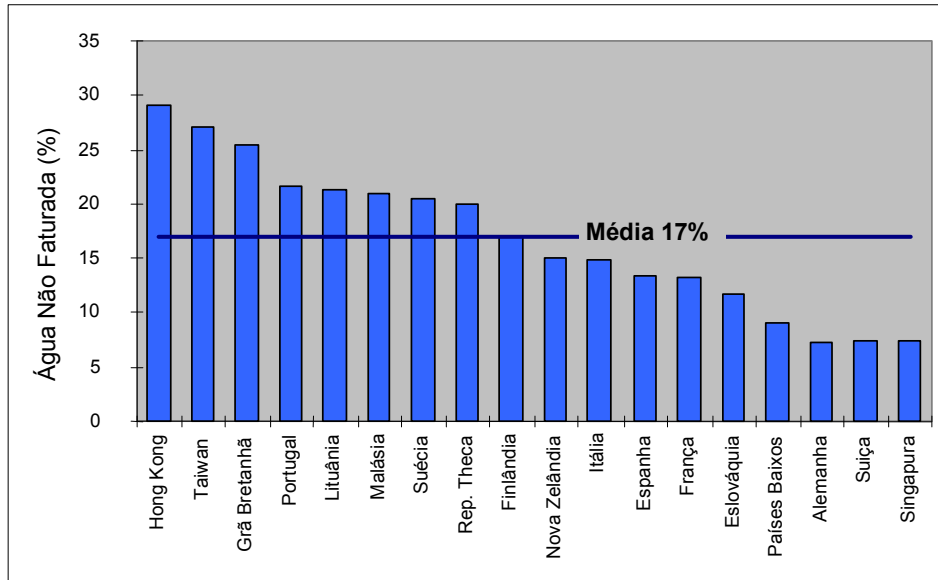


FIGURA 3 – Percentual de água não faturada em diversas regiões do Mundo

Fonte: Silva *et al.* (1998, p. 39).

Este índice não reflete a perda por vazamentos, objeto de estudo deste texto, mas expressa o tamanho do prejuízo de água não contabilizada, que inclui a perda física dos sistemas.

Várias são as causas das perdas físicas nos sistemas de abastecimento de água. Pode-se descrever as suas ocorrências nos diversos subsistemas de um sistema de distribuição, de duas maneiras: as suas origens nestas etapas e as suas magnitudes ou intensidades com relação ao volume de água perdida. Para melhor compreensão a figura 4 mostra estas causas.

	SUBSISTEMA	ORIGEM	MAGNITUDE
FÍSICAS	Adução de água bruta	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção*	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Tratamento	Vazamentos estruturais Lavagem de filtros* Descarga de lodo*	Significativa, função do estado das instalações e da eficiência operacional
PERDAS	Reservação	Vazamentos estruturais Extravasamentos Limpeza*	Variável, função do estado das instalações e da eficiência operacional
	Adução de água tratada	Vazamentos nas tubulações Limpeza do poço de sucção* Descargas	Variável, função do estado das tubulações e da eficiência operacional
	Distribuição	Vazamentos na rede Vazamentos em ramais Descargas	Significativa, função do estado das tubulações e principalmente das pressões

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

FIGURA 4 – Perdas físicas por subsistema: origem e magnitude

Fonte: Silva *et al.* (1998, p. 43).

As perdas nos diversos subsistemas da rede de abastecimento de água implicam ações corretivas e preventivas para minimização dos vazamentos. As ações na adução de água bruta e tratada, tratamento e reservação constituem ações corretivas localizadas e de facilidade de execução. As ações corretivas nas tubulações da rede de distribuição, no entanto, são dispersas, e muitas vezes de localização difícil e de maior magnitude quanto ao volume de água.

De maneira geral, os vazamentos na rede de distribuição aparecem em algumas áreas com seus respectivos percentuais de ocorrência, conforme figura a seguir, baseada na

experiência da SANASA (Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A), concessionária local da cidade de Campinas, no Estado de São Paulo.

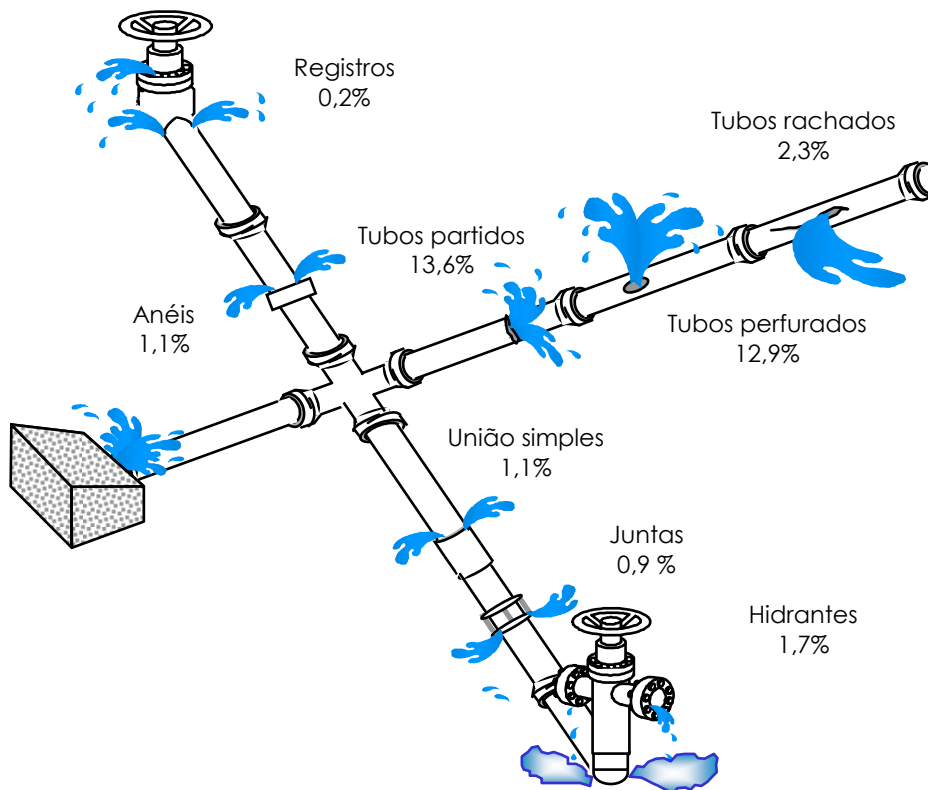


FIGURA 5 – Pontos freqüentes de vazamentos em redes de distribuição (percentuais ilustrativos baseados em experiência da SANASA)

Fonte: Silva *et al.* (1998, p. 47).

Os extravios (perdas) nas tubulações de distribuição são menos freqüentes daquelas que ocorrem nos ramais prediais, também componentes da rede de distribuição, mas o seu volume é de grandeza muito maior.

Conforme figura 6, várias são as causas das prováveis falhas e rupturas nas tubulações de uma rede de distribuição, sendo estas presentes nas fases de planejamento e projeto, construção, operação, manutenção e expansão da rede.

FASE DA FALHA	CAUSA DA FALHA	CAUSA DA RUPTURA
Planejamento e Projeto	<ul style="list-style-type: none"> • subdimensionamento • ausência de ventosas • cálculo transientes • regras de operação • setorização • treinamento 	<ul style="list-style-type: none"> • sobrepressão • subpressão • sub e sobrepressão • sub e sobrepressão • sobrepressão • sub e sobrepressão
Construção	<ul style="list-style-type: none"> • construtivas • materiais • peças • equipamentos • treinamento 	
Operação	<ul style="list-style-type: none"> • enchimento • esvaziamento • manobras • ausência de regras • treinamento 	<ul style="list-style-type: none"> • sub e sobrepressão • subpressão • sub e sobrepressão • sub e sobrepressão • sub e sobrepressão
Manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • sem prevenção • mal-feita • treinamento • interação operação/usuário • tempo de resposta 	
Expansão	<ul style="list-style-type: none"> • sem projeto • sem visão conjunta 	<ul style="list-style-type: none"> • sub e sobrepressão • sub e sobrepressão

FIGURA 6 – Causas prováveis de falhas e rupturas em tubulações

Fonte: Silva *et al.* (1998, p. 52).

O uso de técnicas operacionais de controle das perdas por vazamentos na distribuição tem que ser precedido de criteriosa análise técnica e econômica. Algumas técnicas podem ser facilmente implantadas e sua aplicação não é muito onerosa. Uma importante técnica de controle de perdas por vazamento e aplicação pouco onerosa, consiste no uso de projetos somente após rigorosa aprovação pelo contratante, por meio de uma análise baseada em normas que indiquem o emprego de materiais e dispositivos de proteção e controle, no intuito de evitar rompimentos nas tubulações por pressões inadequadas. Outra técnica, também não onerosa, porém importante no controle de perdas, é a fiscalização das execuções das obras de acordo com o estabelecido nos projetos que incluam o teste de estanqueidade após conclusão do serviço. Como técnicas de controle de perda, porém de implantação mais pesada e complexa do que as duas anteriores citadas estão à manutenção e operação do sistema de forma adequada, por meio de um treinamento e qualificação das pessoas envolvidas nestes dois processos.

O uso de sistemas computacionais que simulem modelos matemáticos deve ser utilizado pelos concessionários como ferramenta auxiliar para definições de normas para o projeto e operação de redes de distribuição de água. Os sistemas em operação geralmente são diferentes dos que foram planejados ou construídos e uma simulação do modelo real pode auxiliar na detecção e quantificação dos vazamentos na rede de distribuição, objeto de estudo deste trabalho, dentro de certos graus de precisão.

2.2 Métodos físicos e não físicos de detecção de vazamentos

Os diferentes métodos de detecção de vazamentos em tubulações de água podem ser classificados em físicos e não físicos. O método físico mais tradicional é o balanço de massa, ou seja, é analisado o volume de água que entra e sai nas tubulações de um sistema de abastecimento. Este sistema de balanço de massa é eficiente na identificação de vazamentos, porém o seu desempenho é pobre quanto à localização.

Os métodos de detecção de vazamentos mediante detecção física são onerosos, em virtude do emprego de aparelhos e equipamentos de alto valor aquisitivo juntamente com o treinamento técnico dispendioso do pessoal envolvido no processo de detecção, tornando com isso a sua utilização proibitiva por grande número de concessionários de serviços de abastecimento de água. Por isso, quase sempre, estes métodos são mais utilizados em sistemas de tubulações de gás e óleo, onde problemas de vazamentos são críticos do ponto de vista operacional e ambiental.

Entre os métodos de detecção física de vazamentos em tubulações de água segundo Kapelan, Savic e Walters (2000), podemos citar: testes hidrostáticos, mudança de resistividades de correntes induzidas, radar de profundidade, reflectância de ondas do espectro infravermelho, microfonia ou geofonamento, traçadores de radioatividade e outros. A seguir descreve-se resumidamente cada um destes métodos.

Os testes hidrostáticos consistem em aumentar a pressão dos fluidos presentes na tubulação até ao nível máximo permitido, sem comprometer a integridade dos tubos. A etapa posterior é verificar se conseguiu atingir esta pressão previamente conhecida, caso contrário, indica a presença de vazamento na tubulação.

A mudança da resistividade provocada por correntes induzidas ao longo das tubulações metálicas pode indicar trincas ou descontinuidades superficiais nas tubulações por meio da análise do fluxo elétrico e conhecimento das características do metal. Esta análise ajuda na prevenção e detecção de vazamentos.

O radar de profundidade usa o princípio de ondas ultra-sônicas, emitidas e refletidas que varrem as tubulações com estas ondas. Um aparelho emissor/receptor realiza uma imagem destas tubulações sob solo por meio destas ondas que, analisadas, permitem a detecção de anomalias que podem indicar a possibilidade de vazamento.

A microfonia ou geofonamento utiliza a emissão acústica analisada por uma haste de escuta ligada a um decifrador (aparelho receptor) que escuta geofones eletrônicos ou mecânicos (aparelhos emissores) fixos em diversos locais ao longo das tubulações. Estes aparelhos usam o princípio da correlação ruído e vazamento. Por meio de análises de gráficos de frequência das ondas, a presença de picos de ruídos indica a possibilidade de vazamento num trecho da rede compreendido pela distância de dois geofones sucessivos instalados.

A leitura, por meio da reflectância de ondas do espectro infravermelho, pode detectar mudanças de temperatura ao longo dos tubos e zonas “mais frias” nas tubulações indicam a possibilidade de vazamento. Existe a possibilidade também de encontrar vazamentos de grandes proporções, ou seja, que envolvam perdas de grandes volumes de fluidos com o uso do sensoriamento remoto por satélites. Esta técnica utiliza a análise da reflectância das ondas do espectro infravermelho emitidas pelo solo onde estão enterradas estas tubulações de grandes extensões e diâmetros. De grande sofisticação tecnológica e ônus elevado, esta técnica é utilizada principalmente para monitoramento de tubulações que transportam óleo e derivados de petróleo em áreas remotas.

Os traçadores de radioatividade consistem na colocação de materiais radioativos nos fluidos das tubulações. Após esta colocação os locais onde se encontram as tubulações são varridos por aparelhos detectores e medidores de emissões radioativas, e uma leitura anormal destas emissões indica a presença de vazamentos. Os materiais radioativos utilizados nesta análise são de fluxo de emissão de duração curta (*vida curta*), não afetando dessa forma as pessoas e animais usuários destes fluidos por contaminações radioativas.

Os métodos não físicos se baseiam em modelos matemáticos que necessitam da aquisição de dados da rede. Com o advento da difusão da informática e desenvolvimento de *softwares* que utilizam sistemas SCADA (*Supervisory, Control And Data Acquisition*), o surgimento destes modelos foi facilitado. Os sistemas SCADA permitem o controle e supervisão de dados adquiridos de forma remota por meio de sensores de leitura localizados em pontos específicos das tubulações. Os dados dos sistemas SCADA são interpretados por estes *softwares*, permitindo uma obtenção, em tempo real, de valores variáveis como a vazão e a pressão.

Um exemplo de concessionária de distribuição de água, que utiliza sistemas em SCADA, é a CAGECE (Companhia de Água e Esgoto do Ceará) que, em 1999, adotou o sistema automatizado de controle e operação, o CECOP (Centro de Controle Operacional) para as regiões de Fortaleza, Caucaia e Maracanaú, municípios constituintes da região metropolitana da Capital do Estado do Ceará. Segundo Brandão Júnior (2004), um dos objetivos deste sistema é o controle maior das perdas de água não faturada, incluindo com isso as perdas físicas decorrentes dos vazamentos na rede de distribuição.

O uso de *softwares* que utilizam dados de sistemas SCADA facilitou o desenvolvimento de modelos matemáticos para localização e quantificação de vazamentos em redes de distribuição que usam dados transientes na solução de um problema inverso. Este modelo necessita a obtenção de valores de vazão ou pressão em curtos espaços de tempo em um ponto da rede de distribuição, realidade esta facilitada, portanto, por sistemas SCADA.

2.3 Definições dos modelos hidráulicos de calibração de rede de distribuição de água

Existem muitos modelos de calibração de rede de abastecimento de água, que se baseiam em formulações diretas e inversas, cujas soluções são operadas de forma direta ou indireta. Os dados a serem analisados podem pertencer a regimes permanentes ou transientes. Estes modelos são explicações matemáticas das características físicas e operacionais da rede hidráulica e são utilizados para simular as condições reais de seu comportamento.

Os métodos que analisam as redes de distribuição de água podem ser formulados de duas maneiras: o problema direto e o problema inverso. No problema direto as demandas e

demais características físicas da rede são conhecidas e intenta-se calcular as cargas hidráulicas nos nós e vazões nos tubos. No problema inverso, diferentemente do direto, existem somente algumas informações, como os dados de carga hidráulica em alguns nós, e por meio deste tenciona-se calcular ou estimar outros parâmetros da rede, entre eles: a rugosidade das tubulações, o seu diâmetro ótimo relacionado aos custos ótimos para execução da rede, as variações das demandas de consumo na distribuição, a quantificação e localização dos vazamentos, a localização e *status* de componentes hidráulicos como as válvulas de controle de vazão e pressão.

Os modelos que empregam a análise direta ou método direto, também conhecido como método explícito, são aqueles em que utilizam um sistema de n equações descritoras das características hidráulicas da rede, para n parâmetros desconhecidos. São modelos baseados em soluções de sistemas de equações onde o número de incógnitas utilizadas é igual ao número de parâmetros desconhecidos. Os parâmetros são dependentes das características da rede. Procura-se a resolução por soluções de matrizes ou séries numéricas.

Os modelos que empregam a análise indireta ou o método indireto baseiam-se em sistemas em que os parâmetros são encontrados por iterações sucessivas e o objetivo deste método é encontrar valores de parâmetros estimados o mais próximo possível de parâmetros medidos.

Os modelos podem realizar a análise em regime permanente que, de uma maneira geral, se guiam pela lei de conservação da massa e da energia. Uma das principais características deste modelo é o conhecimento das condições de contorno do problema e da quantidade de parâmetros indefinidos que possam ser resolvidos. As vazões nos tubos e cargas hidráulicas nos nós independem do tempo. As equações da continuidade em cada nó e as equações de conservação da energia para os elementos da rede, são as leis adotadas como regras básicas para modelos com análise de dados permanentes. A utilização deste modelo necessitaria de muitos valores de dados obtidos por longos períodos de análise acarretando assim altos custos (KARNEY; McINISS, 1990).

Outra forma de modelos são aqueles que realizam simulações em regimes não permanentes, ou seja, onde ocorrem variações de vazões e pressões ao longo do tempo. As obtenções destes dados transientes realizam-se de duas maneiras: medições de campo ou

medições sintéticas por meio de equações diferenciais parciais não lineares que são transformadas em equações ordinárias com o uso de métodos numéricos como o Método das Características (MOC).

Segundo Souza (1998) *apud* Araújo (2003, p.2), análise em regime não permanente em redes tem sido realizada, principalmente, de duas maneiras:

- predição de transientes rápidos com altas frequências, com o emprego do modelo da coluna elástica;
- predição de transientes lentos com baixas frequências, aplicando-se modelos da coluna rígida.

A análise transitória para muitos pesquisadores mostra-se mais efetiva, pois demonstra as condições reais das redes de água, já que existem variações da demanda durante o dia que provocam mudanças na velocidade do fluxo da água nas tubulações. Outra efetividade dos regimes transientes é a grande velocidade da onda de pressão (celeridade) em relação à velocidade do fluxo, o que permite que seja analisado somente um ponto da rede (tendo as variações de pressão e/ou vazão neste ponto) para compreensão e determinação de parâmetros em outros pontos diferentes daquele monitorado. A onda de pressão (celeridade) que surge no evento transiente ocorre em intervalos curtos de tempo e, por isso, a análise com dados transientes é diferente das obtidas em regime permanente, pois não necessita de tempos prolongados para sua avaliação, diminuindo assim o custo de obtenção destes dados e o tempo de simulação (KARNEY; McINISS, 1990).

2.4 Descrição de pesquisas relacionadas ao estudo

No começo dos anos 1990 até os dias atuais, pela importância, como já citado, da problemática dos vazamentos nas redes de distribuições de água, vários pesquisadores se dedicaram a este estudo, comparando dados de carga e vazão em diferentes técnicas de simulação e otimização.

Neste item descreve-se alguns trabalhos que envolvem a análise de redes hidráulicas com fluxo transiente pela solução do problema inverso de maneira direta ou indireta, com o uso de algoritmos genéticos ou técnicas outras usadas na calibração de

parâmetros desconhecidos da rede, visando a uma compreensão melhor e desenvolvimento deste trabalho, conforme descritos a seguir.

Chaudhry (1987) analisou o fluxo transiente por meio do Método das Características (MOC) com a transformação de equações diferenciais parciais não lineares em equações ordinárias, mediante um processo de linearização, mas embutindo uma estabilidade que é resolvida por meio da condição de Courant (C_N).

Sibetheros, Holley e Branski (1991) são outros pesquisadores que, de modo assemelhado, abordaram uma desvantagem do Método das Características (MOC) descrita pela necessidade de interpolar quando o tempo da velocidade da onda em todos os tubos da rede não é múltiplo do tempo de velocidade da onda no tubo menor. Para este propósito, utilizaram a interpolação linear do tempo e espaço, ou ajuste da velocidade da onda ou uma combinação dos dois. Eles realizaram com uma aplicação do Método das Características (MOC) a análise do fluxo transiente a uma tubulação horizontal sem atrito, por meio de interpolações polinomiais, e este resultado foi comparado com outros esquemas numéricos de solução.

Pudar e Liggett (1992) desenvolveram uma técnica de localização de vazamentos através de comparação de dados de vazão e pressão observados com os calculados em regime permanente em um nó ou poucos nós. Eles informaram também, que o modelo de localização e quantificação dos vazamentos depende da precisão das pressões medidas, da quantidade e locais destas medições e do conhecimento prévio dos fatores de atrito das tubulações.

Liggett e Chen (1994) formularam um método direto para determinação de parâmetros desconhecidos, por meio de métodos de gradientes que utilizam matrizes. A análise foi realizada com dados obtidos de um regime transiente, cuja onda de pressão refletia em toda a rede num intervalo de tempo muito curto. Por tal razão concluíram que, na determinação dos parâmetros, a coleta de dados podia ser feita em qualquer ponto da rede. Propuseram um modelo para solução deste problema inverso por um método direto, que compara dados de pressão medidos com calculados buscando minimização da diferença entre estes valores com o intuito de conseguir calibrar fatores de atritos dos tubos e encontrar as áreas de vazamento nos nós rede.

Righetto (1994) desenvolveu um algoritmo computacional baseado no Método das Características para transientes em redes. O modelo foi aplicado em redes sujeitas a pressões negativas, a variações de demanda, a processo de calibração dos coeficientes de atrito e a operação de sistemas contendo estações elevatórias, reservatórios de ponta, válvulas e *boosters*. O modelo mostrou obter melhores resultados do que o método da coluna rígida, tanto pela versatilidade de aplicação como pelo tempo de processamento para a obtenção da solução permanente.

Simpson, Dandy e Murphy (1994) compararam diversas técnicas de solução determinística de problemas, como a enumeração completa, programação linear e não linear com a técnica do algoritmo genético. Deduziram também que o uso do algoritmo genético é mais efetivo do que estas técnicas, apesar de requerer maior esforço computacional para solução de problemas de calibração. Utilizaram como parâmetro a descobrir o custo mínimo de uma rede com diâmetros ótimos de tubos de acordo com os comercialmente disponíveis. Em todas as técnicas abordadas, todas as soluções obedeceram às equações da conservação da massa e conservação da energia, assim como restrições de pressões mínimas e máximas e diâmetros mínimos e máximos previamente definidos.

Reis, Porto e Chaudhry (1997) aplicaram um algoritmo genético (AG) no problema de localização ótima de válvulas de controle em uma rede de abastecimento de água, visando à redução de vazamentos. O estudo levou em consideração a demanda da rede, a elevação dos reservatórios e o número de válvulas de controle de pressão. A eficiência no controle do vazamento foi obtida com poucas válvulas localizadas em posições ótimas e um acréscimo de seu número não implicou aumento significativo de redução de vazamento. Outro fato constatado foi que os vazamentos são mais sensíveis às variações da demanda e dos níveis dos reservatórios do que a presença de válvulas de controle de pressão em pontos ótimos (encontradas por um AG). Concluíram também que de maneira geral com relação ao valor dos vazamentos, a localização das válvulas é praticamente independente da demanda total.

Empregando um procedimento iterativo de dois passos, Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) estimaram o volume de água perdido em pequenos vazamentos em diferentes áreas da rede hidráulica. O primeiro passo utilizado foi a estimativa dos parâmetros da rede mediante um modelo de simulação hidráulica, obedecendo às equações da conservação da massa e da energia. Esta estimativa é obtida pela minimização de uma função objetivo igual

ao somatório dos quadrados das diferenças entre pressões medidas e calculadas mais o somatório do quadrado das diferenças entre vazões medidas e calculadas para um determinado número de nós e tubos. Na solução deste problema inverso, para estabilidade da solução fez-se necessária a diminuição do nível de parametrização, assumindo a posição que o fator rugosidade e o fator vazamentos são variáveis dependentes dentro de específicas áreas da rede chamadas zonas.

Com o uso do método transiente inverso (MTI), Vítkovský, Simpson e Lambert (2000a) calibraram o parâmetro rugosidade de uma rede hidráulica mediante uso do algoritmo genético como ferramenta de busca. A otimização deu-se num conjunto com valores discretos e contínuos de rugosidade das tubulações, sendo o menor erro, ou a melhor precisão encontrada na busca pelo AG a realizada em um espaço de busca com valores contínuos (infinitas soluções). Os autores usaram diferentes números aleatórios (*random number*) escolhidos de uma distribuição normal para gerar os valores das rugosidades calculadas utilizadas pelo AG na otimização.

Num modelo para detecção de vazamento, Covas, Ramos e Almeida (2000) desprezando a energia cinética dentro do tubo, a diferença de cota entre o tubo e o vazamento e a velocidade de percolação no solo da água, utilizaram-se da equação geral de descarga por orifícios para quantificação dos vazamentos, procurando o vazamento por meio de um método direto sob três pontos de vista. No primeiro enfoque é procedida à análise da onda de pressão refletida no vazamento e, para isso, é utilizado o Método das Características (MOC). No segundo é examinada a oscilação da frequência da onda de pressão em virtude do vazamento, pelas análises de Fourier. O último enfoque para busca do vazamento com dados transientes foi a solução do problema inverso, de acordo com o proposto por Liggett e Chen (1995), comparando valores de carga medidos e calculados por simulação computacional e buscando a minimização da função erro por meio do método direto derivativo proposto por Levenberg-Marquardt.

Vítkovský, Simpson e Lambert (2000b) utilizaram o método transiente inverso (MTI) para detecção e quantificação de vazamentos e calibração da rugosidade a partir do monitoramento da pressão em uma local da rede. As cargas simuladas foram calculadas pelo Método das Características proposto por Wilie e Street (1993), com a consideração de que os vazamentos somente ocorreriam nos nós da rede. Criaram um operador de cruzamento

(*crossover*) e mutação para uso no AG e conseguiram otimizar rugosidades e identificar vazamentos, dando resultados mais precisos para o primeiro.

Kapelan, Savic e Walters (2000) propuseram modelos para a otimização do parâmetro rugosidade e localização e identificação de vazamentos em uma rede hipotética de distribuição de água, por meio de dados transientes. Compararam os resultados dos valores ótimos encontrados daqueles parâmetros pelo algoritmo genético (AG) com um modelo híbrido, o qual utilizava o método de busca global do AG associado ao método do gradiente proposto por Pudar e Liggett (1992), o método de Levenberg–Marquardt (LM) para a solução do problema inverso. Consistia esta hibridação em um processo no qual, a partir da melhor solução encontrada pelo AG ser usada como ponto inicial para o método derivativo de Levenberg–Marquardt (LM).

Gambale (2000) otimizou o parâmetro rugosidade, utilizando a técnica do algoritmo genético e seus operadores como o cruzamento (*crossover*) e mutação aplicada a uma função objetivo. O algoritmo genético era a ferramenta de busca para encontrar o mínimo global da equação expressa pela função objetivo. O modelo utilizou o simulador hidráulico EPANET para calcular as pressões observadas e calculadas comparadas em uma função objetivo. O critério de parada do AG deu-se após várias iterações quando o valor da função objetivo foi minimizado para valores iguais ou próximos da precisão estipulada, gerando como resultado uma população de rugosidades otimizadas para a rede estudada.

Covas e Ramos (2001) utilizaram a análise transiente inversa por meio de um *software* computacional para comparar com dados obtidos de uma rede real criada em laboratório. Utilizaram um modelo de otimização pelo método indireto para minimização da função objetivo para detecção de vazamentos. O método derivativo de Levenberg–Marquardt e o algoritmo genético (AG) foram utilizados como ferramenta de busca. Deduziram também que o estado permanente dificilmente existe em redes reais, e fazer a análise em estado permanente torna-se inadequado para o monitoramento contínuo de sistemas hidráulicos. Chegaram as seguintes conclusões sobre a eficiência do método transiente inverso e sua dependência em relação aos fatos: a) a precisão do simulador transiente para reproduzir o comportamento do sistema; b) a incerteza dos dados coletados, como o tamanho da amostra e a localização dos locais de medição; c) o sincronismo das medições com relação ao tempo e nível dos dados; d) a precisão da estimativa dos valores dos principais parâmetros da onda de

pressão (a celeridade), como o valor da sua velocidade, a rugosidade dos tubos utilizada e o tempo de fechamento da válvula que gerará o transiente.

Brunone e Ferrante (2001) realizaram um experimento para localização e quantificação de vazamento em uma rede de tubos colocados num laboratório com água pressurizada por uma bomba e uma válvula de manobra, próximo ao local de medição. Foram obtidos diferentes históricos de dados de pressão para diferentes valores de vazão de descarga, com diversos formatos de orifícios de vazamento e com a descarga em meio submerso e no ar. Concluíram que a localização do vazamento pode ser determinada por uma aproximação de 1ª ordem, de acordo com dados experimentais dependentes do tempo que a onda de pressão (celeridade) percorre do vazamento para o local de medição ou vice-versa. A magnitude ou quantificação do vazamento pôde ser obtida pela análise inversa dos dados transientes obtidos ao longo do tempo do evento transitório.

Silva e Reis (2002) realizaram um trabalho que enfoca uma simulação hidráulica de uma rede mediante a formulação de um modelo hidráulico de redes, cuja solução direta para o cálculo das pressões nos nós e vazões nos trechos da rede (dados observados) é obtida por meio de procedimentos computacionais, usando linearizações sucessivas, com valor inicial de rugosidade estimada e conhecida. A calibração se deu para o parâmetro rugosidade por meio da análise de uma função objetivo que comparava dados de vazões e cargas observados com calculados. A solução do problema adotou um método iterativo indireto presente em um processo de otimização por um tipo de AG, chamado *AG Steady State*, na busca da solução ótima da função objetivo.

Mpesha, Chaudhry e Gassman (2002) desenvolveram um método direto para localização de vazamento e sua quantificação pela análise do estado não permanente do fluxo provocado pela abertura e fechamento de uma válvula. O sistema analisado era formado por um reservatório a jusante, conectado a um tubo com uma válvula à montante. Utilizaram o Método das Características (MOC) para descrever e calcular o fluxo transiente. Reproduziram-se os diagramas de pressão e vazão em frequências pelo método da transformada rápida de Fourier. Os picos de frequências dos sistemas com vazamentos e dos sistemas sem vazamentos foram comparados para localização do vazamento mediante recursos computacionais.

Vítkovský *et al.* (2003) elaboraram um estudo no qual procuraram a localização ótima dos locais de medição para a melhor obtenção dos resultados, pela análise transiente inversa em uma rede de porte pequena e grande. De maneira geral, a escolha da configuração ótima dos locais de medição passou por uma solução de análise combinatória. Naquele trabalho ficou estabelecido que os locais de medições ocorreriam somente nos nós. Foram utilizados como critérios de avaliação do desempenho do algoritmo de cálculo, o critério de minimização de uma função objetivo (critério Na) e de maximização de uma função objetivo (critério Nd) para comparação dos resultados dos parâmetros a serem encontrados, como rugosidade dos tubos e/ou vazamentos. Concluíram que o critério de maximização (Nd) é mais eficaz para encontrar os resultados da melhor configuração de locais de medições, se comparado ao outro critério, o de minimização (Na).

Soares (2003) elaborou rotinas computacionais para calibração de modelos de redes de abastecimento em termos dos parâmetros rugosidades absolutas, diâmetros, cotas topográficas, demandas e coeficientes de perdas por vazamento, bem como localização e *status* de componentes hidráulicos. Estes problemas inversos a sua solução por métodos indiretos foram encontradas por meio da minimização da diferença de variáveis observadas e simuladas, como pressão e vazão. Para isso usou-se um simulador hidráulico de domínio público, o EPANET 2.0 que, por meio de um método direto calculou as vazões nos tubos e cargas nos nós de uma rede hipotética conjuntamente com algoritmos de otimização usados como ferramenta de busca das soluções ótimas de seus modelos. Os algoritmos de otimização usados foram AG geracionais, AG *Steady State* e AG híbrido, ou seja, AG associados a métodos de gradiente como o método simplex proposto por Nelder e Mead (1965).

Araújo (2003) desenvolveu um método para estimar parâmetros de uma rede hidráulica, a partir de dados de carga obtidos em regime transiente. As condições permanentes são desconhecidas e obtidas pelo Método das Características (MOC) aplicadas na solução das equações do escoamento transiente no tubo. Aplicou a solução inversa através do Método Transiente Inverso (MTI), junto com um algoritmo genético (AG) para otimização de parâmetros que devam ser estimados, como a rugosidade absoluta, diâmetros e quantificação e identificação de vazamentos. Para isso foi empregada uma rede exemplo de abastecimento de água, onde foi produzido o evento transiente pela abertura e fechamento de uma válvula em um dos nós da rede.

Pizzo e Luzivotto Júnior (2004) utilizou-se de um simulador hidráulico acoplado a um algoritmo otimizador proposto por Nelder e Mead (1965), para calibrar rugosidades de uma rede hidráulica. O simulador utilizou o método *Time Matching Approach* (TMA) ou marcha de aproximação pelo tempo por meio do qual é realizada uma convergência física (supostamente real) de dados de carga por meio de um transitório hipotético, alcançando dados de carga do regime permanente final. Buscaram otimizar coeficientes de rugosidade, e a calibração deu-se pelo método inverso direto proposto por Nelder e Mead (1965) pela minimização de uma função objetivo.

Rossignaux e Fernandes (2004) elaboraram um estudo sobre a redução das perdas físicas e seus aspectos econômicos em uma rede hipotética de distribuição de água. Abordaram diferentes aspectos da redução das perdas físicas em relação à proteção hidráulica da rede, por meio de simulações de diferentes vazamentos nos nós. Concluíram que as ocorrências de vazamentos na rede atenuam significativamente a pressão hidráulica nos nós, porém este efeito não é linear e sim dependente da topologia da rede e suas características hidráulicas. Deduziram também que a presença de vazamentos implicaria um aumento progressivo e prejudicial de demanda de água para manter o perfeito abastecimento da rede aos seus usuários, o que resultaria em um aumento do consumo de energia com bombeamento para suprir esta elevação de demanda.

Solano *et al.* (2004) analisaram os diversos modelos de simplificação de cálculo para redes hidráulicas, que buscam associar tubulações com diversos consumos intermediários com consumos concentrados nos nós. Abordaram o fato de tubos equivalentes podiam substituir outros com algumas características homogêneas, somente se o mesmo possuir a perda de carga igual ao valor da soma das perdas de cargas dos tubos que ele venha a substituir. Concluíram também que se considerado um fator de partição dos consumos para os nós extremos dos trechos, com eliminações dos consumos intermediários, os erros provocados por este modelo de simplificação de cálculo seriam muitos pequenos.

Stephens *et al.* (2004) elaboraram um estudo sobre o *status* de uma válvula em uma rede de distribuição de água. Esclareceram que, de acordo com a topografia onde a rede está instalada, fechar uma válvula pode deixar consumidores sem água ou provocar o rompimento nas tubulações por causa do aumento da pressão provocada pelo transiente. Utilizaram-se de um problema de análise combinatória, onde o *status* da válvula foi definido

como de 0 ou 1 para aberta ou fechada respectivamente, e de um algoritmo genético para otimizar através da análise transiente inversa, a melhor opção de operação da válvula em consonância com o *design* da rede.

Kapelan, Savic e Walters (2005) formularam metodologias para o tamanho ótimo de amostras de dados de pressão coletadas em um nó da rede de distribuição de água, para serem usados em modelos de calibração. Propuseram dois modelos, que tinham como ferramenta de busca o algoritmo genético, sendo o primeiro modelo baseado em uma única função objetivo (SOGA - *Single Objective Genetic Algorithm*), cuja aproximação entre dados medidos e calculados é feita com pesos aproximados para dois parâmetros combinados resultando em apenas uma equação. No segundo modelo são aplicadas várias funções objetivas com diferentes pesos aplicados em seus parâmetros surgindo o MOGA (*Multiple Objective Genetic Algorithm*), onde a aproximação se dará após o escalonamento pelo método do *Pareto* ótimo que procura o conjunto de todas as soluções não-dominadas do espaço de busca. Os resultados mostraram as vantagens e desvantagens de cada modelo, sendo que o MOGA apresentou mais vantagens em comparação ao modelo SOGA, para otimização do tamanho da amostra de dados.

2.5 Alguns programas de modelagem hidráulica disponíveis no mercado

Existem diversos programas ou *softwares* disponíveis no mercado que realizam operações de modelagem, como calibração e otimização de características físicas de uma rede distribuição de água, e o cálculo das condições permanentes em redes anelares ou ramificadas no tocante a vazões nas tubulações, pressões e cargas hidráulicas nos nós. Alguns programas permitem colocação de dados de SIG (Sistemas de Informações Geográficas), cuja sigla em inglês é GIS (*Geographic Information System*). Estes sistemas trabalham com informações georreferenciadas. Outros permitem que sejam inseridos dados de plataformas (sistemas de informática) gráficas como o *software* CAD, inteliCAD e outros. Alguns programas permitem também que sejam capturados dados de sistemas SCADA.

A *Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management - SKAT* (2002), fundação de pesquisa e desenvolvimento científico, publicou em 1998 a primeira edição de uma visão dos programas de computação para rede de abastecimento de

água, sendo alguns descritos neste trabalho com base numa publicação mais atual de junho de 2002. Diversos *softwares* são citados, cujas apresentações resumidas são mostradas a seguir.

- AQUANET: permite simulação e modelagem de sistemas pressurizados com interface gráfica em linguagem Java, e opera com sistemas de informações geográficas (SIG). Trabalha em vários sistemas operacionais (Windows, Linux, Solaris e Aix). Possui modelos de bombas, válvulas, reservatórios e nós. Faz modelagem de qualidade da água e otimização em redes. Desenvolvido, desde 1992, pela *Finite Technologies Inc.* dos Estados Unidos da América (EUA). Disponível no idioma inglês.

- ARCHIMEDE: criado no sistema operacional Windows, permite a análise de redes de distribuição de água e gás. Foi desenvolvido pela *Proteo. S.R.I.*, da Itália, em 1986. Analisa a rede e define as suas condições em estado permanente, tem interface gráfica que permite dar cores diferentes às tubulações, facilitando assim melhor interpretação dos dados. Possui ainda um algoritmo para resolver fórmulas complexas das perdas de cargas baseada na equação da continuidade e equação do momento, por meio de iterações não lineares. Disponível nos idiomas italiano, inglês, francês e alemão.

- BRANCH/LOOP: *software* desenvolvido pela Universidade da Carolina do Norte (EUA) em 1970, com o apoio financeiro do Banco Mundial e organismos regionais de financiamento, para atender aos países em desenvolvimento no planejamento e desenho de sistemas de distribuição de água que venham operar. Utiliza o sistema operacional MS-DOS e é escrito numa linguagem de um dos seus aplicativos, o Quick-Basic. Serviu de base para o desenvolvimento de sistemas de simulação e otimização futuros. Atua em redes ramificadas (*branched*) de três tipos e de circuitos fechados ou anelares (*loop*). Baseados em programação linear, os dados de entrada são o comprimento dos tubos, diâmetros, fator de atrito, demanda nos nós, cotas topográficas dos seus elementos, assim como a descrição geométrica da rede. Os dados de saída viabilizam o menor custo para vazões e pressões preestabelecidas, auxiliando no *design* final da rede. Disponível no idioma inglês, o seu acesso é livre.

- CROSS (WATERPAC): criado para uso em redes de distribuição de água ramificadas, anelares ou sistemas com os dois presentes. Desenvolvido em sistema operacional Windows, permite interface gráfica com o Auto-CAD R-14. Utiliza o método

linear de Prandtl-ColeBrook e Hardy-Cross para cálculo de pressões e vazões. Sua capacidade máxima é para o cálculo de redes com até 10.000 nós. Os dados podem ser armazenados em formato do aplicativo Access da Microsoft, facilitando o relacionamento com outras aplicações baseadas em SIG. Foi criado pela *Rehm Software GmbH*, da Alemanha. Disponível nos idiomas alemão, inglês e francês.

- ERACLITO: baseado na plataforma do sistema operacional Windows, pode avaliar redes em conduto fechado (redes de distribuição de água, gás, linhas de recalque, outros) e canais abertos (redes de esgoto, canais de drenagem, outros) em regime permanente ou transiente, permitindo a variação das vazões para estes dois estados. Permite o processamento e avaliação de redes integradas a sistemas SIG e sistemas de administração e controles remotos (SCADA). O ambiente do programa aceita interface gráfica e os dados de entrada podem ser importados como vetores ou formato *raster*. Os dados de saída podem ser exportados em diferentes formatos. Pode fazer modelagem de matérias poluentes nas tubulações para sistemas SIG ou SCADA. Desenvolvido pela *Proteo S.R.I.*, da Itália, sendo disponível nos idiomas italiano e inglês.

- EPANET 2.0: criado em ambiente Windows, permite o desempenho de longos períodos de simulações hidráulicas e de comportamento da qualidade da água em redes de condutos forçados. A rede pode consistir de tubos, nós, bombas, válvulas de descargas e reservatórios. O EPANET simula vazão em cada tubulação, a pressão em cada nó ou reservatório, a concentração de substâncias químicas ao longo das tubulações da rede durante um período de simulação com vários intervalos de tempo. Com relação a simulações de qualidade da água no tocante a agentes poluidores, pode ainda definir de acordo com as equações de diluição das substâncias químicas adicionadas à água das redes de distribuição, o tempo de presença da fonte poluidora. Possui interface gráfica e permite associação com sistemas SIG e gráficos como o CAD. Importa textos em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) e seus dados podem ser manipulados ou armazenados em linguagem dos aplicativos *Delphi* ou *C++*. Este *software* serviu de base para vários experimentos e trabalhos científicos de calibração e otimização de redes de distribuição de água. Serviu de base também para origem de outros simuladores hidráulicos comerciais, como o *DHI*, *KYPIPE*, *MWH-Soft* e *Haestad Methods*. Foi desenvolvido pela EPA (*Environmental Protection Agency*), a agência de proteção ambiental dos EUA. Sendo de domínio público pode ser facilmente copiado e distribuído. Disponível em vários idiomas, porém existe uma

versão do EPANET 2.0 em português, criada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa.

- HELIX delta-Q: *software* que constitui uma ferramenta poderosa para uso por engenheiros e empresas de distribuição, pois é de fácil manuseio e rapidez na otimização de desenhos de redes de líquidos compressíveis ou não, como líquidos, gases e dejetos. Possui uma biblioteca com interface gráfica. Os dados de saída podem ser em CAD.dxf ou em dados do aplicativo Excel da Microsoft. Desenvolvido pela *Helix Technologies Pty Ltd*, da Austrália, em 1991, porém já possui versões recentes que incorporam melhoramentos. Disponível no idioma inglês.

- H₂ONET/H₂OMAP: programa de relacionamento de dados para modelagem, análise, desenho, otimização e readequação de redes de distribuição. O seu desempenho abrange modelagem hidráulica e dinâmica da qualidade da água, consumo de energia, avaliação de custos, controle de vazamentos, localização de válvulas, análise e controle de vazão de hidrantes e simulação com dados obtidos em tempo real mediante uma interface com sistemas em SCADA. Na simulação e otimização hidráulica, assim como na análise da qualidade da água utiliza o algoritmo genético como ferramenta de busca, com a elaboração de sofisticados gráficos de apresentação. Permite, ainda, visualizar a rede em sistemas bi ou tridimensional com interface gráfica colorida. Importa dados em formato ASCII, database ou SIG. Desenvolvido pela *MWH-Soft, Inc.* dos EUA, disponível no idioma inglês.

- MIKE NET: avançado programa computacional baseado no EPANET para modelagem de redes de distribuição. Permite a análise de redes por completo ou em partes, em regimes permanentes ou períodos estendidos para análise da qualidade da água. As redes podem ser desenhadas com informações advindas de sistemas que manipulam dados de SIG como o ArcInfo, ArcView, ArcFM ou MapInfoGIS. Existe a possibilidade de criar animações para análise de períodos estendidos. Nas calibrações por meio do algoritmo genético, os dados podem ser armazenados e manipulados pelo aplicativo Access da Microsoft. Desenvolvido pela *Boss International, Inc.* dos EUA, está disponível em vários idiomas, como inglês, francês, alemão, espanhol, tcheco, russo e outros.

- NETIS: é um programa que serve como ferramenta de auxílio para a criação de sistemas de distribuição ou para aperfeiçoamento dos sistemas existentes. Utiliza técnicas de otimização para análise do menor custo de rede implantada, de acordo com o tipo de serviço especificado pelo usuário. Esta otimização ocorre por intermédio de rotinas de menor custo, para diâmetros ótimos dos tubos e pressão nos nós acima da mínima requerida. Pode propor também uma pressão para certas áreas selecionadas, no intuito de melhor localizar válvulas de controle de fluxo cuja função é evitar danos nas tubulações provocadas por pressões excessivas. O *software* foi programado em linguagem visual C⁺⁺, e cria modelagem de demandas de consumo e localização de válvulas de controle. Foi desenvolvido pela Universidade de South Bank, da Inglaterra. É de domínio público (distribuição gratuita) e disponível no idioma inglês.

- OPTIDESIGNER: *software* que aperfeiçoa o desenho de redes de distribuição de água usando o algoritmo genético (AG). Utiliza o EPANET como o simulador hidráulico e otimiza a rede procurando o custo mínimo, de acordo com as seguintes condições: mínima e máxima pressão nos nós, mínima e máxima velocidade nas tubulações e máxima vazão nos tubos. Pode ser utilizado como otimizador do desenho das redes a serem implantadas ou existentes, visando ao seu custo mínimo de execução, possibilitando com isso uma expansão futura da rede existente ou projetada. Desenvolvido pela *Optiwater, Inc* de Israel, disponível no idioma inglês e hebraico.

- PIPE2000: programa de modelagem de redes hidráulicas para vários propósitos, com análise em estado permanente (KYPIPE2000) ou transiente (SURGE2000). Pode modelar efeitos hidráulicos, assim como qualidade da água ou mesclar estes objetivos. É largamente utilizado em sistemas de abastecimento humano e em outros sistemas como água quente, irrigação e incêndio. Podem modelar sistemas contendo outros fluidos além da água líquida como vapor d'água, óleos e gases. Possui vasta biblioteca com elementos gráficos, como nós, tubos, válvulas, reservatórios e outros. Tem a capacidade de calibrar mediante AG, a rugosidade das tubulações pela idade de uso dos tubos. Com a utilização de pacotes de programas adicionais, podem modelar sistemas de drenagem de águas pluviais (STORM2000) e sistemas de tubulações de gás (GAS2000). Podem capturar dados de aplicativos, como o CAD, sistemas GIS e planilhas do Excel da Microsoft. Foi desenvolvido pela *Civil Engineering Software Centre* da universidade do Kentucky, EUA. Disponível no idioma inglês.

- STANET: é um aplicativo computacional integrado para análise de redes, sendo usado para o cálculo de vazão de fluidos e gases que são empregados em sistemas dos mais diversos fins, como distribuição de água, redes de vapor para aquecimento, oleodutos, redes pressurizadas e outras. Além dos cálculos, os dados de entrada podem ser importados de aplicativos gráficos como CAD e sistemas GIS, o que permite uma maior flexibilidade para o usuário. Realiza otimizações de redes com o objetivo de calibrar diferentes parâmetros, entre eles a relação menores diâmetros e custos de execução, por meio de rotinas computacionais diferentes, que podem a ele ser anexadas. Desenvolvido pela *Ingenieurbüro Fisher – Uhring*, da Alemanha. Disponível na língua inglesa, alemã e polonesa.

- WADISO SA: o programa originou-se do modelo *Wadiso*, desenvolvido pela Universidade do Colorado, para o Corpo de Engenheiros do Exército Americano (EUA). Foi depois substancialmente melhorado pela *GLS Engineering Software Pty Ltd.* da África do Sul. Tornou-se uma ferramenta de uso por engenheiros, para desenhar, calibrar, modelar, analisar e gerenciar sistemas de distribuição de água. Composto de três módulos, a saber: módulo de análise em regime permanente com cálculo de vazões e pressões da rede de distribuição por meio de dados de entradas oferecidos pelo usuário; módulo de simulação por período estendido para obter e analisar as flutuações da demanda diurna, o funcionamento das bombas, a localização e manobra de válvulas ou outros itens que se intente monitorar; módulo de otimização para determinação da demanda futura e otimização do sistema pelo custo mínimo operacional. Aceitam dados de aplicativos como o CAD, sistemas GIS e outros. Disponível no idioma inglês.

- WATERCAD 5.0: programa usado para análise de rede de distribuição de água, sistemas de esgoto, de proteção contra incêndio, controle de bombas e outras finalidades. Permite a calibração de vários tipos de redes, desenvolvimento de plantas de desenho, condução de estudos operacionais e análise dos custos de operação e implantação. Pode realizar análises instantâneas da rede, assim como por períodos estendidos, para visualizar o comportamento da rede por períodos de tempo maiores. Esta versão possui editor gráfico avançado, que produz animações gráficas e permite diversificar as cores, facilitando a individualização e visualização das diferentes tubulações ou elementos da rede. Pode realizar, além das análises hidráulicas, a análise da qualidade da água presente nas tubulações por longos períodos, e pode executar controle remoto de elementos da rede (bombas e válvulas)

pela interface de sistemas de dados em SCADA e SIG. Desenvolvido pela *Haestad Methods, Inc.* dos EUA. Disponível no idioma inglês, espanhol, português e chinês.

2.6 O Algoritmo genético (AG)

2.6.1 Histórico sobre o algoritmo genético

Desde os primórdios da humanidade, os conhecimentos prévios dos fenômenos naturais, sociais e culturais foram alvos de busca incessante por parte do ser humano. Prever com certo grau de incerteza as mudanças climáticas, o movimento dos planetas, os eclipses lunar e solar, o surgimento das doenças, as oscilações dos indicadores econômicos, as evoluções culturais e políticas, sempre foram fontes da intenção do homem. Com o advento da ciência e sua evolução, na atualidade, porém, pode-se afirmar que boa parte dos fenômenos é dotada de alta complexidade, limitando assim sua perfeita previsão. Desta interação e estudos destes fatos, surgiu o conhecimento de que certos fenômenos possuem determinado grau de controle, ou melhor, são guiados pela aleatoriedade.

Com o surgimento dos computadores, a ciência foi auxiliada por esta nova e melhor ferramenta no estudo e previsão dos fatos, e com esta importante evolução tecnológica, provocou-se o surgimento de um fenômeno: a inteligência artificial.

A inteligência artificial tornou-se uma abstração para criar modelos computacionais que, inspirados no comportamento cerebral humano, apresentassem características semelhantes, como: aprendizado, associação, generalização e abstração. Tentava dessa forma uma analogia da Ciência Computacional com a Biologia e a Psicologia. Neste contexto, muitos pesquisadores desenvolveram atividades buscando o aperfeiçoamento dos sistemas computacionais por meio de redes neurais, baseadas nas técnicas de aprendizagem para máquinas e no cálculo evolucionário (BITTENCOURT, 2001).

A partir da década de 1960, foi-se incrementado o estudo de sistemas evolucionários, que criaram um paradigma na Ciência da Computação para a solução dos problemas. Este paradigma era diferente do convencional pelo fato de não se conhecer previamente a forma de solucionar o problema, mas resolvê-lo com base nos mecanismos da

evolução natural das espécies. Criou-se, com efeito, uma nova ferramenta utilizada pela Engenharia para solução de problemas de otimização, a Computação Evolutiva (BITTENCOURT, 2001).

A técnicas de otimização baseadas na evolução natural resultou em técnicas estocásticas chamadas de algoritmos evolucionários, compostos por três processos principais: a programação evolutiva (PE), as estratégias evolutivas (EE) e os algoritmos genéticos (AG).

A programação evolutiva foi proposta por Fogel, Owens e Walsh, em meados da década de 1960, com o estudo do comportamento das máquinas cuja programação se adaptava a qualquer estrutura de problema. Gerava uma população de soluções randomicamente e por meio de mutações em cada solução, criava-se uma nova população. As estratégias evolutivas tiveram origem na Universidade Técnica de Berlim, em 1964, onde dois estudantes Ingo Rechenberg e Hans-Paul Schwefel provocaram alterações randômicas nos parâmetros que definiam as formas dos objetos inseridos em um fluxo de vento, baseando-os na seleção natural, já que outros métodos de gradientes falharam. Esse estudo foi aplicado em aperfeiçoamento de aerofólios de aeronaves. As duas técnicas ainda constituem objeto de estudo atualmente, independentemente dos algoritmos genéticos (BITTENCOURT, 2001).

O algoritmo genético (AG) foi introduzido por John Holland (1975) e popularizou-se por um de seus alunos, David Goldberg (1989). Baseados no princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, conforme declarado pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin em seu livro *A Origem das Espécies*, “Quanto melhor o indivíduo de se adaptar ao seu meio ambiente, melhor será a chance de sobreviver e gerar descendentes”. Ao contrário das teorias evolutivas, como as estratégias evolutivas e programação evolutiva, os algoritmos de Holland não procuravam a solução de problemas específicos, mas estudar o fenômeno da adaptação, como ocorre na natureza, e desenvolver assim modelos em que os mecanismos da adaptação natural pudessem ser importados para sistemas computacionais.

O algoritmo genético de Holland era um método baseado nas técnicas de aprendizado das máquinas, quando as mencionava como agentes classificadores. A grande mudança foi inspirar este aprendizado nos mecanismos de evolução da natureza, a seleção dura. A partir de uma população inicial de soluções, chamadas de cromossomos, que eram representados por *strings* 1 ou 0 também chamados bits, produzia-se nova população através

dos mecanismos da seleção natural e genética, como o cruzamento e mutação. Aqui por exemplo há uma reprodução sexuada diferente da presente na programação evolutiva (assexuada), onde somente o operador de mutação está presente. Os cromossomos são compostos de genes (1 ou 0) e, por meio de um operador de seleção escolhem-se os mais aptos a se reproduzirem e gerarem descendentes para compor a nova população .

Através deste pensamento de Holland, onde uma população inicial geraria outras populações usando operadores de cruzamento e mutação, tornou-se a grande inovação que a diferenciou das outras teorias evolutivas, e fez com que a evolução computacional tomasse um novo e importante enfoque na solução de problemas.

2.6.2 Estrutura de um algoritmo genético e sua analogia biológica

Os algoritmos genéticos baseiam-se na teoria da evolução das espécies de Darwin, ao determinar que os indivíduos mais adaptados ao meio ambiente terão mais chances de sobrevivência e reprodução. Em decorrência de tal constatação, pode-se dizer que somente os mais aptos conseguem se reproduzir, uma vez que os menos hábeis geralmente são eliminados antes de gerarem descendentes. Na reprodução ocorrem fenômenos como mutação e cruzamento, entre outros, que atuam sobre o material genético armazenado nos cromossomos. Estes fenômenos levam à diversificação dos seres vivos na população. Sobre esta população não uniforme age a seleção natural, permitindo a sobrevivência apenas dos seres mais adaptados.

Um algoritmo genético é a metáfora desses fenômenos, o que explica por que AG's possuem muitos termos originados da Biologia. Descreve-se a seguir os principais termos encontrados nas literaturas.

- Cromossomo e genoma: na Biologia, o cromossomo é um corpo filamentosos constituído de DNA (ácido desoxirribonucléico) e proteínas presente em todos os núcleos das células dos animais e vegetais, e são responsáveis pela transmissão das informações genéticas. O genoma é o conjunto completo de genes de um indivíduo. Nos AG's representam as possíveis soluções do problema mediante uma estrutura de dado, ou seja é um ponto ou vetor no espaço de busca.

- Gene: na Biologia, é a unidade básica e de material hereditário do cromossomo que de acordo com sua posição e valores determinam uma característica que define uma função biológica no organismo. Nos AG's, é um parâmetro codificado, as diversas variáveis que representam um cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o cromossomo.
- Indivíduo: na Biologia, um simples membro da população que interage com o meio ambiente. Nos AG's, um indivíduo é uma possível solução para o problema.
- Genótipo: na Biologia, representa o arranjo da composição genética contida no genoma. Nos AG's, representa a informação contida no cromossomo ou genoma.
- Fenótipo: na Biologia, representa o conjunto das características da estrutura de um organismo construído a partir das informações do genótipo. Nos AG's é o cromossomo decodificado. Por exemplo, considere que o cromossomo codifica parâmetros, como as dimensões das vigas em um projeto de construção de um edifício, ou as conexões e pesos de uma Rede Neural. O fenótipo seria o edifício construído ou a Rede Neural.
- Alelo: na Biologia, são genes que ocupam a mesma posição no cromossomo, unem-se aos pares na meiose e podem mutar de um para outro. Nos AG's representa os valores que o gene pode assumir. Por exemplo, um gene que pode ser 0 ou 1 na representação binária ou outros parâmetros como a cor de um objeto podendo ser alelo azul, preto, verde, etc.
- Epistasia: na Biologia é a interação dos genes do cromossomo, isto é, quando o valor de um gene influencia o valor de outro gene. Problemas com alta epistasia são de solução difícil por AG's.

O algoritmo genético é a ferramenta de busca utilizada para encontrar um ponto ótimo de uma função. Eles principalmente tiveram esta conotação após a publicação do trabalho de Goldberg (1989), onde a idéia da otimização passou a ocupar o lugar central da teoria dos AG's.

A otimização consiste em buscar a melhor solução para um problema e geralmente apresenta: um espaço de busca onde estão todas as soluções possíveis do problema, e uma função objetivo, que no AG pode ser chamada de função aptidão, por meio da qual se dará um determinado valor a cada uma das soluções encontradas.

Em termos matemáticos, a otimização consiste em encontrar o ponto máximo e mínimo de uma função objetivo. O AG apresenta grande vantagem sobre outros métodos de busca convencionais (como o do gradiente) na procura de um ótimo global, pois uma função pode ter vários mínimos ou máximos locais que não representam o máximo ou mínimo globais da função. Logo, diferentemente dos AG's, métodos de busca convencionais geralmente não podem encontrar pontos mínimos ou máximos globais.

O algoritmo genético típico se inicia com a geração de uma população inicial de cromossomos, que representa o conjunto aleatório de todas as possíveis soluções do problema a ser resolvido. A etapa posterior é avaliar cada cromossomo da população, dando-lhe uma nota (ou aptidão), refletindo a qualidade da solução que ele representa. Em geral, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados (Darwinismo). No processo evolutivo, os membros selecionados podem ser objetos de modificações em suas características mediante operadores de *crossover* (cruzamento ou recombinação) e mutação, gerando descendentes para a próxima geração. O processo se repete até que seja atingida uma resposta satisfatória para a solução do problema. A figura 7 a seguir demonstra este processo:

```

Seja  $S(t)$  a população de cromossomos na geração  $t$ .
 $t \rightarrow 0$ 
inicializar  $S(t)$ 
Avaliar  $S(t)$ 
Enquanto o critério de parada não for satisfeito faça
     $t \rightarrow t + 1$ 
    selecionar  $S(t)$  a partir de  $S(t-1)$ 
    aplicar cruzamento sobre  $S(t)$ 
    aplicar mutação sobre  $S(t)$ 
    avaliar  $S(t)$ 
Fim enquanto

```

FIGURA 7 – Algoritmo genético típico

Fonte: Gen e Chen (1997, p. 2).

Pode-se descrever que começa com uma população inicial de n cromossomos, gerados aleatoriamente. Após a geração da população inicial, os cromossomos s_i são avaliados e a eles atribuídos uma aptidão f_i , que informa o quanto é boa a solução codificada em s_i . O AG aplica os operadores de cruzamento e mutação nos melhores cromossomos da população inicial para gerar cromossomos filhos, por um processo de seleção. Os operadores de cruzamento e mutação constituem os mecanismos dos AG's que gerarão um grande número de cromossomos (soluções), de forma a promover uma varredura tão extensa quanto necessária do espaço formado pelas soluções.

2.6.3 Representação dos parâmetros

Um AG processa populações de cromossomos. Um cromossomo é uma estrutura de dado, geralmente vetor ou cadeia de bits que representa uma possível solução do problema a ser otimizado. Em geral, um cromossomo representa um conjunto de parâmetros da função objetivo, cuja resposta será maximizada ou minimizada. O conjunto de todas as configurações que o cromossomo pode assumir forma o seu “espaço de busca”. Se o cromossomo representa n parâmetros de uma função, então o espaço de busca possui n dimensões.

Os AG's trabalham com representação dos parâmetros de forma codificadas para facilitar a utilização dos operadores genéticos. Estes podem ser representados de forma binária ou real.

Representação binária

Segundo Gambale (2000, p. 51) se V é um conjunto de inteiros pertencentes ao intervalo de $\{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$ pode-se codificá-lo usando a representação binária, $e = [b_0 \dots b_l]$, com l “bits”, onde $bin_i \in \{0, 1\}$ de tal forma que:

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (2.1)$$

Se $V \in \{m, m + 1, \dots, m + 2^l - 1\}$ então pode-se codificar a variável $V - m$ da mesma forma.

Qualquer número inteiro pode ser definido na base binária, ou potência de dois. De forma assemelhada, os números inteiros naturais são representados por algarismos na base decimal (potência de dez). Logo, o número 43747 pode ser descrito por:

$$7 \times 10^0 + 4 \times 10^1 + 7 \times 10^2 + 3 \times 10^3 + 4 \times 10^4 + 7 \times 10^5$$

Um número na base binária utilizada pelos computadores é composto pelos bits 0 ou 1, portanto, analogamente, o número 111101 representa:

$$1 \times 2^0 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^5 = (61)_{\text{decimal}}$$

Podemos notar que em ambas as representações, decimal e binária, os números são decompostos em soma dos algarismos multiplicados com as respectivas potências elevadas a sua posição da direita para a esquerda.

Para converter um número na base decimal para binária deve-se proceder de forma inversa, ou seja, com sucessivas divisões pelo número dois até o quociente se tornar zero. Os restos destas divisões formarão o número na base binária. Como exemplo pode-se converter o número 21 da seguinte forma mostrada na figura 8:

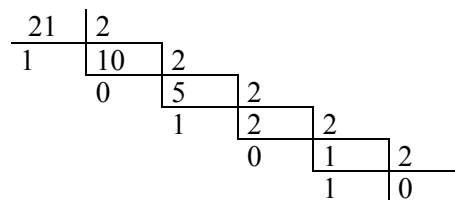


FIGURA 8 – Conversão de decimal para binário

$$(21)_{\text{decimal}} = (10101)_{\text{binária}}$$

Deve-se observar, no entanto, que qualquer número par na base binária tem que ter o primeiro algarismo (ou bit) igual a 0 (0×2^0) e os números ímpares terão o primeiro algarismo 1 (1×2^0).

Em um algoritmo genético com representação binária, o comprimento de um cromossomo depende da precisão requerida. Se desejar uma precisão de cinco casas decimais

e o domínio da variável x_j é $[a_j, b_j]$, a precisão implica que o intervalo do domínio de cada variável poderá ser dividido no mínimo por $(b_j - a_j) \times 10^5$ intervalos. O número de bits necessários para uma variável pode então ser calculado por:

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (2.2)$$

onde: m_j = número de bits necessários em um cromossomo.

Segundo Mitsuo Gen e Runwei Cheng (1997, p.8), o mapeamento de um cromossomo binário por um número real na variável x_j é dado pela fórmula:

$$x_j = a_j + \text{decimal}(\text{indivíduo}_j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (2.3)$$

onde: decimal (indivíduo $_j$) representa o valor decimal do cromossomo j para a variável de decisão x_j .

Considere a seguinte função a maximizar (GEN; CHEN, 1997):

$$\begin{aligned} \max f(x_1, x_2) &= 21,5 + x_1 \text{sen}(4\pi x_1) + x_2 \text{sen}(20\pi x_2) \\ -3,0 &\leq x_1 \leq 12,1 \\ 4,1 &\leq x_2 \leq 5,8 \end{aligned}$$

Deseja-se uma precisão de 4 casas decimais. A quantidade de bits para as variáveis x_1 e x_2 são calculados pela equação (2.2):

$$\begin{aligned} (12,1 - (-3,0)) \times 10^4 &= 151000 \\ 2^{17} < 151000 \leq 2^{18}, & \quad m_1 = 18 \\ (5,8 - 4,1) \times 10^4 &= 17000 \\ 2^{14} < 17000 \leq 2^{15}, & \quad m_2 = 15 \\ m = m_1 + m_2 &= 18 + 15 = 33 \end{aligned}$$

O comprimento total do cromossomo é 33, e pode ser assim representado:

$$x_1 = -3,0 + 5417 \times \frac{12,1 - (-3,0)}{2^{18} - 1} = -2,687969$$

$$x_2 = 4,1 + 24318 \times \frac{5,8 - 4,1}{2^{15} - 1} = 5,361653$$

Muitos pesquisadores têm avaliado qual a melhor representação, binária ou real, sendo muitos favoráveis a representação real como Michalewicz (1994) em seus experimentos. Uma grande vantagem da representação real é a facilidade de criar operadores genéticos, descritos no próximo item.

2.6.4 Operadores genéticos

Os operadores genéticos é que transformam a população por intermédio de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Um algoritmo genético padrão evolui, em suas sucessivas gerações, mediante o uso de três operadores básicos: seleção, cruzamento e mutação.

A seleção

A seleção é o operador que representa a força dirigente do algoritmo genético, sendo os cromossomos escolhidos por meio de uma função objetivo. A função objetivo é o benefício, a utilidade ou a vantagem que desejamos relacionar ao cromossomo. Este operador procura oferecer, aos melhores cromossomos da população corrente, preferência para o processo de reprodução, permitindo que eles possam passar as suas características às próximas gerações. Isto funciona como na natureza, onde os indivíduos altamente adaptados ao seu ambiente possuem naturalmente mais oportunidades para reproduzir do que aqueles indivíduos considerados mais fracos.

Existem diversos mecanismos de seleção para os cromossomos e podem ser agrupados em três grupos: amostragem randômica, amostragem determinística e amostragem mista.

A amostragem randômica foi utilizada nos trabalhos de Holland (1975). Consiste em relacionar cada cromossomo uma probabilidade de sobrevivência para reprodução

proporcional ao seu valor de aptidão, medida pela função objetivo. O método de seleção proporcional à aptidão utiliza este mecanismo e pode ser descrito pela fórmula a seguir:

$$p_k = \frac{f_k}{\sum_{j=1}^n f_j} = \frac{f_k}{f_{med} \cdot n} \quad (2.5)$$

onde: p_k - probabilidade de um cromossomo ser escolhido;

f_k - valor da aptidão de um cromossomo;

f_j - valor das aptidões dos outros cromossomos de uma população;

f_{med} - valor médio das aptidões dos cromossomos de uma população.

n - tamanho da população.

Os cromossomos com aptidão acima da média da população têm mais chance de serem os escolhidos a participar da sucessão.

A amostragem determinística é a seleção na qual um número de cromossomos com melhores aptidões será escolhido para participar do processo de reprodução. Neste mecanismo é definido um percentual de cromossomos de uma população a serem utilizados na sucessão que formará a geração.

A amostragem mista é uma mescla dos dois mecanismos, a randômica e a determinística. O método do ordenamento dos cromossomos de uma população é um exemplo deste mecanismo. O primeiro passo é a geração randômica dos cromossomos de uma população e o cálculo da função aptidão de acordo com uma função objetivo utilizada na avaliação de cada cromossomo. Após este passo, ordenam-se os cromossomos, conforme a sua aptidão, de forma decrescente (problemas de maximização) ou crescente (problemas de minimização). A escolha do percentual de cromossomos da população que participará da sucessão define a sua característica determinística.

Dentre os mecanismos de seleção, faz-se necessário explicitar a seleção com *elitismo*. Os AG's são aleatórios por excelência e boas soluções, portanto, aquelas que tenham boas aptidões podem deixar de ser escolhidas para gerar descendência, em razão do corte no cruzamento ou mutação. Uma maneira de evitar este fato é usar o conceito de *elitismo*

proposto por Dejong (1975). Por esta técnica, os n melhores cromossomos de uma geração passarão automaticamente para a próxima. Define-se, com efeito, o percentual da população ou taxa de elitismo (p_e), como a quantidade entre as melhores soluções que passarão para a próxima geração sem sofrer cruzamento ou mutação.

O cruzamento

O cruzamento é a fase posterior à seleção, ou seja, após a escolha dos “casais” de cromossomos, ocorrerá uma troca de segmentos que originará novos cromossomos constituintes do contingente da nova geração. É por meio dele que os AG’s exploram regiões desconhecidas do espaço de busca.

Existem diversos operadores de cruzamento tanto para a codificação binária como para codificação real. Na codificação binária, temos como exemplo os cruzamentos de n pontos e o uniforme. Na codificação real, usa-se o cruzamento aritmético, mas existem outros.

• O cruzamento de um ponto

Descreve-se o cruzamento de um ponto para melhor compreensão do processo, e por analogia, deduz-se o cruzamento de n pontos, que é o cruzamento com n pontos de corte. Para o cruzamento de um ponto são dados dois cromossomos pais p_1 e p_2 com probabilidade p_c de gerar dois filhos a_1 e a_2 . Um número inteiro J é gerado aleatoriamente entre 1 e NB-1 (NB é o número de bits no cromossomo). Os *strings* dos pais são separados na posição Jx .

$$p_1 = (b_1, b_2, \dots, b_{Jx} | b_{Jx+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.6)$$

$$p_2 = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{Jx} | b'_{Jx+1}, \dots, b'_{NB}) \quad (2.7)$$

Produz os dois filhos pela troca entre as segundas partes dos pais.

$$a_1 = (b_1, b_2, \dots, b_{Jx} | b'_{Jx+1}, \dots, b'_{NB}) \quad (2.8)$$

$$a_2 = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{Jx} | b_{Jx+1}, \dots, b_{NB}) \quad (2.9)$$

O ponto de corte poderá não ser constante, pois a cada par de pais escolhidos, um novo número Jx é gerado aleatoriamente. Não ocorrendo cruzamento, os filhos serão iguais

aos pais, permitindo, assim, preservar algumas soluções (*elitismo*). Em muitos problemas é comum definir uma probabilidade de cruzamento p_c entre 50% a 100% da população.

- **O cruzamento uniforme**

Este cruzamento utiliza uma espécie de máscara de bits aleatórios para cada pai. Se o primeiro bit da máscara for 1, então, copia o primeiro bit do pai₁ para o filho₁. Caso contrário, o primeiro bit do pai₂ é copiado para o filho₁. O processo se repete para os bits restantes do filho₁. Na geração do filho₂ o procedimento é invertido, onde o bit da máscara for 1, copia o bit do pai₂ e se for 0 copia o bit do pai₁, conforme figura 9.

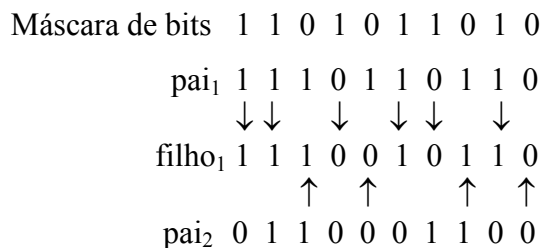


FIGURA 9 – Cruzamento uniforme

- **O cruzamento aritmético**

Os operadores convencionais (cruzamento de n pontos e uniforme) são adaptações dos operadores utilizados para a representação binária e funcionam bem nesta representação, porém, na representação real, eles basicamente trocam valores dos genes, não criando, portanto, novas informações (novos números reais). O melhor, pois para representação real é usar operadores aritméticos.

Os operadores aritméticos realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais. Existem vários tipos de operadores aritméticos na literatura de AG's, descreve-se a seguir o cruzamento aritmético proposto por Michalewicz (1994) que foi o adotado neste trabalho. Dados dois cromossomos pais p_1 e p_2 que são vetores representados por:

$$p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1l}) \quad (2.10)$$

$$p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2l}) \quad (2.11)$$

onde $p_{ij} \in \mathfrak{R}$.

Os cromossomos filhos c_1 e c_2 são produzidos da seguinte forma:

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (2.12)$$

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (2.13)$$

onde $c_i \in \mathfrak{R}$ e β é um número gerado aleatoriamente no intervalo $[0,1]$.

A mutação

A mutação é o operador responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética da população. É aplicada após o cruzamento nos cromossomos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação p_m . Assim a mutação assegura a possibilidade de se chegar a todos os pontos do espaço de busca por meio da manutenção da diversidade dos cromossomos de uma população. A mutação destrói, porém, a informação contida em um cromossomo, sendo, portanto, aplicado uma pequena probabilidade de mutação p_m na população dos filhos somente para manter esta diversidade. A probabilidade de mutação geralmente varia do intervalo $[0,0001;0,5]$. Alguns pesquisadores como Thomas Bäck (1996) relacionaram o valor da probabilidade de mutação e tamanho da população a performance do algoritmo genético em encontrar o ótimo global.

Existem muitos tipos de operadores de mutação nas literaturas, porém este trabalho descreve somente dois: a mutação simples e a uniforme.

- **Mutação simples**

Os cromossomos com representação binária, o operador de mutação inverte os valores de bits, ou seja, muda o valor do bit de 0 para 1 ou de 1 para 0. Conforme figura 10 apresentada abaixo, dois bits do primeiro filho e um bit do segundo passam por mutação (bits estes que passaram no teste de probabilidade):

Antes	<i>filho₁</i>	(0010101011010010101100)
	<i>filho₂</i>	(0011111010100000111111)
Depois	<i>filho₁</i>	(0010 <u>0</u> 010110100101 <u>1</u> 1100)
	<i>filho₂</i>	(0011111010 <u>0</u> 000000111111)

FIGURA10 – Mutação simples

- **Mutação uniforme**

Entre os diversos tipos de operadores de mutação que trabalham com representação real, a mutação uniforme consiste na simples substituição de um gene por um número aleatório, ou seja, dado um cromossomo p como j -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo c da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.14)$$

onde: a_i e b_i representam os limites do intervalo permitido para o gene c_i ; e $U(a_i, b_i)$ representa um número aleatório de uma distribuição uniforme no intervalo $[a_i, b_i]$.

Neste estudo os algoritmos genéticos utilizados adotaram a representação real para os cromossomos podendo estes assumir valores contínuos de um espaço de busca. Os operadores genéticos usaram as seguintes metodologias: a seleção por amostragem randômica, o cruzamento aritmético e a mutação uniforme.

2.6.5 A função objetivo

A função objetivo constitui juntamente com os operadores genéticos, um componente importante dos AG's. Em problemas de otimização de redes hidráulicas, desejam-se realizar um ajuste em parâmetros calculados e medidos. Entre estes parâmetros podemos citar: as cargas hidráulicas, as vazões nas tubulações, as demandas nos nós, os diâmetros e os custos de implantação. A função objetivo utilizada pelos AG's deverão utilizar as medidas destes parâmetros como variáveis, que podem possuir pesos indicando a menor ou maior influência destas medidas no processo de otimização.

Os parâmetros de uma função objetivo podem ser contínuos ou discretos. Otimizar com parâmetros contínuos tem um número infinito de soluções. Otimizar com parâmetros discretos, em geral, tem somente um número finito de possíveis soluções. Um exemplo de AG com parâmetros discretos é a decisão de encontrar a melhor ordem em que um conjunto de tarefas ou ações deva ser executado, constituindo num problema de otimização combinatória.

A otimização proposta por este estudo visa à identificar e localizar vazamentos em uma rede exemplo por meio da análise transiente inversa, proposto por Liggett e Chen (1994), juntamente com o uso do algoritmo genético, com codificação contínua dos parâmetros. A escolha deste método é um facilitador, pois necessita somente de medidas de cargas hidráulicas coletadas em um ou mais nós de uma rede hidráulica durante certo intervalo (tempo de análise do transitório, TS).

A função que define estas variáveis cargas hidráulicas é o somatório absoluto do quadrado das diferenças entre cargas medidas e calculadas, constituindo desta forma o seu erro quadrático F , descrito pela fórmula:

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (2.15)$$

onde: TS = tempo de coleta e cálculo dos dados transientes, NL = número de locais de medição na rede, $H_{i,j}^m$ = carga hidráulica medida, $H_{i,j}^c$ = carga hidráulica calculada, $i = 1, 2, \dots, NL$ e $j = 1, 2, \dots, TS$.

A função objetivo definida no AG é o negativo deste erro quadrático:

$$F_{obj} = -F$$

Então, a otimização pelo AG neste estudo compreende uma maximização da função objetivo, já que na calibração das variáveis busca uma minimização de F .

2.6.6 Critérios de parada

Existem diversas formas na literatura para dizer que um algoritmo genético conseguiu encontrar a solução ótima do problema proposto. A essas formas têm a

denominação de critérios de parada e entre eles, podemos citar: quando o AG atingiu um dado número de gerações (ou avaliações); ao chegar ao valor ótimo da função objetivo, se este for conhecido e convergência, isto é, quando não ocorrer melhoramento significativo no cromossomo de maior aptidão por um dado número de gerações. Outras opções podem ser também usadas, como por exemplo, 90% ou 95% da população têm o mesmo valor de um gene.

Neste estudo, o critério de parada será o número de gerações, em razão do tempo computacional elevado necessário para encontrar a solução ótima.

2.6.7 Vantagens e desvantagens do algoritmo genético (AG)

Há vários métodos de otimização descritos na literatura, indicando as vantagens e desvantagens dos AG's. Para um melhor entendimento, faz-se necessário descrever as diversas técnicas de otimização convencional em três classes principais a saber:

- Gerar-e-testar: também conhecido como método de busca exaustiva ou aleatória e emprega dois módulos, o módulo de geração, que enumera possíveis soluções, sistemática ou aleatoriamente; e o módulo de teste, que avalia cada possível solução podendo aceitá-la ou rejeitá-la. O módulo gerador produz todas as possíveis soluções antes do módulo de teste começar a agir, sendo o mais comum o uso intercalado destes dois módulos. O método pode encerrar sua execução quando uma solução satisfatória for encontrada após achar certo número de soluções satisfatórias ou continuar até que todas as possíveis soluções sejam testadas.

- Métodos analíticos: utilizam técnicas do Cálculo Diferencial para determinar os pontos extremos de uma função e apresentam várias desvantagens como não informam se o ponto encontrado é um ponto de mínimo local ou global; requerem funções com derivadas e, quando existe grande número de parâmetros, se torna difícil encontrar, analiticamente, todos os pontos de mínimo e máximo, tornando-os, portanto, impraticáveis para otimizar diversos problemas do mundo real.

- Subida de encosta (*Hill climbing*): investiga os pontos pertencentes a um espaço de busca e move-se na direção do melhor valor da função objetivo, sendo observado que, em muitas funções com muitos ótimos locais apresentam a dificuldade em localizar qual

“encosta” leva ao ótimo global, ou quando na superfície de busca existem muitos valores de mínimo ou máximo locais, ou seja, há “planícies ou platôs”. Esses métodos, contudo, são geralmente rápidos, sendo adotados por um grande número de técnicas importantes de otimização os princípios da Subida de encosta. Um exemplo é o método do gradiente.

Os algoritmos genéticos são empregados em problemas complicados de otimização, em que, muitas vezes, falham os métodos há pouco expostos. Algumas vantagens dos AG's são (GALVÃO *et al.*, 1999):

- trabalham tanto com parâmetros contínuos ou discretos ou uma associação deles;
- realizam pesquisas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com único ponto;
- utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou conhecimento auxiliar outro;
- otimizam um número grande de variáveis;
- otimizam parâmetros de funções objetivo com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de soluções de mínimos e máximos locais;
- trabalham com a codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- fornecem uma lista de parâmetros ótimos e não uma simples solução;
- trabalham com dados gerados experimentalmente e são tolerantes a ruídos e dados incompletos;
- são fáceis de traduzir para linguagem computacional e
- podem otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes e são flexíveis para trabalhar com diferentes restrições.

As desvantagens dos AG's são:

- tempo elevado de processamento computacional, pois em relação aos outros métodos de otimização , apresentam-se bastante lentos;

- podem produzir erros em problemas de funções com mínimos ou máximos muito próximos, onde o surgimento de “super” cromossomos (aqueles com alta aptidão), mas que não representam respostas ótimas, contaminem as populações com espalhamento de seus genes;
- podem produzir erros em razão do desaparecimento de cromossomos de uma população no decorrer de gerações (fenômeno conhecido por *Genetic Drift*), fazendo com que o AG não pesquise todo o espaço de busca e provocando uma convergência para um mínimo ou máximo local (convergência prematura) e
- necessidade de definição dos tipos de parâmetros utilizados após testes prévios do AG, para verificar quais os melhores se ajustariam na solução do problema.

O algoritmo genético, apesar de algumas imperfeições, é aplicado nas soluções de diferentes problemas que utilizam funções complexas com o uso de muitas variáveis. Na busca de resultados ótimos de vários parâmetros analisados, ele produz resultados mais satisfatórios do que os resolvidos por meio de algoritmos de otimização convencionais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descreve-se os materiais e métodos utilizados para a otimização do parâmetro vazamentos em uma rede de distribuição de água, considerada como rede exemplo.

3.1 Materiais

O presente trabalho usou para realizar a otimização um computador com processador AMD Athlon 2,8 GHz de 512 Mb de memória RAM, impressoras e *softwares* como o compilador de linguagem de programação FORTRAN 77 e planilhas eletrônicas .

A linguagem de programação FORTRAN (*FORmula TRANslation*) foi desenvolvida por John Backus e uma equipe de mais doze profissionais, entre os anos 1954 e 1956 para a empresa IBM (*International Business Machines*). Na primeira versão, a linguagem possuía muito poucos comandos se comparada com as versões recentes (MANZANO, 2003). A linguagem usada neste trabalho utiliza o compilador de domínio público da versão FORTRAN 77, disponível na internet (www.baixaki.ig.com.br/detail4984.htm).

3.2 O modelo hidráulico

Um modelo hidráulico representa uma descrição matemática das características de um sistema hidráulico, sendo o caso de estudo deste trabalho uma rede de abastecimento de água. Para entender os seus processos dinâmicos em geral usam-se equações diferenciais e a sua resolução permite que sejam encontradas as respostas deste sistema. Na maioria dos problemas, nem sempre é possível resolver diretamente estas equações diferenciais, sendo necessária o emprego de um modelo numérico para a análise. Por ser mais aproximada das situações reais e por causa do menor custo da obtenção dos dados, o modelo proposto realiza a análise do transitório hidráulico.

O transitório hidráulico ocorre em escoamentos transientes, presentes em qualquer sistema onde a situação do fluxo de estado permanente varia para outra situação permanente.

Uma alteração do fluxo permanente em um sistema de tubulações ocorre devido a uma mudança nas condições de contorno. Existem muitos tipos de mudanças nas condições de contorno que podem provocar transientes. Os tipos que provocam transientes em redes mais comuns são:

- partidas ou paradas de bombas;
- abertura, fechamento ou ajuste de válvulas, acidental ou planejadas;
- variação nas demandas ou consumos e
- alteração do nível de água de um reservatório.

As redes de distribuição de água estão presentes há centenas de anos em nossas vidas, porém, antigamente, eram alimentadas por gravidade por meio de grandes reservatórios, onde as condições quase permanentes prevaleciam. Os diâmetros dos tubos e os comprimentos das linhas eram pequenos e as pressões eram baixas. Nestas redes antigas, o principal problema era manter uma distribuição equilibrada do fluxo para determinada condição de demanda, o que resultou em pouca atenção inicial ao estudo das condições transientes (KARNEY; McINNIS, 1992).

Os modernos sistemas de distribuição de água, ao contrário das redes antigas, são alimentados por numerosas estações de bombeamento, descarregando volumes de água com diferentes fluxos. Além destas diferenças, os fluxos passam por distúrbios por parada e partidas de bombas, manobras de válvulas e outros eventos acidentais que podem provocar ondas de alta pressão condutoras de informações para todo o sistema hidráulico. Quando as condições no fluxo mudam lentamente, são geradas pequenas variações nas pressões, porém, se ocorrer mudanças bruscas, são geradas grandes pressões que podem provocar danos nas tubulações e equipamentos hidráulicos. A análise do transiente não é a solução de todos os problemas que podem ocorrer em redes tubulares de distribuição de água. Falhas nos tubos, provocada por corrosão, danos nos tubos durante a execução, terremotos e outros podem ser também agentes ativos do rompimento das tubulações. A análise das condições transientes, contudo, não pode ser negligenciada em projetos e pesquisas. Uma boa análise do fenômeno transiente implica investigar uma grande variedade de condições de fluxo em virtude das operações e combinações de mecanismos e componentes do sistema. Os benefícios desta análise resultam numa melhora no modelo das redes, um sistema de proteção mais eficiente,

condições operacionais mais econômicas e prováveis menores custos de implantação e manutenção.

O fenômeno transiente pode ser analisado considerando dois tipos de modelos, os modelos rígidos que não levam em consideração os efeitos elásticos da água e da tubulação, e os modelos elásticos, que tem em conta estes efeitos. Os modelos rígidos são usados geralmente para descrever as oscilações de massa e os modelos elásticos da análise dos golpes de aríete (*water hammer*). As condições transientes ocorrem quando existe um ajuste do fluxo local em decorrência da ação de válvulas, bombas ou outros dispositivos hidráulicos que provocam um distúrbio no regime permanente, com a transformação razoável de energia cinética em energia elástica (ou potencial) conseqüente da compressibilidade da água. Estas transformações podem provocar grandes variações de pressões. Os modelos rígidos são empregados quando as mudanças no fluxo são graduais, de tal forma que os desequilíbrios produzam pequenas variações de energia e massa. Mudanças violentas, todavia, causadas por operações acidentais ou planejadas, criam grandes pulsos de pressões (*water hammer*) capazes de danificar as tubulações, sendo, neste caso, mais adequada a utilização do modelo elástico.

O fluxo transiente em condutos forçados é descrito pelas seguintes equações diferenciais não lineares:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (3.2)$$

onde: H é a carga piezométrica (m), Q é a vazão volumétrica (m^3/s), A é a área da seção transversal do tubo (m^2), D é o diâmetro interno da tubulação (m), f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, a é a celeridade da onda de pressão (m/s), g é a aceleração da gravidade (m^3/s), x é a distância (m) e t o tempo (s).

A equação (3.1) representa a conservação da massa e a equação (3.2) configura a conservação de *momentum*. A solução destas equações é feita por uma análise complexa com

a transformação destas equações em equações diferenciais ordinárias pela utilização do recurso de métodos numéricos. Neste capítulo utiliza-se o modelo da coluna elástica por meio do Método das Características como ferramenta de modelagem do fenômeno transiente.

3.3 Método das Características (MOC)

As equações (3.1) e (3.2) descrevem matematicamente o transitório hidráulico e estas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da carga piezométrica H e da vazão Q ao longo da tubulação x e do tempo t . Muitos pesquisadores deduziram estas equações entre eles Chaudhry (1987) e Wylie e Streeter (1978), permitindo o uso delas em simulações com fluxo de redes hidráulicas.

Para a solução deste sistema de equações diferenciais, utilizam-se métodos numéricos. Nos métodos numéricos, os resultados são aproximados com base nas condições de contorno do problema, ou seja, na análise de todos os fatores conhecidos que possam influenciar no resultado final, como a escolha ideal de intervalos “discretizados” e condições de contornos explicitados e coerentes. Desta forma, as soluções por estes métodos tornam-se bastante razoáveis. Na análise do fenômeno transitório entre os vários tipos de métodos numéricos, opta-se pelo Método das Características, pois este fenômeno segue o princípio da propagação de ondas que associa o parâmetro tempo t com espaço x ao longo das tubulações. Por meio deste método, é possível a obtenção de equações explícitas para determinação das cargas e vazões, quando aplicados valores convenientes para a celeridade da onda ($V \ll a$, onde V é a velocidade média de escoamento).

Assim, as equações (3.1) e (3.2) podem ser reescritas por:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (3.3)$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.4)$$

Considerando a combinação linear das equações (3.3) e (3.4):

$$L = L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (3.5)$$

ou

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + \lambda gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (3.6)$$

ou

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{f}{(2DA)} Q|Q| = 0 \quad (3.7)$$

Se $H = H(x,t)$ e $Q = Q(x,t)$ são soluções das equações (3.3) e (3.4), as derivadas totais podem ser escritas como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad \text{para } Q = Q(x,t) \quad (3.8)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad \text{para } H = H(x,t) \quad (3.9)$$

Se definirmos o multiplicador λ como:

$$\lambda a^2 = \frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} \quad (3.10)$$

Onde:

$$\lambda = \pm \frac{1}{a}$$

Utilizando as equações (3.8), (3.9) e (3.10), a equação (3.7) pode ser reescrita pelas equações características:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = a \quad (3.11)$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (3.12)$$

Note-se que a equação (3.11) é válida para $(dx/dt) = a$, e que a equação (3.12) é válida para $(dx/dt) = -a$. Dessa forma, impondo as relações dadas por $(dx/dt) = a$ e $(dx/dt) = -a$, elimina-se a variável independente x , e convertem-se as equações diferenciais parciais (3.3) e (3.4) em equações diferenciais ordinárias na variável independente t . No plano $x-t$, estas relações representam duas linhas retas, tendo inclinações $\pm 1/a$. Essas linhas são chamadas linhas características. Matematicamente, essas linhas dividem o plano $x-t$ em duas regiões (dois tipos de soluções). Fisicamente elas representam o caminho percorrido por um distúrbio. Como exemplo, um distúrbio no ponto A (figura 11) em t_0 alcançaria o ponto P depois de um intervalo de tempo Δt .

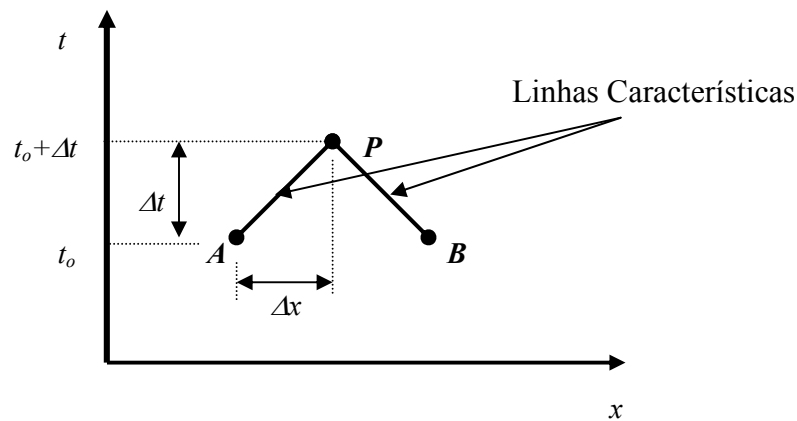


FIGURA 11 – Linhas Características no plano $x-t$

Para facilitar a compreensão do procedimento de solução das equações (3.11) e (3.12), será discutido primeiramente o significado físico das linhas características. Considere uma tubulação simples, mostrada na figura 12.

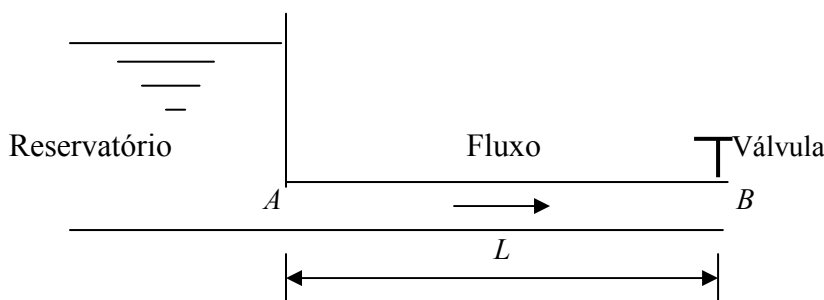


FIGURA 12 – Tubulação simples

As equações (3.11) e (3.12) são válidas ao longo do comprimento do tubo ($0 < x < L$) e com o estabelecimento das condições de contorno nas extremidades (para $x=0$ e $x=L$) (figura 13).

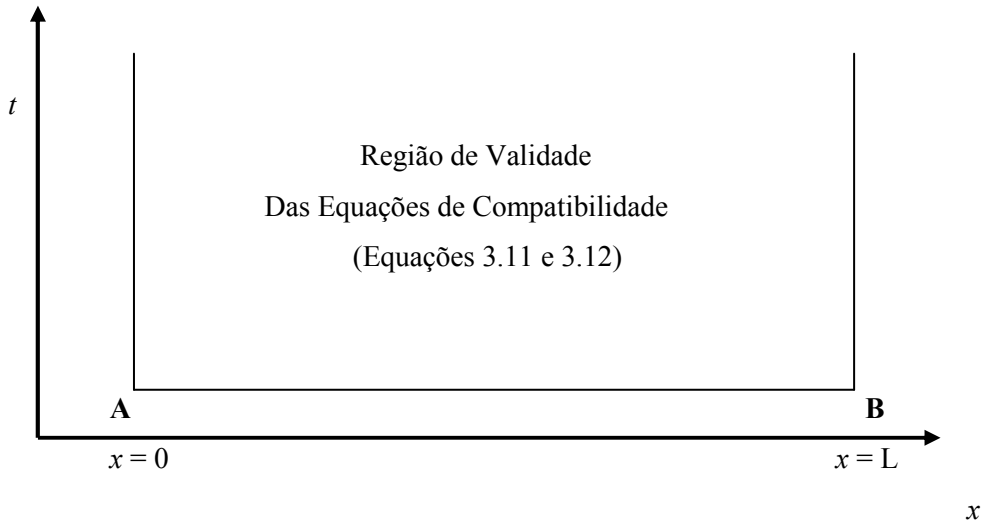


FIGURA 13 – Região de validade para uma tubulação simples

No exemplo sob consideração, há um reservatório de carga constante no nó a montante ($x = 0$) e uma válvula no nó a jusante ($x = L$), e as condições transientes são produzidas pela válvula. Assume-se a compreensão que há um fluxo inicial ($t = 0$) permanente na tubulação, quando a válvula é instantaneamente fechada. Isso reduz o fluxo por meio da válvula a zero, o que resulta em uma elevação da pressão na válvula. Em virtude desta subida de pressão, uma onda de pressão propaga-se para montante. Se o caminho desta onda é plotado no plano $x-t$, ele será representado pela linha BC , como mostrado na figura 14. A figura mostra que as condições na região I dependem somente das condições iniciais, pois as condições de contorno não mudam, enquanto que na região II elas dependem das condições impostas pelo contorno a jusante.

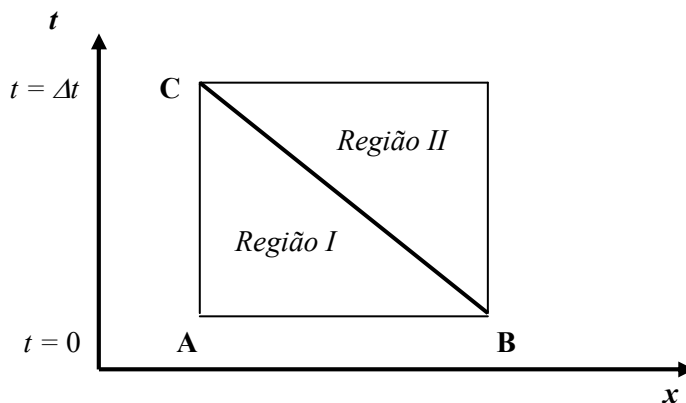


FIGURA 14 – Excitação no nó de jusante

Portanto, a linha característica BC separa os dois tipos de soluções. Se excitações são impostas simultaneamente nos pontos A e B , a região influenciada pelas condições iniciais é mostrada conforme na figura 15.

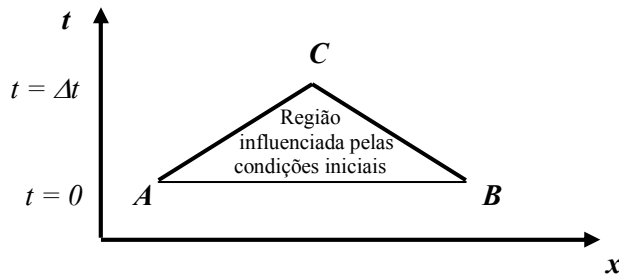


FIGURA 15 – Excitação nos nós a montante e jusante

A linha característica AC separa as regiões influenciadas pelo contorno a montante e as condições iniciais, e a linha BC separa as regiões influenciadas pelo contorno de jusante e as condições iniciais. Em outras palavras, as linhas características no plano $x-t$ representam o caminho de propagação das perturbações em vários pontos do sistema.

Assume-se a noção de que são conhecidos a carga H e vazão Q num tempo $t = t_0$. Estas condições iniciais são conhecidas ($t = 0$) ou calculadas para um determinado valor do tempo. Considerando que se deseja conhecer os valores de H e Q para o tempo $t = t_0 + \Delta t$ e referindo-se a figura 11, podemos dizer que os valores de H e Q no ponto A e B são conhecidos e precisa-se determinar valores de H e Q no ponto P . Isto é possível pela solução das equações (3.11) e (3.12). Se multiplicarmos a equação (3.11) por dt e rearmando e integrando ao longo da linha característica AP , obtém-se:

$$\int_A^P dH + \beta \int_A^P dQ + R \int_A^P Q|Q| dt = 0; \quad (3.13)$$

Onde:

$$\beta = \frac{a}{gA} \text{ e } R = \frac{fa}{2gDA^2}$$

Se A e P são pontos localizados no plano $x-t$, então H_p é a carga hidráulica no ponto P . A equação (3.11) só é válida ao longo da linha característica AP (linha C^+) e os

limites da integral vão de A para P . Os dois primeiros termos da equação (3.13) podem ser facilmente avaliados, mas o terceiro termo não, pois representa perdas por atrito e não se pode conhecer explicitamente a variação de Q em relação ao tempo t . Usando uma aproximação de primeira ordem, a integral do terceiro termo pode ser avaliada por:

$$R \int_A^P Q |Q| dt \cong R Q_A |Q_A| (t_p - t_A) \cong R Q_A |Q_A| \Delta t \quad (3.14)$$

E então a equação (3.11) transforma-se em:

$$(H_p - H_A) + \beta(Q_p - Q_A) + R \Delta t Q_A |Q_A| = 0 \quad (3.15)$$

Esta aproximação de primeira ordem é conhecida como método explícito e ordinariamente produz resultados satisfatórios em aplicações de Engenharia. Se o termo do atrito, porém, torna-se muito grande, a aproximação de primeira ordem pode produzir resultados instáveis. Para evitar isso, nestes casos utilizam-se aproximações de ordem superiores ou um processo iterativo para avaliar o termo relacionado ao atrito em pequenos intervalos de tempo (Δt) a cada passo. Um fato também importante é a validade do método explícito somente se o fluxo transiente não flutuar muito distante do estado permanente por um longo período (WYLIE; STREETER, 1978).

De forma análoga, a equação (3.12) pode ser escrita ao longo da linha característica PB (linha C⁻):

$$-(H_p - H_B) + \beta(Q_p - Q_B) + R \Delta t Q_B |Q_B| = 0 \quad (3.16)$$

Combinando as variáveis desconhecidas, podemos escrever (3.15) como:

$$H_p = C_p - \beta Q_p \quad (3.17)$$

Onde:

$$C_p = H_A + \beta Q_A - R \Delta t Q_A |Q_A|$$

e a equação (3.16) como:

$$H_p = C_N + \beta Q_p \quad (3.18)$$

Onde:

$$C_N = H_B - \beta Q_B + R\Delta t Q_B |Q_B|$$

As constante β e R nas equações (3.17) e (3.18) referem-se às propriedades da tubulação e C_N e C_P são calculados a cada passo.

Para entender o uso das equações (3.17) e (3.18), precisa-se “discretizar” o domínio x e o tempo t em intervalos Δx e Δt . As coordenadas do ponto A são $(i-1, t_j)$ e do B $(i+1, t_j)$ e do ponto P $(i, t_{j+\Delta t})$. Os valores desconhecidos de P (H_P e Q_P) se relacionam com A pela equação (3.17) e com B pela equação (3.18). Os pontos A e B são considerados ponto de montante e jusante do segmento i e o ponto P corresponde ao ponto interior. As condições no tempo t_j são conhecidas e, por meio das equações (3.17) e (3.18), pode-se conhecer as condições no ponto interior P (figura 16). No próximo passo, novos pontos de montante e jusante para o tempo $t_{j+\Delta t}$ são calculados e conhecidos e novos pontos P' interiores podem ser agora calculados para o tempo $t_{j+2\Delta t}$. Desta maneira, procede-se passo a passo o cálculo das condições transientes para um tempo requerido t , múltiplo de Δt , ao longo da tubulação.

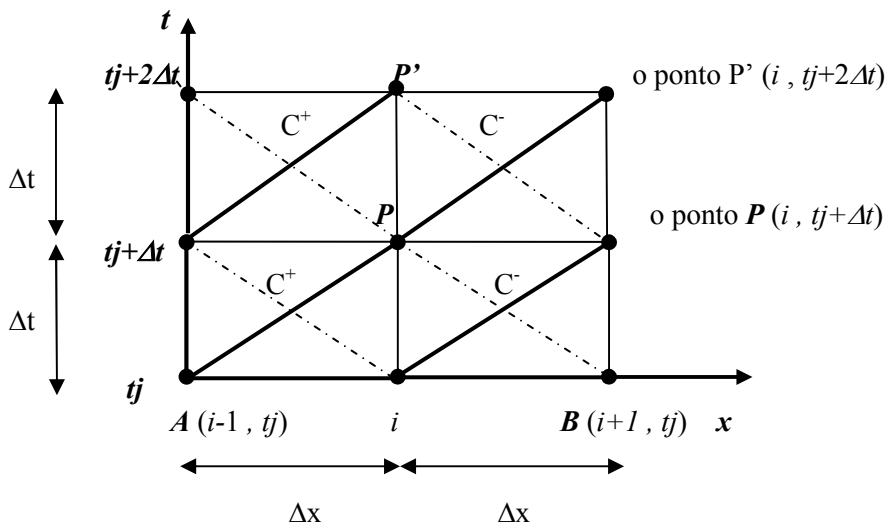


FIGURA 16 - Malha de “discretização” do Método das Características

3.3.1 Condições de contorno

O Método das Características (MOC) usa um cálculo sistemático das condições transientes de uma tubulação. Consideramos a tubulação da figura 12 e a dividimos em $n+1$ seções com n segmentos (trechos), tendo todos os segmentos o comprimento de Δx . No início

de cada tubulação (primeira seção) e no seu final (última seção), para o cálculo, são necessárias uma equação de contorno e uma equação característica. Para pontos interiores ou seções internas ($1 < i < n+1$), é necessário o emprego de ambas as equações características. Mostra-se a seguir, por meio de uma “discretização”, a dedução de valores de carga e vazão desconhecidos para algumas condições de contorno.

- **Ponto interior ou seção interna**

Define-se uma seção interna i de um trecho (segmento) de uma tubulação genérica k . A figura 17 apresenta as linhas características positiva e negativa no plano $x-t$.

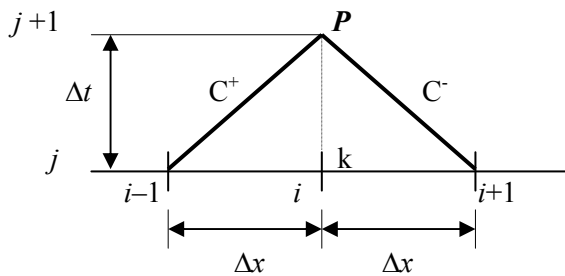


FIGURA 17 – Esquema de uma seção interna i de uma tubulação

Das equações características (3.17) e (3.18) como

$$H_P = C_P - \beta_k Q_P \quad (3.17)$$

$$H_P = C_N + \beta_k Q_P \quad (3.18)$$

Onde:

$$C_P = H_{(i-1,j)} + \beta_k Q_{(i-1,j)} - R_k Q_{(i-1,j)} \Big| Q_{(i-1,j)} \Big| \Delta t \quad (3.19)$$

$$C_N = H_{(i+1,j)} - \beta_k Q_{(i+1,j)} + R_k Q_{(i+1,j)} \Big| Q_{(i+1,j)} \Big| \Delta t \quad (3.20)$$

Destas equações (3.17), (3.18), (3.19) e (3.20):

$$Q_{(i,j+1)} = \frac{C_P - C_N}{2\beta_k} \text{ ou } H_{(i,j+1)} = \frac{C_P + C_N}{2} \text{ onde resulta:}$$

$$Q_{(i,j+1)} = \frac{H_{(i-1,j)}}{2\beta_k} - \frac{H_{(i+1,j)}}{2\beta_k} + \frac{Q_{(i-1,j)}(\beta_k - R_k \Delta t Q_{(i-1,j)} |Q_{(i-1,j)}|)}{2\beta_k} \\ + \frac{Q_{(i+1,j)}(\beta_k - R_k \Delta t Q_{(i+1,j)} |Q_{(i+1,j)}|)}{2\beta_k}$$

ou

$$H_{(i,j+1)} = \frac{H_{(i-1,j)}}{2} + \frac{H_{(i+1,j)}}{2} + \frac{Q_{(i-1,j)}(\beta_k - R_k \Delta t Q_{(i-1,j)} |Q_{(i-1,j)}|)}{2} \\ - \frac{Q_{(i+1,j)}(\beta_k - R_k \Delta t Q_{(i+1,j)} |Q_{(i+1,j)}|)}{2}$$

- **Reservatório de Nível Constante a Montante**

Considere um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica k (figura 18).

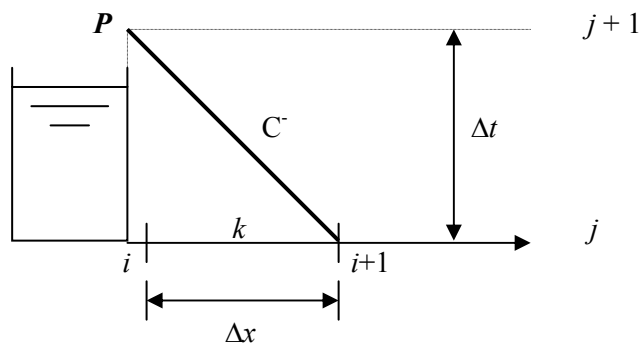


FIGURA 18 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação

A equação característica C^- (3.18) utilizada:

$$H_P = C_N + \beta_k Q_P \quad (3.18)$$

Onde:

$$C_N = H_{(i+1,j)} - \beta_k Q_{(i+1,j)} + R_k \Delta t Q_{(i+1,j)} |Q_{(i+1,j)}| \quad (3.20)$$

Do contorno:

$$H_P = H_{(i,j+1)} = \text{constante} \quad (3.21)$$

Destas equações (3.18), (3.20) e (3.21):

$$Q_{(i,j+1)} = \frac{H_P - C_N}{\beta_k} \text{ onde resulta}$$

$$Q_{(i,j+1)} = \frac{H_P}{\beta_K} - \frac{H_{(i+1,j)}}{\beta_k} + Q_{(i+1,j)} \frac{(\beta_K - R_K \Delta t |Q_{(i+1,j)}|)}{\beta_K}$$

- **Reservatório de Nível Constante a Jusante**

Considere um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica k (figura 19).

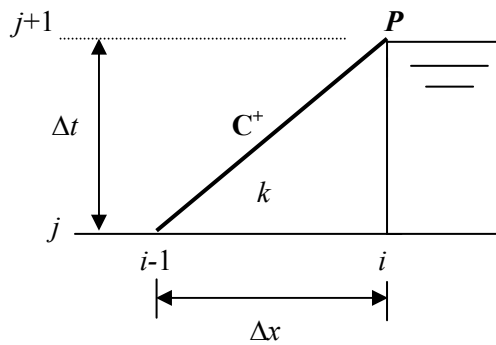


FIGURA 19 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação

A equação característica C^+ (3.17) utilizada:

$$H_P = C_P - \beta_k Q_P \quad (3.17)$$

Onde:

$$C_P = H_{(i-1,j)} + \beta_k Q_{(i-1,j)} - R_k \Delta t Q_{(i-1,j)} |Q_{(i-1,j)}| \quad (3.19)$$

Do contorno

$$H_P = H_{(i,j+1)} = \text{constante} \quad (3.22)$$

Destas equações (3.17), (3.19) e (3.22):

$$Q_{(i,j+1)} = \frac{C_P - H_P}{\beta_k}$$

Onde resulta:

$$Q_{(i,j+1)} = -\frac{H_P}{\beta_k} + \frac{H_{(i-1,j)}}{\beta_K} + Q_{(i-1,j)} \frac{(\beta_K - R_K \Delta t |Q_{(i-1,j)}|)}{\beta_K}$$

- **Nó de consumo ou demanda**

Sejam um nó de consumo genérico com vazão de demanda igual a Q_{EXT} e duas tubulações k e l representando as tubulações que chegam (conjunto N_1 – sentido positivo) e as tubulações que saem (conjunto N_2 – sentido negativo) do nó M , respectivamente (figura 20).

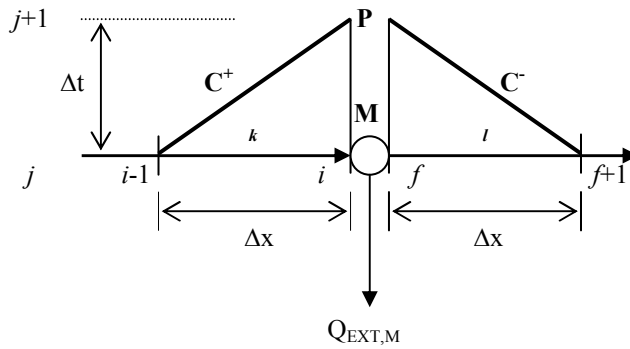


FIGURA 20 – Esquema de um nó de consumo M

As equações características C^+ (3.17) e C^- (3.18) dadas são:

$$H_P = C_P - \beta_k Q_P \quad (3.17)$$

$$H_P = C_N + \beta_l Q_P \quad (3.18)$$

Onde:

$$C_P = H_{(i-1,j)} + \beta_k Q_{(i-1,j)} - R_k Q_{(i-1,j)} |Q_{(i-1,j)}| \Delta t \quad (3.19)$$

$$C_N = H_{(f+1,j)} - \beta_l Q_{(f+1,j)} + R_l Q_{(f+1,j)} |Q_{(f+1,j)}| \Delta t \quad (3.20)$$

Destas equações (3.17), (3.18), (3.19) e (3.20) resulta:

$$Q_{(i,j+1)} = -\frac{H_{(i,j+1)}}{\beta_k} + \frac{H_{(i-1,j)}}{\beta_k} + \frac{(\beta_k - R_k \Delta t |Q_{(i-1,j)}|)}{\beta_k} Q_{(i-1,j)} \quad (3.23)$$

$$Q_{(f,j+1)} = \frac{H_{(f,j+1)}}{\beta_l} + \frac{H_{(f+1,j)}}{\beta_l} + \frac{(B_l - R_l \Delta t |Q_{(f+1,j)}|)}{B_l} Q_{(f+1,j)} \quad (3.24)$$

Do contorno:

$$\sum_{k \in N_1} Q_{(i,j+1)} - \sum_{l \in N_2} Q_{(f,j+1)} - Q_{EXT} = 0 \quad (3.25)$$

$$H_{(i,j+1)} = H_{(f,j+1)} = H_{(m,j+1)} = H_P \quad (3.26)$$

Substituindo as equações (3.23) e (3.24) na equação (3.25), usando a equação (3.26), têm-se:

$$\begin{aligned} H_{(m,j+1)} &= B_M \sum_{k \in N_1} \frac{H_{(i-1,j)}}{\beta_k} + B_M \sum_{l \in N_2} \frac{H_{(f+1,j)}}{\beta_l} + B_M + \sum_{k \in N_1} \frac{(\beta_k - R_k \Delta t |Q_{(i-1,j)}|)}{\beta_k} Q_{(i-1,j)} \\ &- B_M \sum_{l \in N_2} \frac{(B_l - R_l \Delta t |Q_{(f+1,j)}|)}{B_l} Q_{(f+1,j)} - B_M Q_{EXT} \end{aligned}$$

Onde:

$$B_M = \left[\sum_{i \in N_1} \frac{1}{B_k} + \sum_{j \in N_2} \frac{1}{B_l} \right]^{-1}$$

- **Válvula a jusante**

Uma válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica k , conforme Figura 21.

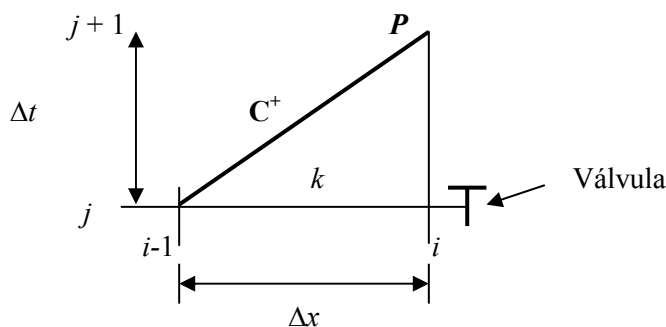


FIGURA 21 – Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica k

A equação característica C^+ (3.17) utilizada é:

$$H_P = C_P - \beta_k Q_P \quad (3.17)$$

Onde:

$$C_P = H_{(i-1,j)} + \beta_k Q_{(i-1,j)} - R_k Q_{(i-1,j)} \left| Q_{(i-1,j)} \right| \Delta t \quad (3.19)$$

$$H_{(i,j+1)} = C_P - \beta_k Q_{(i,j+1)} \quad (3.27)$$

Por meio da equação geral de descarga por um orifício, o fluxo permanente que passa pela válvula pode ser escrito:

$$Q_{o(i,j)} = (C_d A_v)_o \sqrt{2gH_{o(i,j)}} \quad (3.28)$$

onde o índice o indica condições de escoamento permanente, C_d = coeficiente de descarga, $H_{o(i,j)}$ = carga a montante da válvula (m) e A_v = área do orifício (m²).

Assumindo que o fluxo em escoamento transiente através da válvula pode ser descrito por uma equação similar ao escoamento permanente, então têm-se:

$$Q_{(i,j+1)} = (C_d A_v) \sqrt{2gH_{(i,j+1)}} \quad (3.29)$$

Dividindo a equação (3.29) pela equação (3.28) e elevando ao quadrado ambos os lados, obtêm-se:

$$Q_{(i,j+1)}^2 = \frac{(Q_{o(i,j)} \tau)^2}{H_{o(i,j)}} H_{(i,j+1)} \quad (3.29)$$

Onde:

$$\tau = \frac{C_d A_v}{(C_d A_v)_o} \text{ é a abertura ou fechamento relativo da válvula.}$$

Substituindo $H_{(i,j+1)}$ da equação (3.27) na equação (3.29) resulta:

$$Q_{(i,j+1)}^2 + C_V Q_{(i,j+1)} - C'_P C_V = 0 \quad (3.30)$$

Onde:

$$C_V = \frac{(Q_{0(i,j)} \tau)^2 \beta_k}{H_{o(i,j)}}$$

$$C'_P = \frac{C_P}{\beta_k} = \frac{H_{(i-1,j)}}{\beta_k} + Q_{(i-1,j)} - \frac{R_k}{\beta_K} \Delta t Q_{(i-1,j)} |Q_{(i-1,j)}|$$

Resolvendo a equação (3.30) para $Q_{(i,j+1)}$ e desprezando o termo negativo em uma das raízes, tem-se:

$$Q_{(i,j+1)} = 0,5 \left(-C_V + \sqrt{C_V^2 + 4C'_P C_V} \right)$$

O valor de $H_{(i,j+1)}$ pode ser obtido agora, depois de conhecido $Q_{(i,j+1)}$, na equação (3.27).

No cálculo das condições transientes provocadas por abertura e fechamento de uma válvula, uma relação τ e tempo t são especificados, geralmente apresentando-se sob forma de um gráfico. A figura 22 demonstra um exemplo de abertura e fechamento. O valor de $\tau = 1$ corresponde a uma abertura na qual a válvula está plenamente aberta e o fluxo está em condições permanentes. O valor de $\tau = 0$ ao contrário representa o fechamento total da válvula.

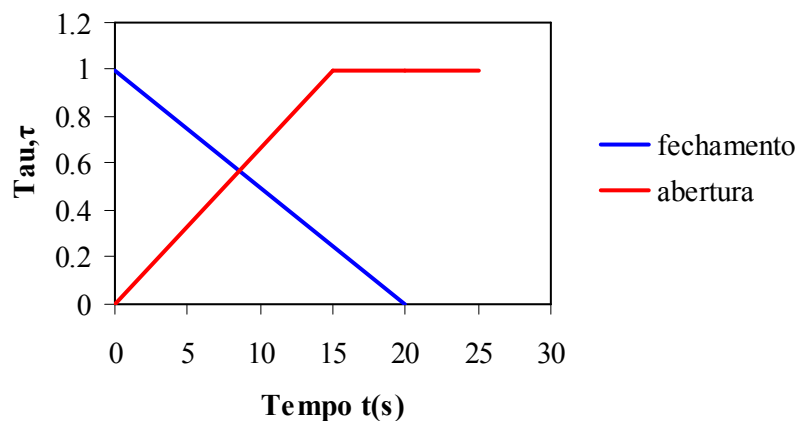


FIGURA 22 – Exemplo de fechamento e abertura de uma válvula

3.3.2 Cálculo da celeridade

De acordo com Halliwell (1963) *apud* Chaudhry (1987, p.41) é apresentada uma expressão geral para o cálculo da velocidade da onda:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (3.31)$$

onde: ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto; E = módulo de elasticidade de Young da parede do conduto (GPa); K e ρ são o módulo de elasticidade e a massa específica do fluido (GPa e kg/m³), respectivamente.

Existem várias expressões que calculam o parâmetro ψ para diferentes condições dos condutos. Neste trabalho, serão considerados os condutos como elásticos de paredes finas. A expressão usada é a seguinte:

$$\psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu') \quad (3.32)$$

onde: D = diâmetro do conduto (m), e' = espessura da parede (m) e ν' = razão de Poisson.

3.3.3 Condição de estabilidade

Devido a não linearidade do termo atrito na equação 3.14, a imprecisão da integral exige uma aproximação de primeira ordem. Quando o termo atrito se torna muito grande podem produzir instabilidade na solução, utilizando com isso aproximações de ordens superiores ou um processo iterativo para avaliação do termo atrito de conformidade com um intervalo de tempo Δt . Este procedimento pode tornar-se necessário. Quando menores intervalos de tempo Δt mais estável a solução numérica de transformação das equações diferenciais parciais não lineares em equações totais.

Este intervalo deve ser estabelecido obedecendo a uma condição de estabilidade e ao tempo computacional, pois menores intervalos de tempo Δt implicam em maior esforço computacional para definições das variáveis desconhecidas de carga e vazão que descrevem o escoamento transiente ao longo das tubulações.

Para negligenciar o termo não linear do atrito da equação transiente (equação 3.14) ou linearizá-lo, utiliza-se uma condição de estabilidade definida pelo número de Courant:

$$C_N = \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (3.33)$$

onde: a é velocidade da onda de celeridade (m/s), Δt é o intervalo de tempo (s) e Δx é o comprimento das seções das tubulações na qual é dividido as tubulações (m). Os termos Δt e Δx são os mesmos utilizados na “malha de discretização” do Método das Características, conforme FIGURA 16. O método numérico produzirá uma solução estável para cada tempo computacional Δt , e seção com comprimento Δx se $C_N \leq 1$.

As redes de distribuição de água, objeto de estudo deste trabalho, são formadas geralmente por mais de um tubo conectado, sendo, portanto necessários adotar o mesmo intervalo de tempo para que as condições de contorno nas junções possam ser usadas. Considerando que pequenos ajustes na velocidade da onda de celeridade a são preferíveis a ajustes nos comprimentos dos tubos que compõem a rede, permitindo a possibilidade de adoção do mesmo intervalo de tempo Δt . O intervalo de tempo Δt escolhido deve obedecer à condição de estabilidade de Courant. Para evitar o aparecimento de um artificial numérico umedecimento provocado pela atenuação e dispersões da onda de celeridade devido à divisão das tubulações em intervalos Δx , adota-se a condição de estabilidade $C_N \approx 1$, evitando desta forma interpolações.

3.3.4 Considerações finais

O Método das Características é um método numérico de resolução das equações hiperbólicas que descrevem o escoamento transiente. Este método permite o cálculo do transitório hidráulico em uma rede, por meio de equações explícitas que fornecem diretamente os valores de vazões nas tubulações da rede e cargas nos nós, a cada passo de tempo em função de valores no passo de tempo anterior.

Os modelos hidráulicos utilizados para calibração de uma rede podem apresentar várias condições de contorno. Foram apresentadas algumas condições de contorno presentes na rede hidráulica a ser analisada. Este trabalho não contempla o equacionamento de fluxos

transientes provocados por operação de bombas e reservatórios de nível variável, contudo estas condições de contorno podem ser facilmente dedutíveis, sem causar dificuldades na modelagem.

3.4 O problema inverso

3.4.1 Definição e conceitos básicos

Os vários métodos de análise de redes de distribuição de água, visando não só à calibração, mas, também a outras finalidades podem ser abordados de duas formas diferentes, o problema inverso e o problema direto. No problema direto, as condições físicas da rede são conhecidas e tenciona-se calcular as vazões nos tubos e as cargas hidráulicas nos nós. No problema inverso, não se dispõe destas informações, mas somente alguns dados disponíveis de carga hidráulica em poucos nós, desejando-se calcular ou estimar alguns parâmetros da rede, tais como fatores de atrito, rugosidades, diâmetros, demandas e identificação e localização de vazamentos. O problema inverso trata, portanto, as características da rede como variáveis.

De forma geral, a solução dos problemas inversos é feita por meio de métodos diretos e indiretos. Nos métodos inversos diretos, busca-se resolver diretamente as equações considerando os parâmetros como variáveis dependentes. Nos métodos inversos indiretos, utiliza-se um processo iterativo, onde os parâmetros variam e a simulação é repetida até reproduzir uma solução satisfatória. Os métodos indiretos são mais utilizados em razão da simplicidade de formulação matemática e do fato de serem menos sensíveis a erros nos dados de entrada.

Em um problema inverso procura-se a determinação de causas desconhecidas a partir de efeitos desejados ou observados. Em geral, as observações são imprecisas (dados contaminados com ruídos ou erros experimentais) e incompletas. Diferentemente, problemas diretos requerem um conhecimento completo e preciso das causas para a determinação dos efeitos.

Durante muitos anos, vários pesquisadores definiram o problema inverso como um problema “mal posto”. Um problema é considerado como “bem posto” quando ocorrem três

condições: existe uma solução, a solução é única e a solução é estável com relação a pequenas variações nos dados de entrada (PUDAR; LIGGETT, 1992). Dependendo da quantidade e qualidade dos dados e da forma como o problema é posto, o problema inverso pode não satisfazer algumas destas condições tornando-se um problema “mal posto”.

O problema inverso pode ser formulado de maneiras diversas. No caso de projeto de redes hidráulicas, são conhecidas a vazão total de abastecimento da rede e as demandas e pressões em alguns pontos, procurando-se determinar as características físicas da rede com estes dados. Existe geralmente mais de uma solução para este problema de projeto, sendo, portanto impossível determinar as características físicas da rede. Configura-se, portanto um problema “mal posto” pelo não aparecimento de única solução. Pode-se resolver a não unicidade de solução deste problema inverso adicionando mais medições de determinadas variáveis (PUDAR; LIGGETT, 1992).

A instabilidade é o problema mais comum na solução do problema inverso, caracterizada pelo fato de oscilar a solução. Geralmente isto ocorre devido às variações nos dados de entrada serem suficientemente pequenas, como, por exemplo, parâmetros físicos, variáveis de controle e condições iniciais. Pode-se mencionar que mudanças leves nas condições de contorno ou nos parâmetros físicos implicam mudanças na variável carga hidráulica, o que torna instável a solução do problema.

Os problemas inversos podem ser classificados como *exatamente determinados* onde o número de parâmetros desconhecidos é igual ao de equações, *subdeterminados* que possuem mais incógnitas do que equações ou *sobredeterminados*, aí existindo mais equações e medidas de cargas ou vazões do que incógnitas (PUDAR; LIGGETT, 1992).

3.4.2 Tipos de solução para o problema inverso

Segundo classificação de Neuman (1973), os métodos de resolução do problema inverso podem ser divididos em diretos e indiretos. A solução direta procura minimizar os erros gerados nas soluções das equações de uma maneira não iterativa. No método indireto busca-se a minimização do erro entre dados calculados e estimados de forma iterativa.

A solução direta trata os parâmetros como variáveis dependentes de um problema inverso com especificação das suas condições de contorno. O método procura a minimização dos resíduos das soluções das equações diferenciais que definem o problema. Estes resíduos provêm das diferenças entre as soluções encontradas destas equações com os valores dos dados observados e estimados dos parâmetros. Utilizam geralmente nesta solução métodos matemáticos como solução de matrizes, interpolações lineares, série numéricas e outros.

A solução indireta busca melhorar uma estimativa dos parâmetros de forma iterativa, até que o modelo apresente condições próximas da realidade. Este modelo baseia-se na minimização de uma função objetivo definida pela diferença entre resultados observados e calculados. O processo inicia-se com geração inicial dos parâmetros mediante uma simulação completa e compara-se o resultado com os medidos no sistema real. Se os valores estiverem suficientemente próximos, de acordo com a avaliação deles por meio de uma função objetivo, finaliza-se o processo e adota o atual conjunto de parâmetros gerados. Se os resultados, porém, não estiverem suficientemente próximos, são produzidos outros parâmetros com nova simulação e testados novamente por meio da função objetivo. O processo continua iterativamente até os valores reais e estimados se aproximarem bastantes ou a função objetivo atingir ou aproximar-se bastante de um erro aceitável.

3.4.3 Formulação do problema inverso e sua resolução

O problema inverso formulado neste estudo pode ser assim descrito: dadas medidas de cargas hidráulicas transientes em um ou mais nós de uma rede hidráulica, obtêm-se parâmetros que correspondam a um ajuste ótimo entre valores observados e calculados destas cargas.

A resolução deste problema inverso faz-se por meio de um método indireto, com a minimização iterativa da diferença quadrática entre resultados observados e calculados de cargas hidráulicas. Isto pode ser posto da seguinte forma:

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (3.34)$$

onde: TS = tempo de duração do transiente, NL = número de locais de medição na rede, $H_{i,j}^m$ = carga hidráulica medida (m), $H_{i,j}^c$ = carga hidráulica calculada (m), $i = 1, 2, \dots, NL$ e $j = 1, 2, \dots, TS$.

3.5 As estratégias de resolução

Este trabalho propõe identificar e quantificar o parâmetro vazamento de uma rede hidráulica, com a utilização de dados transientes de carga hidráulica por meio de um método inverso. O método inverso deste trabalho pretende criar um modelo que seja empregado em casos reais. Todavia o modelo deste experimento utiliza dados sintéticos de carga hidráulica resultantes de um evento transiente provocado por uma manobra de válvula localizada em um dos nós da rede hidráulica. O procedimento correto seria adquirir medidas de campo dos dados observados, incluindo até sua variação temporal na coleta das cargas hidráulicas. Isto permitiria resolver com bases reais o problema inverso por meio de um confronto de cargas calculadas e observadas. Neste ensaio, porém as cargas observadas (dados sintéticos) são obtidas de cargas hidráulicas transientes geradas de uma rede com parâmetros reais conhecidos, sendo assim consideradas “observações” de campo.

Na manobra de válvula que provoca o transiente, são previsto dois tipos: uma suave e uma brusca, diferenciando uma da outra pelo tempo de fechamento da válvula. As cargas observadas são coletadas em um nó ou dois nós da rede exemplo e usadas durante todo o processo de calibração do parâmetro.

3.5.1 Condições iniciais

O funcionamento de modelos transientes baseia-se, de uma maneira geral, no conhecimento prévio das condições iniciais ou de estado permanente, em torno das vazões nas tubulações e cargas nos nós. Num problema de calibração de parâmetros com dados transientes, o problema inverso não possui as informações do regime permanente em todos os nós ou tubos, com exceção de dados de cargas hidráulicas em um nó da rede (nó monitorado). Para resolver este problema “mal posto”, calculam-se as condições permanentes nos nós e tubos, de posse de algumas informações que servirão como iniciadores de um modelo hidráulico permanente (rugosidades, fatores de atrito, velocidades máximas, vazamentos). A

população inicial de parâmetros é gerada de maneira aleatória com base em números aleatórios (*random number*) inseridos no processo.

Neste trabalho de pesquisa que envolve a calibração do parâmetro vazamento em uma rede hidráulica, adotou-se o conhecimento prévio dos diâmetros e comprimento dos tubos e foi escolhida uma rugosidade média para todas as tubulações da rede. As condições permanentes foram calculadas e usadas em duas situações. Na primeira situação, para todas as soluções estimadas durante todo processo iterativo, foram adotadas as mesmas condições permanentes, considerando, portanto como condições permanentes conhecidas. Na segunda situação, para cada solução estimada, foram calculadas as condições permanentes mediante de um modelo hidráulico permanente, sendo, portanto, considerada esta situação como condições permanentes desconhecidas ou calculadas pelo modelo.

A cada população de soluções deste modelo é encontrada uma solução ótima do parâmetro vazamento, e será considerada aquela na qual a função objetivo possuir o maior valor entre as soluções de cada população gerada. A solução ótima do processo iterativo é o maior valor entre os ótimos de todas as gerações.

Pode-se descrever o algoritmo do estudo que adota o método transiente inverso com o uso do AG (MTI-AG) de acordo com os seguintes passos:

- 1- início;
- 2- geração aleatória de NC soluções (NC= número de cromossomos);
- 3- codificação para representar as áreas de vazamentos;
- 4- cálculo das condições permanentes iniciais;
- 5- cálculo das cargas transientes usando o Método das Características(MOC);
- 6- cálculo da função ajuste de cada solução;
- 7- determinação da nova iteração por meio dos operadores: cruzamento e mutação do AG;
- 8- retorno ao passo (4) até um número máximo de gerações ser atingido

Este algoritmo corresponde à situação de condições iniciais permanentes desconhecidas. Na hipótese de conhecer as condições permanentes, a seqüência é a mesma, com exceção do passo (4) onde não existirá.

3.5.2 Manobra de válvula

Na análise do efeito da severidade do transiente na identificação e quantificação do vazamento, foram selecionados dois tipos de manobras de válvula. Uma manobra brusca e uma manobra suave. Uma manobra é caracterizada pela relação entre coeficiente de abertura (ou fechamento) relativo τ , em função do tempo t .

Nas duas manobras, a válvula de controle encontra-se totalmente aberta ($\tau=1$) e, a partir deste instante, ocorre o fechamento da válvula até a sua totalidade ($\tau=0$).

a) Manobra suave

A manobra suave obedece ao seguinte procedimento: a válvula encontra-se totalmente aberta no tempo $t=0s$ e fecha-se linearmente após o tempo $t=30s$. A figura 23 representa em gráfico esta manobra. As equações que podem validar esta manobra são expressas da seguinte forma:

Para o tempo $0s \leq t \leq 30s$:

$$\tau = -0,0333t + 1 \quad (3.35)$$

Para o tempo $t > 30s$:

$$\tau = 0 \quad (3.36)$$

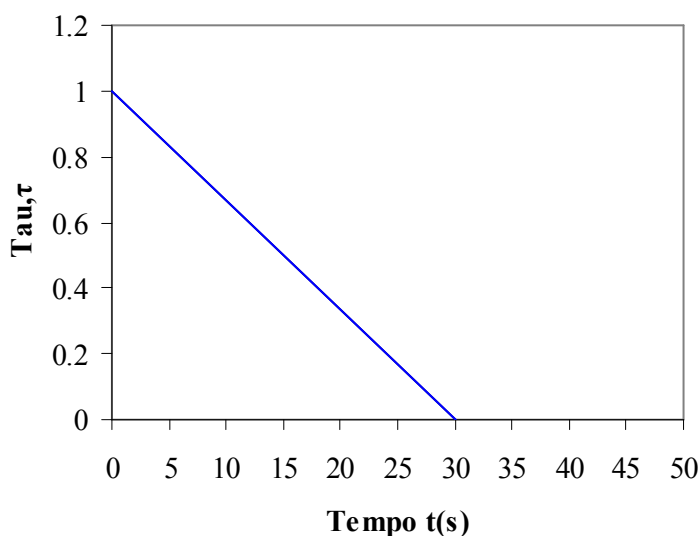


FIGURA 23 – Manobra suave de válvula

b) Manobra brusca

A manobra brusca é expressa pelo fechamento linear de uma válvula de controle totalmente aberta no tempo $t=0s$ até o fechamento total no tempo $t=5s$. A figura 24. representa em gráfico esta manobra. As equações lineares desta manobra são expressas da seguinte forma:

Para o tempo $0s \leq t \leq 5s$:

$$\tau = -0,2t + 1 \quad (3.37)$$

Para o tempo $t > 5s$:

$$\tau = 0 \quad (3.38)$$

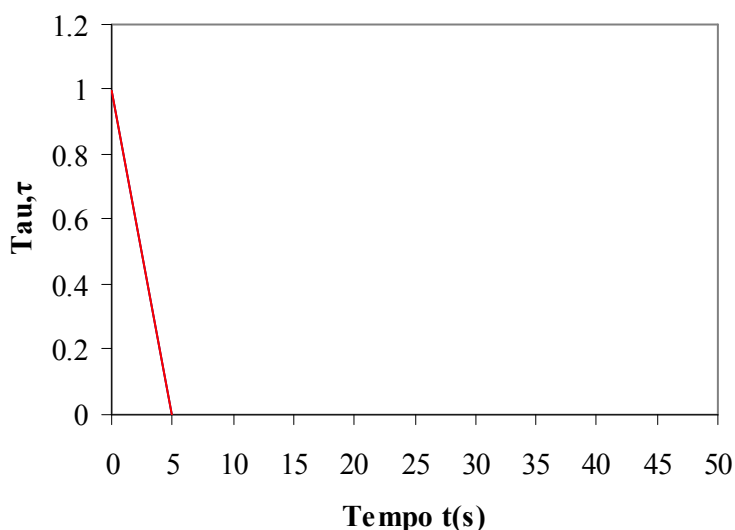


FIGURA 24 – Manobra brusca de válvula

3.5.3 Rugosidades e fatores de atrito

A rugosidade das tubulações da rede exemplo deste trabalho de pesquisa foi escolhida entre os valores médios de rugosidades dos diversos materiais. O valor escolhido foi de 0,30 mm, que corresponde à rugosidade do ferro fundido com leve oxidação, conforme figura 25. A rugosidade foi estabelecida como parâmetro conhecido em vez do fator de atrito, pois é um parâmetro que depende da natureza do material das tubulações, podendo ser determinado em laboratório. O fator de atrito de Darcy- Weisbach, geralmente, em muitos modelos hidráulicos é um parâmetro constante, porém, no regime não-permanente tende a ser alterado, pois as vazões passam por variações com o tempo. O fator de atrito é um parâmetro

dependente da vazão (número de Reynolds - Re) e da rugosidade relativa (ε/D). Por intermédio da equação de Swamee (1993) pode-se calcular o fator de atrito de Darcy-Weisbach da seguinte forma:

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (3.39)$$

onde: D = diâmetro do tubo (m), ε = rugosidade absoluta (mm), Re = número de Reynolds [$4Q/(\pi D \nu)$]; ν = viscosidade cinemática do fluido (m^2/s) e Q = vazão na tubulação (m^3/s).

A cada valor da vazão tem-se um número de Reynolds que produz um fator de atrito. Diante deste fato a escolha da rugosidade, pode-se notar, traz mais confiabilidade ao modelo do que a escolha do fator de atrito como parâmetro constante.

Material	ε (mm)
Cobre, latão, aço revestido de epoxi; PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,00575
Cimento amianto novo	0,025
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado revestido de asfalto, ferro forjado, ferro fundido centrifugado	0,05
Aço laminado novo	0,07
Aço soldado novo	0,075
Aço soldado revestido de cimento centrifugado, fofo em uso com cimento centrifugado	0,1
Aço galvanizado, sem costura	0,105
Ferro fundido com revestimento asfáltico, concreto centrifugado novo	0,16
Aço soldado limpo, usado; aço galvanizado, com costura	0,175
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,25
Ferro fundido com leve oxidação	0,3
Ferro fundido novo	0,375
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Ferro fundido oxidado	1,25
Aço rebitado novo, concreto com acabamento normal	2
Ferro fundido velho	4
Aço rebitado em uso	6

FIGURA 25 – Valores médios da rugosidade absoluta para alguns materiais

Fonte: PORTO (1999, p.49).

3.5.4 O parâmetro vazamento

Em sistemas de distribuição de água, as demandas ocorrem ao longo das tubulações e são variáveis durante o dia e para cada tipo específico de consumidor. A fim de determinar a demanda global de abastecimento de uma área, as concessionárias e empresas distribuidoras definem consumos *per capita* e coeficientes de máxima horária e máxima diária usados no cálculo da demanda total. Define-se, para simplificação de modelos de cálculo de vazões em redes com tubos homogêneos, um coeficiente de repartição de 50% da demanda de cada trecho para cada nó. Isto é válido, pois esta simplificação do modelo não provoca grandes erros no cálculo das demandas dos trechos com tubos de características homogêneas e consumos intermediários, com a aplicação de um coeficiente de repartição de 50% da demanda do trecho para cada nó a ele pertencente (SOLANO *et al.*, 2004). Este trabalho adota esta simplificação, porém os seus valores são dados conhecidos.

Os vazamentos de forma análoga assumem-se que ocorrem somente nos nós, pois caso contrário seriam necessários medidas adicionais e métodos mais sofisticados. Pelo fato de os vazamentos ocorrerem somente nos nós, eles tornam-se simplesmente demandas adicionais.

Utilizando a metodologia de Covas, Almeida e Ramos (2000) que, desprezando a energia cinética dentro do tubo, a diferença de cota entre o tubo e o vazamento e a velocidade de percolação no solo da água, aplicou-se a seguinte fórmula para quantificar a vazão dos vazamentos (Q_v):

$$Q_v = CdA_v \sqrt{2g(H - z)} \quad (3.40)$$

onde: Q_v = vazão de vazamento (m^3/s), Cd = coeficiente de descarga (adimensional), A_v = área de vazamento (m^2), g = aceleração da gravidade (m/s^2), H = carga hidráulica no ponto do vazamento (m), e z = cota topográfica do vazamento (m).

O uso dessa expressão facilita os cálculos, pois as incógnitas A_v são variáveis independentes, ao contrário das vazões. Na identificação do nó com vazamento e sua magnitude, as áreas de vazamento (A_v) são as possíveis soluções do problema pertencentes a

um intervalo contínuo de valores entre 10^{-6} m^2 a 10^{-3} m^2 . A amplitude deste intervalo é grande, pois se desconhece inicialmente a ordem de grandeza do vazamento real.

A identificação do nó de vazamento é desenvolvida em dois passos. O primeiro passo é a realização de simulações para apontar o(s) nó(s) mais promissor(es) para ocorrência de vazamento(s), descartando aqueles que apresentem vazamento(s) desprezível(eis). O segundo passo mantém os locais promissores restantes após o descarte dos desprezíveis como os ainda desconhecidos a serem identificados. O critério de descarte dos vazamentos desprezíveis a cada passo é o Índice de Aceitação de Vazamentos (IAV) expresso por Araújo (2003, p.75):

$$IAV_i (\%) = \frac{Q_{V_i}}{\sum_{i=1}^{NN} Q_{V_i}} \times 100 \quad (3.41)$$

onde: Q_{V_i} = vazão de vazamento no nó i e NN = número total de nós suspeitos de vazamentos. Os nós que não atingirem um percentual maior ou igual a 5% serão descartados como candidatos a vazamentos reais a cada passo.

3.5.5 Representação dos vazamentos no AG

A representação real é a escolhida como padrão neste trabalho. Os valores das áreas de vazamentos calculadas e constituintes da população inicial de soluções são gerados pela seguinte formulação:

$$A_v = (x_{max} - x_{min}) \cdot R + x_{min} \quad (3.42)$$

onde: x_{max} = limite superior do intervalo de áreas de vazamentos (10^{-3} m^2), x_{min} = limite inferior do intervalo de áreas de vazamentos (10^{-6} m^2), R = número aleatório gerado entre o intervalo $[0,1]$ e A_v = áreas de vazamentos.

3.5.6 Medida da eficiência da calibração

Para avaliar o grau de acerto na localização e quantificação do vazamento nos nós da rede exemplo a ser estudada, o Índice de Acerto (IA) é assim descrito (ARAÚJO, 2003, p.77):

$$IA(\%) = \left\{ \left[1 - \frac{|A_{v_i}^{real} - A_{v_i}^{estimado}|}{A_{v_i}^{real}} \right] \times 100 \right\} \quad (3.43)$$

onde: A_{v_i} = área de vazamento no nó i (real ou estimado) em m^2 e i = número do nó que contém vazamento real.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Introdução

Este capítulo visa apresentar os resultados do Método Transiente Inverso e o algoritmo genético (MTI-AG) na calibração de uma rede de distribuição de água para localização e quantificação de vazamentos. A medida que são apresentados os resultados, eles são também discutidos. A análise dos resultados leva em consideração algumas diferentes situações, a saber:

- situação 1- influência do efeito da severidade do transiente provocada por mudanças no tipo de manobra de válvula;
- situação 2- influência da variação do tamanho do registro transiente na calibração;
- situação 3- influência da variação dos parâmetros do AG;
- situação 4- influência do local e quantidade de vazamentos no processo de calibração e
- situação 5- influência da quantidade de nós monitorados.

Em todos os aspectos serão comparados os resultados do algoritmo otimizador, tendo as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente e aquelas com este conhecimento prévio.

4.2 Programas computacionais

Foram utilizados três programas computacionais para aplicação do MTI-AG (Método Transiente Inverso com uso do algoritmo genético). O primeiro programa corresponde ao simulador hidráulico proposto por Araújo (2003) para o cálculo das cargas transientes através do Método das Características (MOC). O segundo programa usa o algoritmo genético (AG) no processo de otimização do parâmetro vazamento da rede exemplo com o conhecimento prévio das suas condições iniciais permanentes. O terceiro programa usa o AG como ferramenta de otimização, porém não se tem o conhecimento prévio das condições iniciais permanentes da rede exemplo, sendo encontradas estas condições a cada

resposta simulada. As condições iniciais do estado permanente da rede nas diferentes situações são calculadas pelo modelo transiente estabelecido na metodologia, após um intervalo de tempo, quando é obtido o seu estado de equilíbrio.

4.3 Rede exemplo

A rede hidráulica a ser analisada neste estudo foi proposta no trabalho de Liggett e Chen (1994), porém a aplicação do procedimento MTI-AG não impõe restrição de tipo e tamanho de rede hidráulica. Na solução do problema inverso, como estratégia de solução, foi definido que as cargas hidráulicas transientes “observadas ou medidas” no(s) nó(s) monitorado(s) e as condições iniciais do regime permanente foram obtida a partir de condições transientes, usando o Método das Características.

A figura 26 ilustra a rede exemplo adotada. A rede contém um reservatório, 12 tubos e 8 nós. O nó 1 representa um reservatório de carga constante ($H_0 = 450\text{m}$) e os demais nós representam pontos de demanda constantes e conhecidos da rede. O nó 8 representa também ponto de localização de uma válvula de controle.

A tabela 1 apresenta as características físicas da rede hidráulica e a tabela 2 mostra as demandas nos nós e as suas cotas topográficas. Uma demanda negativa significa vazão saindo do nó. A coluna (6) da tabela 1 apresenta os valores iniciais da celeridade nos tubos. Esses valores correspondem às seguintes características: espessura da parede do tubo, $e' = 10\text{mm}$; razão de Poisson, $\nu' = 0,25$; módulo de elasticidade do material do tubo, $E = 120\text{ GPa}$; módulo de elasticidade da água, $K = 2,19\text{ GPa}$; massa específica da água, $\rho = 999\text{ kg/m}^3$. Para um sistema de dois ou mais condutos, é necessário que o mesmo intervalo de tempo seja usado para todos os condutos, tal que as condições de contorno nas junções possam ser usadas. Este intervalo de tempo deverá ser selecionado de forma a obedecer a condição de estabilidade de Courant ($\Delta x > a\Delta t$). Para evitar interpolação, entretanto, Δt deve ser escolhido de maneira a satisfazer a seguinte equação (CHAUDHRY, 1987).

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N) \quad (4.1)$$

onde: n_i é um número inteiro e igual ao número de trechos no qual o i -ésimo conduto é dividido; L_i é o comprimento do i -ésimo conduto; a_i é a celeridade do i -ésimo conduto e N é o número de tubos no sistema. Como a celeridade não é precisamente conhecida, ajustes menores nos seus valores são aceitáveis. A coluna (7) da tabela 1 apresenta os valores da celeridade ajustados, seguindo a condição de estabilidade de Courant ($\Delta x > a\Delta t$).

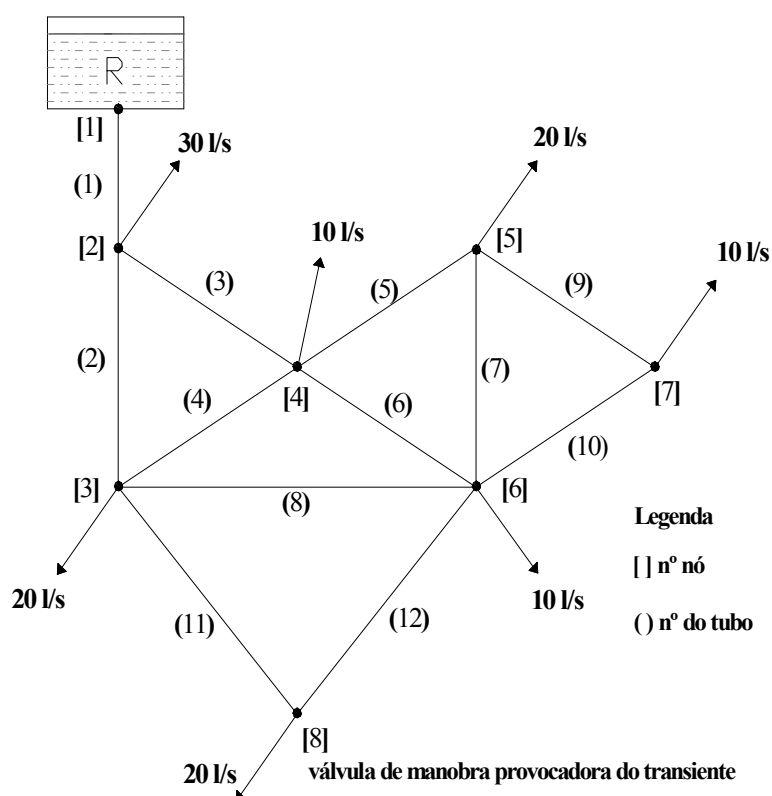


FIGURA 26 – Rede exemplo hidráulica usada na calibração

TABELA 1 – Características físicas dos tubos

Tubo (1)	Nó montante (2)	Nó jusante (3)	L (m) (4)	D (m) (5)	a (m/s) (6)	a_j (m/s) (7)
1	1	2	300,0	0,400	1156,6	1500,0
2	2	3	305,0	0,100	1374,9	1525,0
3	2	4	215,0	0,300	1217,4	2150,0
4	4	3	215,0	0,100	1374,9	2150,0
5	4	5	215,0	0,250	1251,7	2150,0
6	4	6	215,0	0,100	1374,9	2150,0
7	5	6	305,0	0,100	1374,9	1525,0
8	6	3	305,0	0,100	1374,9	1525,0
9	5	7	215,0	0,150	1329,9	2150,0
10	7	6	215,0	0,100	1374,9	2150,0
11	3	8	215,0	0,100	1374,9	2150,0
12	6	8	215,0	0,100	1374,9	2150,0

TABELA 2 – Demanda nos nós

Nó	Demanda (l/s)	Cota (m)
(1)	(2)	(3)
1	120,00	420,00
2	-30,00	420,00
3	-20,00	415,00
4	-10,00	410,00
5	-20,00	410,00
6	-10,00	418,00
7	-10,00	428,00
8	-20,00	419,00

O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional, é de 0,1s. Com este intervalo de tempo, os tubos da rede são “discretizados” em 16 trechos, cada qual com aproximadamente 150 m de comprimento. O transiente “observado” é simulado para maioria das situações com um comprimento de registro de 10s. Como o $\Delta t = 0,1s$ e o comprimento de registro é de 10s, o número total de valores de carga observados é de 100. Se for o comprimento de registro 20s, o número total de valores de carga será 200, e, para 30s, será 300 e assim sucessivamente, pois o número de valores de carga hidráulica observada necessária para simulação corresponde ao tempo de análise do transiente (tamanho do registro) dividido pelo intervalo de tempo de coleta dos dados “observados”.

O nó 8 contém uma válvula que regula a vazão. A manobra que provoca o transiente na rede obedece às equações de fechamento estabelecidas no item 3.5.2 do capítulo Materiais e Métodos deste estudo.

4.4 Parâmetros do AG

Os parâmetros do AG aplicado na calibração para todas as situações foram:

- representação dos parâmetros- real;
- população de soluções, NC- 100;
- tipo de cruzamento- aritmético;
- probabilidade de cruzamento, p_c - 100% em todas as situações com exceção da situação 3 onde é variável;
- tipo de mutação- uniforme;

- probabilidade de mutação, p_m - 0,5% em todas as situações com exceção da situação 3 onde é variável e
- número de gerações, NG- 100.

Em todas as identificações realizadas, as estimativas dos parâmetros consistiram no maior valor da função objetivo entre 10 processamentos do AG realizados, usando diferentes conjuntos de números aleatórios a partir de sementes diversas.

As soluções simuladas foram “logaritmizadas” para facilitar o processamento e diminuir o tempo computacional.

Optou-se pela representação real dos parâmetros em relação à binária, pois, com base na pesquisa de Araújo (2003) e testes feitos preliminarmente com o AG na busca de soluções ótimas de funções, foram produzidos resultados mais precisos, levando menor tempo de processamento computacional.

O cruzamento aritmético proposto por Michalewicz (1994) e a mutação uniforme foram escolhidos com apoio no estudo proposto por Araújo (2003) e testes prévios mostrando estas opções mais adequadas na solução do problema inverso proposto na metodologia deste estudo.

4.5 Estudo da identificação dos vazamentos

Este trabalho estuda o procedimento de identificação de vazamentos sob dois pontos de vista: com as condições iniciais do regime permanente previamente conhecidas ou sem este conhecimento prévio, sendo consideradas, assim, como condições desconhecidas. Com exceção dos nós 1 e 8, todos os nós restantes são pontos possíveis de vazamentos.

As cargas hidráulicas nos nós e as vazões nos tubos correspondentes às condições iniciais em regime permanente na situação em que são conhecidas estão apresentadas nas tabelas 3 e 4 respectivamente.

TABELA 3 – Cargas hidráulicas em estado permanente conhecidas

Tipo de Carga	Número do nó							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Sem vazamentos	450,00	448,85	439,65	447,54	446,48	441,57	444,52	435,58
Um vazamento-nó 3	450,00	449,73	439,86	449,06	448,40	443,25	446,61	436,64
Um vazamento-nó 5	450,00	448,95	439,84	447,64	446,48	441,74	444,58	435,79
Dois vazamentos nós 3 e 5	450,00	449,52	439,27	448,60	447,68	442,56	445,86	435,98

TABELA 4 – Vazões em estado permanente conhecidas

Tubo	$Q_{inicial} (m^3/s)$			
	S/ vaz.	Vaz. nó 3	Vaz. nó 5	Vaz. nó 3 e 5
1	0,120000	0,125000	0,125000	0,130000
2	0,011093	0,012408	0,011187	0,012494
3	0,078898	0,082602	0,083809	0,087514
4	0,012484	0,014069	0,012503	0,014085
5	0,045788	0,047166	0,050597	0,051984
6	0,010628	0,011365	0,010709	0,011443
7	0,008175	0,008802	0,008088	0,008719
8	0,005350	0,006817	0,005270	0,006747
9	0,017616	0,018361	0,017512	0,018262
10	0,007616	0,008361	0,007512	0,008262
11	0,008930	0,008290	0,008962	0,008324
12	0,011068	0,011712	0,011038	0,011678

A identificação do(s) nó(s) de vazamento(s) e sua magnitude, como definido no capítulo 3, serão desenvolvidas em dois passos. O primeiro (estimação preliminar) tem a finalidade de apontar os locais de ocorrência de vazamento(s), descartando aquele(s) desprezível(eis). Um vazamento é desprezível quando o IAV for menor ou igual a 5%. Nesta etapa, somente o IAV é investigado, pois não se sabe onde se encontra o vazamento e sua magnitude. No segundo passo (estimação final), mantêm-se os vazamentos em locais promissores como desconhecidos a serem identificados. O índice de acerto (IA) é ressaltado nesta segunda estimação e valores de acerto (IA) próximos de 100% comprovam a eficiência do método, assim como a presença de um ou mais nós promissores correspondendo aos nós de vazamentos reais.

O desempenho do método é verificado na estimativa final por meio do somatório dos vazamentos estimados dos nós (Q_v) e o valor estimado da vazão de vazamento no nó ou

nós promissores restantes. Quanto mais próximos o valor do somatório e os valores estimados do nó ou nós promissores restantes forem da vazão ou vazões de vazamentos reais, melhor será o desempenho do modelo.

4.5.1 Influência da severidade do efeito transiente pela mudança na manobra da válvula (situação 1)

A situação 1 analisará os resultados encontrados no método MTI-AG para identificar o vazamento no nó 3 ($A_v = 0,000226 \text{ m}^2$) com a variação dos tipos de manobra de válvula estabelecida no item o 3.5.2 deste estudo, para dois casos (manobra suave e brusca), e assim verificar a influência do efeito da severidade do transiente provocada por esta mudança e comparar os resultados obtidos nos dois casos com as condições iniciais do regime permanentes desconhecidas previamente e com este conhecimento:

caso 1- manobra suave com tempo de fechamento da válvula $t_f=30\text{s}$ e

caso 2- manobra brusca com tempo de fechamento da válvula $t_f=5\text{s}$.

O problema inverso é posto da seguinte forma:

- a carga no nó 1 é constante e conhecida igual a 450,00 m;
- as demandas nos nós são conhecidas (tabela 2);
- os diâmetros e as rugosidades dos tubos são conhecidos;
- as cargas hidráulicas no nó 8 são conhecidas (cargas observadas) e o tempo de análise do transiente é $t_s=10\text{s}$ e
- os locais e áreas de vazamentos são desconhecidas.

As cargas hidráulicas transientes “observadas” para o nó 8 para os dois tipos de manobra de válvula podem ser vistas na figura 27.

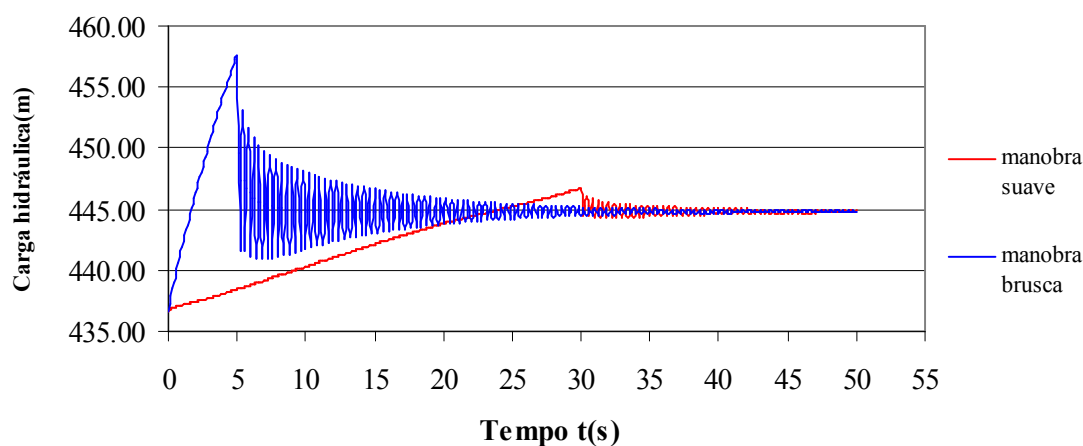


FIGURA 27 – Cargas hidráulicas transientes observadas no nó 8 para os dois tipos de manobras de válvulas: suave ($t_f=30s$) e brusca ($t_f=5s$)

Resultados com as condições iniciais desconhecidas - casos 1 e 2

TABELA 5 – Estimativas de vazamentos - caso 1 - condições iniciais desconhecidas - estimacão preliminar (manobra suave)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000015	0,0	0,36	4,9
3	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4
4	0,000000	0,000030	0,0	0,83	11,2
5	0,000000	0,000026	0,0	0,71	9,6
6	0,000000	0,000004	0,0	0,09	1,2
7	0,000000	0,000046	0,0	0,88	11,8
ΣQ_V	-	-	5,0	7,45	100,0

TABELA 6 – Estimativas de vazamentos - caso 2 - condições iniciais desconhecidas - estimacão preliminar (manobra brusca)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000049	0,0	1,18	18,0
3	0,000226	0,000221	5,0	4,88	74,1
4	0,000000	0,000007	0,0	0,19	2,9
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,1
6	0,000000	0,000006	0,0	0,13	2,0
7	0,000000	0,000003	0,0	0,06	0,9
ΣQ_V	-	-	5,0	6,59	100,0

TABELA 7 – Estimativas de vazamentos - caso 1 - condições iniciais desconhecidas - estimação final (manobra suave)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	97,3	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,7	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,13	100,0	-

TABELA 8 – Estimativas de vazamentos - caso 2 - condições iniciais desconhecidas - estimação final (manobra brusca)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000010	0,0	0,24	4,6	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	95,4	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,23	100,0	-

Comentários

As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados da estimação preliminar dos vazamentos com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas no caso 1 (manobra suave) e no caso 2 (manobra brusca). Na simulação preliminar do caso 1 (tabela 5), os nós 3, 4, 5 e 7 despontam como promissores, com IAV's de 61,4%, 11,2%; 9,6% e 11,85% respectivamente. Os nós 2 e 6 são descartados. Na simulação preliminar do caso 2 (tabela 6), os nós 2 e 3 despontam como promissores, com IAV de 18,0 % e 74,1%, respectivamente. Os nós 4, 5, 6 e 7 são descartados.

Na estimativa final dos casos 1 e 2 (tabelas 7 e 8), somente o nó 3 é considerado promissor, com IAV's de 97,3% e 95,4 %, respectivamente. O índice de acerto final (IA) é de 99,8% para ambos os casos, o que comprova a eficiência do método para ambas as manobras, com o desconhecimento prévio das condições iniciais do regime permanente.

A manobra de válvula suave apresentou desempenho melhor na identificação do vazamento em relação à manobra brusca, com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente.

Resultados com as condições iniciais conhecidas - casos 1 e 2

TABELA 9 – Estimativas de vazamentos - caso 1 - condições iniciais conhecidas- estimação preliminar (manobra suave)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000049	0,0	1,18	18,2
3	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9
4	0,000000	0,000007	0,0	0,19	3,0
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,1
6	0,000000	0,000006	0,0	0,13	2,1
7	0,000000	0,000006	0,0	0,11	1,8
ΣQ_V	-	-	5,0	6,51	100,0

TABELA 10 – Estimativas de vazamentos-caso 2- condições iniciais conhecidas - estimação preliminar (manobra brusca)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0.000000	0.000049	0.0	1.18	18.2
3	0.000226	0.000215	5.0	4.75	72.9
4	0.000000	0.000007	0.0	0.19	3.0
5	0.000000	0.000005	0.0	0.14	2.1
6	0.000000	0.000006	0.0	0.13	2.1
7	0.000000	0.000006	0.0	0.11	1.8
ΣQ_V	-	-	5.0	6.51	100.0

TABELA 11– Estimativas de vazamentos - caso 1- condições iniciais conhecidas - estimação final (manobra suave)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000002	0,0	0,05	1,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,04	100,0	-

TABELA 12 – Estimativas de vazamentos -caso 2- condições iniciais conhecidas- estimação final (manobra brusca)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000002	0,0	0,05	1,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,04	100,0	-

Comentários

As tabelas 9 e 10 apresentam os resultados da estimação preliminar de vazamento para o caso 1 (manobra suave) e o caso 2 (manobra brusca), respectivamente, com as condições iniciais do regime permanente conhecidas previamente. No caso 1 (tabela 9) e no caso 2 (tabela 10) na estimação preliminar, os nós descartados foram 4, 5, 6 e 7, permanecendo como promissores os nós 2 e 3, com IAV's respectivos de 18,2% e 72,9%. No passo final (tabelas 11 e 12), o nó 3 aparece como o único nó promissor para ambos os casos (IAV= 99%) e com um índice de acerto de 99,8%, o que comprova a eficiência do método para ambas as manobras, com as condições iniciais do regime permanente conhecidas previamente.

A eficiência do método na busca do vazamento real mostrou-se a mesma para ambas as manobras de válvula.

4.5.2 Influência da variação do tamanho do registro transiente na calibração (situação 2)

A situação 2 analisará os resultados encontrados pelo método MTI-AG para identificar o vazamento no nó 3 ($A_V = 0,000226$ m²), com a variação da quantidade de dados transientes utilizados na calibração, e assim verificar a influência desta variação, comparando estes resultados obtidos, utilizando as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente e conhecidas. A análise será em um caso:

caso 1- variação do tempo de análise do transiente podendo assumir $t_s=10s$, $t_s=20s$, $t_s=30s$, $t_s=40s$ e $t_s=50s$.

A quantidade de dados “observados” de cargas transientes usados na calibração é igual ao tempo de análise do transiente (t_s) dividido pelo intervalo computacional de coleta destes dados.

O problema inverso é posto da seguinte forma:

- a carga no nó 1 é constante e conhecida igual a 450,00 m;
- as demandas nos nós são conhecidas (tabela 2);
- os diâmetros e as rugosidades dos tubos são conhecidos;
- as cargas hidráulicas em um ponto, no nó 8 são conhecidas (nó monitorado) e o tempo de análise do transiente é variável ($t_s=10s$, $t_s=20s$, $t_s=30s$, $t_s=40s$, $t_s=50s$);
- a manobra de válvula é suave ($t_f=30s$) e
- os locais e áreas de vazamentos são desconhecidas.

Resultados com as condições iniciais desconhecidas - caso 1

TABELA 13 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar

tempo de análise do transiente(t_s) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			nó(s) promissor(es) (7)	ΣQ_V estimados (8)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)		
10s	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4	3, 4, 5 e 7	7,45
20s	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4	3, 4, 5 e 7	7,45
30s	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4	3, 4, 5 e 7	7,45
40s	0,000226	0,000221	5,0	4,88	74,1	2 e 3	6,59
50s	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51

TABELA 14 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final

tempo de análise do transiente(t_s) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%) (7)	nó(s) promissor(es) (8)	ΣQ_V estimados (9)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)			
10s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	97,3	99,8	3	5,13
20s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	97,3	99,8	3	5,13
30s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	97,3	99,8	3	5,13
40s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	91,2	99,8	3	5,47
50s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	91,2	99,8	3	5,47

Comentários

A tabela 13 apresenta a estimativa preliminar de vazamento para tempos de análise do transiente (t_s) de 10s, 20s, 30s, 40s e 50s (caso1), com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente. As colunas 2 e 3 desta tabela correspondem às áreas de vazamento (A_V) real e estimado do nó 3 (nó de vazamento real), e as colunas 4 e 5, a sua vazão de vazamento (Q_V) real e estimada pelo modelo. O seu IAV é mostrado na coluna 6 e a relação dos nós promissores restantes é apresentada na coluna 7. O somatório dos vazamentos dos nós estimados (ΣQ_V) nesta etapa está presente na coluna 8. Neste passo inicial, os nós promissores foram os nós 3, 4, 5 e 7 e os descartados 2 e 6 para o tempo do transiente (t_s) de 10s, 20s e 30s. O nó 3 apresentou-se para os três tempos $t_s = 10s, 20s$ e $30s$ como o mais promissor (IAV>50%) por possuir um IAV correspondendo a 61,4%. Para o tempo de transiente (t_s) de 40s e 50s, os nós promissores foram os 2 e 3, sendo descartados os nós 4, 5, 6 e 7. O nó 3 mostrou-se também o mais promissor para os tempos $t_s = 40s$ e $t_s = 50s$, com IAV's de 74,1 % e 72,9%, respectivamente.

A tabela 14 apresenta a estimativa final de vazamento para os tempos de análise do transiente (t_s) de 10s, 20s, 30s, 40s e 50s, com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente. Esta tabela, nesta etapa final, difere da tabela 13 pela inclusão dos valores de índice de acerto (IA) na coluna 7 para cada tempo de análise (t_s). Nesta estimativa final o único nó promissor foi o nó 3, nó de vazamento real, com o mesmo IAV de 97,3% para os tempos 10s, 20s e 30s. Para os tempos 40s e 50s, o IAV também foi o mesmo e igual a 91,2%. Em todos os tempos (t_s), o índice de acerto foi de 99,8%, consolidando a eficácia do método em encontrar vazamento e quantificá-lo com tempos de análise do transiente diferentes.

Em relação à análise da influência da variação do tamanho do registro de dados transientes na identificação de vazamentos, pode-se afirmar com base nos resultados obtidos, que o método obteve desempenhos iguais nos resultados estimados para os tempos 10s, 20s, 30s e desempenho um pouco inferior para os tempos 40s e 50s. Os somatórios dos vazamentos estimados finais para os tempos 40s e 50s foram iguais, assim como foram iguais os dos obtidos com os tempos 10s, 20s e 30s.

Resultados com as condições iniciais conhecidas - caso 1

TABELA 15 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar

tempo de análise do transiente(ts) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			nó(s) promissor(es) (7)	ΣQ_V estimados (8)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)		
10s	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51
20s	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51
30s	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51
40s	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51
50s	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51

TABELA 16 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final

tempo de análise do transiente(ts) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%) (7)	nó(s) promissor(es) (8)	ΣQ_V Estimados (9)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)			
10s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04
20s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04
30s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04
40s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04
50s	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04

Comentários

A tabela 15 apresenta os valores estimados pelo modelo para o caso 1 (ts=10s, 20s, 30s, 40s e 50s), com o conhecimento prévio das condições iniciais do regime permanente. A tabela 15 de maneira análoga à tabela 13 possui as mesmas colunas correspondentes aos mesmos objetivos, diferenciando-se somente pela apresentação de valores estimados com o conhecimento prévio das condições iniciais do regime permanente. Nesta estimativa preliminar, os nós promissores obtidos foram os nós 2 e 3 e os descartados os nós 3, 4, 5, 6 e 7, para todos os tempos de análise do transiente. O nó 3 mostrou-se o mais promissor, com um IAV de valor 72,9%, igual para todos os tempos de análise (ts).

A tabela 16, de forma análoga a tabela 14, apresenta os valores da estimativa final com as condições iniciais do regime permanente conhecidas previamente. Nesta tabela,

verifica-se que o único nó promissor restante foi o nó 3, com um IAV de 99% para todos os tempos de análise (t_s). O índice de acerto (IA) foi bastante elevado, 99,8%, sendo este valor o mesmo para todos os tempos (t_s), mostrando mais uma vez a eficácia do método aplicado a esta situação.

De uma maneira geral, o método apresentou o mesmo desempenho para todos os tempos analisados, justificando a ausência de sensibilidade para resultados estimados com tamanho de registros diferentes de cargas “observadas”, quando aplicado com as condições iniciais do regime permanente conhecidas previamente.

4.5.3 Influência da variação dos parâmetros do AG (situação 3)

A situação 3 analisará os resultados encontrados pelo método MTI-AG para identificar o vazamento no nó 3 ($A_v = 0,000226 \text{ m}^2$) com a variação dos parâmetros do AG utilizados na calibração em dois casos: com a variação da probabilidade de cruzamento (p_c) e com a variação da probabilidade de mutação (p_m). Verifica-se a influência da variação dos parâmetros do AG nos dois casos e compara os resultados obtidos em cada caso com as condições iniciais do regime permanentes desconhecidas e com as conhecidas previamente. Os casos da situação 3 são:

caso 1- variação da probabilidade de cruzamento (p_c) cujos valores podem assumir 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% e

caso 2- variação da probabilidade de mutação (p_m) cujos valores podem assumir 0%, 0,5%, 1,0%, 5% ,10%.

O problema inverso é posto da seguinte forma:

- a carga no nó 1 é constante e conhecida igual a 450,00 m;
- as demandas nos nós são conhecidas (tabela 2);
- os diâmetros e as rugosidades dos tubos são conhecidos;
- as cargas hidráulicas no nó 8 são conhecidas (nó monitorado) e o tempo de análise do transiente é $t_s=10s$;
- a manobra de válvula é suave ($t_f=30s$) e
- os locais e áreas de vazamentos são desconhecidos.

Resultados do caso 1 com as condições iniciais desconhecidas

TABELA 17 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar

probabilidade de cruzamento (p _c) (1)	A _V (m ²)		Q _V (l/s)			nó(s) promissor(es) (7)	ΣQ _V (8)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)		
50%	0,000226	0,000200	5,0	4,42	59,0	3, 4,e 5	7,49
60%	0,000226	0,000204	5,0	4,51	61,4	2, 3, 4, 5 e 7	8,53
70%	0,000226	0,000199	5,0	4,40	57,3	2, 3, 4 e 5	7,66
80%	0,000226	0,000190	5,0	4,20	64,5	3, 4, 5 e 6	6,51
90%	0,000226	0,000208	5,0	4,59	71,1	3, 5 e 6	7,66
100%	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4	3, 4, 5 e 7	7,45

TABELA 18 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final

probabilidade de Cruzamento (p _c) (1)	A _V (m ²)		Q _V (l/s)			IA (%) (7)	nó(s) promissor(es) (8)	ΣQ _V (9)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)			
50%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	96,8	99,8	3	5,16
60%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	92,1	99,8	3	5,42
70%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	91,2	99,8	3	5,47
80%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	98,7	99,8	3	5,06
90%	0,000226	0,000207	5,0	4,57	95,2	97,6	3	5,06
100%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	98,7	99,8	3	5,13

Comentários

A tabela 17 apresenta a estimativa preliminar de vazamento aplicada a um AG com probabilidades de cruzamento (p_c) de 50%, 60%, 70% , 80% 90% e 100% e com as condições iniciais do regime permanente sem conhecimento prévio, correspondendo, assim, ao caso 1. As colunas 2 e 3 representam as áreas de vazamento (A_V) real e estimado pelo método no nó 3 (nó real de vazamento) e as colunas 4 e 5 as suas vazões de vazamento (Q_V) real e estimada. A coluna 7 apresenta os nós promissores e a coluna 8 o somatório das vazões estimadas dos nós nesta etapa. Verifica-se na tabela que o modelo com a probabilidade de cruzamento (p_c) de 60% apresentou a maior quantidade de nós promissores (2, 3, 4, 5 e 7), descartando somente o nó 6. A menor quantidade de nós promissores foi verificada com a probabilidade (p_c) de 50% (nós 3, 4 e 5) e 90% (nós 3, 5 e 6), tendo portanto os maiores

descarte de nós desprezíveis. Em todas as probabilidades de cruzamento utilizadas nesta estimativa preliminar (caso1), o nó 3 despontou como o nó mais promissor.

A tabela 18 expõe os valores da estimativa final de vazamento com as condições iniciais do regime permanente desconhecida previamente. A tabela 18 diferencia da tabela 17 pela inclusão da coluna 7, correspondendo ao índice de acerto (IA) para as diferentes probabilidades de cruzamento utilizadas nesta etapa. Neste último passo da estimativa do método, em todas as probabilidades (p_c), o nó 3 apareceu como o único promissor e os índices de acertos foram próximos de 100%, provando a eficiência do método na identificação de vazamento, com a variação das probabilidades de cruzamento.

Pode-se acentuar, com base nos resultados obtidos, que os melhores desempenhos foram para as probabilidades de cruzamento mais altas, como 80%, 90% e 100%.

Resultados do caso 1 com as condições iniciais conhecidas

TABELA 19 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar

probabilidade de cruzamento (p_c) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			nó(s) promissor(es) (7)	ΣQ_V (8)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)		
50%	0,000226	0,000191	5,0	4,22	69,4	3, 4, 6 e 7	6,08
60%	0,000226	0,000213	5,0	4,70	82,2	3 e 7	5,72
70%	0,000226	0,000223	5,0	0,50	88,4	3 e 7	5,57
80%	0,000226	0,000201	5,0	4,44	73,2	2, 3 e 4	6,06
90%	0,000226	0,000215	5,0	4,75	82,2	3 e 7	5,77
100%	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51

TABELA 20 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa final

probabilidade de Cruzamento (p_c) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%) (7)	nó(s) promissor(es) (8)	ΣQ_V (9)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)			
50%	0,000226	0,000225	5,0	4,97	99,6	99,4	3	4,99
60%	0,000226	0,000224	5,0	4,95	96,3	98,9	3	5,14
70%	0,000226	0,000224	5,0	4,95	96,3	98,9	3	5,14
80%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	96,1	99,8	3	5,19
90%	0,000226	0,000219	5,0	4,84	99,0	99,8	3	4,95
100%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04

Comentários

As tabelas 19 e 20 exibem os resultados obtidos nas estimativas preliminar e final de vazamento para as diferentes probabilidades de cruzamento (p_c) do AG com as condições iniciais do regime permanente conhecidas antecipadamente.

A tabela 19, de forma análoga à tabela 17, é possuidora de dados sobre os mesmos objetivos, diferenciando somente na apresentação de valores estimados com o conhecimento prévio das condições iniciais do regime permanente. De acordo com a tabela 19, neste passo inicial, ocorreu o maior descarte de nós desprezíveis nas probabilidades (p_c) de 60%, 70%, 90% e 100%, restando somente dois nós promissores. O pior descarte foi com a probabilidade de cruzamento de 50%, na qual somente os nós 2 e 5 foram considerados desprezíveis. O nó 3 mostrou-se o mais promissor em todas as probabilidades de cruzamento (p_c) nesta etapa inicial.

A tabela 20 diferencia-se da tabela 19 somente pela inclusão da coluna 7, correspondendo ao índice de acerto (IA) desta etapa final para as diferentes probabilidades de cruzamento (p_c). De acordo com a tabela 21, os índices de acerto (IA) obtidos foram elevados para todas as probabilidades (p_c), demonstrando a eficiência do método para a variação das probabilidades de cruzamento. Nesta estimação final o nó 3 apareceu como o único promissor para todas as probabilidades (p_c).

Na análise do desempenho do método, verificou-se melhoria na identificação de vazamentos com o aumento das probabilidades de cruzamento.

Resultados do caso 2 com as condições iniciais desconhecidas

TABELA 21 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar

probabilidade de mutação (p_m) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			nó(s) promissor(es) (7)	ΣQ_V (8)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)		
0%	0,000226	0,000125	5,0	2,76	40,8	2, 3, 5 e 6	6,77
0,05%	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4	3, 4, 5 e 7	7,45
1,0%	0,000226	0,000183	5,0	4,04	41,4	2, 3, 4 e 6	9,77
5%	0,000226	0,000194	5,0	4,28	62,4	3, 4, 5 e 6	6,9

TABELA 22 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final

Probabilidade de mutação (p_m) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%) (7)	nó(s) promissor(es) (8)	ΣQ_V (9)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)			
0%	0,000226	0,000221	5,0	4,88	97,3	97,6	3	5,84
0,05%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	96,8	99,8	3	5,13
1,0%	0,000226	0,000226	5,0	4,88	96,8	99,8	3	5,84
5%	0,000226	0,000225	5,0	4,97	96,3	99,4	3	5,16

Comentários

Nestas estimativas preliminar e final, as tabelas 21 e 22 expõem os valores estimados de vazamento para as probabilidades de mutação (p_m) de 0%, 0,05%, 1% e 5%, com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente, correspondendo, assim, ao caso 2.

A tabela 21 é constituída das colunas 2 e 3 para as áreas de vazamento (A_V) real e estimado do nó 3 e das colunas 5 e 6 para as vazões de vazamento (Q_V) real e estimada do nó 3. A coluna 8 apresenta os valores do somatório das vazões estimadas (ΣQ_V) dos nós nesta etapa. Em todas as probabilidades (p_m), ocorreram a mesma quantidade de descarte de nós desprezíveis, permanecendo como promissores somente quatro nós. O nó 3 surgiu como o mais promissor para as probabilidades (p_m) de 0,05% e 5%, porém, para as probabilidades de mutação (p_m) de 0% e 1% não pode-se confirmar esta afirmação.

A tabela 22 distingui-se da tabela 21 pelo acréscimo da coluna com os índices de acertos (IA) (coluna 7) para todas as probabilidades (p_m). Por meio da tabela 22 se pode verificar que o nó 3 se apresentou como o único nó promissor nesta etapa. Os índices de acerto (IA) para todas as probabilidades tiveram valores próximos de 100%, podendo-se deduzir a excelente eficiência do método na identificação do vazamento com diferentes probabilidades de mutação (p_m).

A atuação do método na identificação do vazamento, com as condições iniciais desconhecidas antecipadamente, obteve os melhores resultados em ordem decrescente para as

probabilidades de mutação (p_m) de 0,05%, 1% , 5% e 0%, confirmando a idéia de se usar probabilidade de mutação pequena.

Resultados do caso 2 com as condições iniciais conhecidas

TABELA 23 – Estimativa de vazamento no nó 3 - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar

probabilidade de mutação (p_m) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			nó(s) promissor(es) (6)	ΣQ_V (7)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (5)		
0%	0,000226	0,000196	5,0	4,33	59,2	2, 3, 5 e 7	7,32
0,05%	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9	2 e 3	6,51
1,0%	0,000226	0,000215	5,0	4,75	73,4	2, 3 e 7	6,47
5%	0,000226	0,000211	5,0	4,66	82,2	3, 4 e 7	5,7

TABELA 24 – Estimativa de vazamento no nó3 - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa final

probabilidade de mutação (p_m) (1)	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%) (7)	nó(s) promissor(es) (8)	ΣQ_V (9)
	Real (2)	Estimado (3)	Real (4)	Estimado (5)	IAV (%) (6)			
0%	0,000226	0,000221	5,0	4,88	89,5	97,6	3	5,18
0,05%	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8	3	5,04
1,0%	0,000226	0,000224	5,0	4,95	96,0	98,9	3	5,15
5%	0,000226	0,000223	5,0	4,93	94,7	98,5	3	5,20

Comentários

A tabela 23, de maneira equivalente à tabela 21, proporciona a visualização dos valores da estimativa preliminar de vazamento para as probabilidades de mutação (p_m) de 0%, 0,05% ,1% e 5% (caso 2), com as condições iniciais do regime permanente conhecidas previamente. Nesta tabela, verifica-se que, para a probabilidade (p_m) de 0%, apresentou a maior quantidade de nós promissores (2, 3, 5, e 7). A menor quantidade de nós promissores foi verificada com a probabilidade (p_m) de 0,05% (2 e 3). Em todas as probabilidades (p_m), o nó 3 surgiu como o nó mais promissor.

A tabela 24 distingue-se da tabela 23 pela inclusão da coluna 7, com os índices de acerto (IA) para as diferentes probabilidades de mutação (p_m) e valores correspondentes a

estimação final do método. Por esta tabela, pode-se constatar que o único nó promissor restante foi o nó 3 e os índices de acertos (IA) foram próximos de 100%, comprovando a eficiência do método para identificar vazamento com probabilidades diferentes de mutação (p_m) aplicados ao AG (caso2).

Na análise do desempenho do método tendo as condições iniciais do regime permanente previamente conhecidas, com base nos resultados obtidos, é lícito assegurar que o seu desempenho em ordem decrescente foi para as probabilidades de mutação (p_m) de 0,05%, 1%, 5% e 0%.

4.5.4 Influência do local e a quantidade de vazamentos no processo de calibração (situação 4)

A situação 4 analisou os resultados encontrados pelo método MTI-AG para a variação do local e quantidade de vazamentos presentes na rede exemplo em três casos diferentes e verificou a influência desta variação na comparação dos resultados obtidos em cada caso, com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas e conhecidas. Os casos da situação 4 são:

caso 1 - vazamento no nó 3 com $A_v = 0,000226 \text{ m}^2$;

caso 2 - vazamento no nó 5 com $A_v = 0,000187 \text{ m}^2$ e

caso 3 - vazamentos simultâneos no nó 3 com $A_v = 0,000229 \text{ m}^2$ e vazamento no nó 5 com $A_v = 0,000184 \text{ m}^2$ respectivamente.

O problema inverso pode ser posto da seguinte forma:

- a carga no nó 1 é constante e conhecida igual a 450,00 m;
- as demandas nos nós são conhecidas (tabela 2);
- os diâmetros e as rugosidades dos tubos são conhecidos;
- as cargas hidráulicas no nó 8 são conhecidas (nó monitorado) para os três casos, e o tempo de análise do transiente é $t_s=10s$;
- a manobra de válvula é suave ($t_f=30s$) e
- os locais e áreas de vazamentos são desconhecidos.

As cargas hidráulicas transientes “observadas” para o nó 8 para os diferentes locais de vazamentos e com dois vazamentos simultâneos são mostradas conforme está na figura 28.

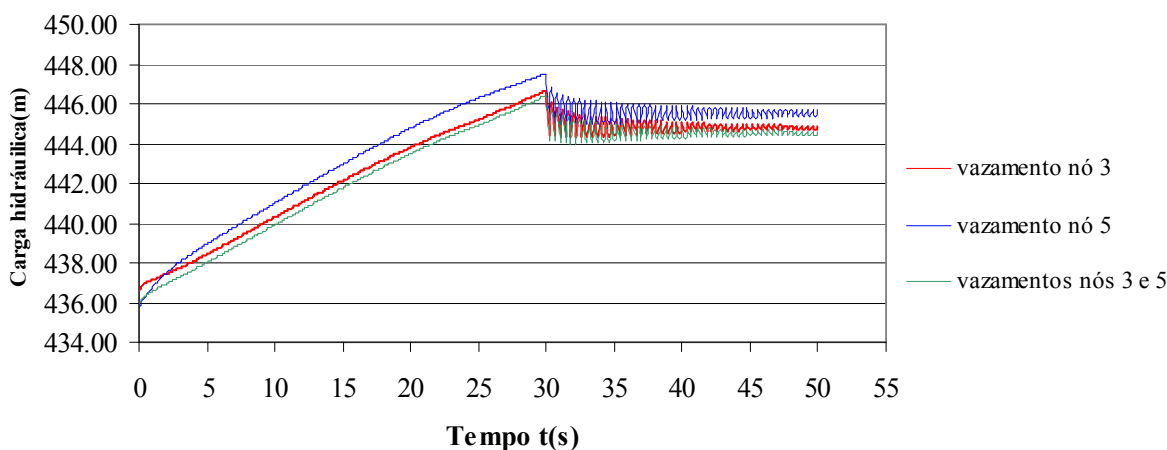


FIGURA 28 – Cargas hidráulicas transientes observadas no nó 8 para um vazamento no nó 3, um vazamento no nó 5 e dois vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5

Resultados dos casos 1, 2 e 3 com as condições iniciais desconhecidas

TABELA 25 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar (vazamento no nó 3)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000015	0,0	0,36	4,9
3	0,000226	0,000207	5,0	4,57	61,4
4	0,000000	0,000030	0,0	0,83	11,2
5	0,000000	0,000026	0,0	0,71	9,6
6	0,000000	0,000004	0,0	0,09	1,2
7	0,000000	0,000046	0,0	0,88	11,8
ΣQ_V	-	-	5,0	7,45	100,0

TABELA 26 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar (vazamento no nó 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000013	0,0	0,31	6,9
3	0,000000	0,000006	0,0	0,13	3,0
4	0,000000	0,000015	0,0	0,41	9,1
5	0,000187	0,000133	5,0	3,56	79,7
6	0,000000	0,000001	0,0	0,02	0,5
7	0,000000	0,000002	0,0	0,04	0,8
ΣQ_V	-	-	5,0	4,47	100,0

TABELA 27 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa preliminar (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000007	0,0	0,17	1,6
3	0,000229	0,000215	5,0	4,69	43,7
4	0,000000	0,000099	0,0	2,72	25,4
5	0,000184	0,000089	5,0	2,42	22,6
6	0,000000	0,000022	0,0	0,48	4,5
7	0,000000	0,000013	0,0	0,24	2,3
ΣQ_V	-	-	10,0	10,73	100,0

TABELA 28 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (vazamento no nó 3)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	97,3	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,7	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,13	100,0	-

TABELA 29 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final (vazamento no nó 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000004	0,0	0,10	1,9	-
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000187	0,000187	5,0	5,00	98,1	99,9
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,10	100,0	-

TABELA 30 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas - estimativa final (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000229	0,000230	5,0	5,02	52,8	99,6
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000184	0,000165	5,0	4,49	47,2	89,7
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	10,0	9,51	100,0	-

Comentários

As tabelas 25, 26 e 27 apresentam as estimativas preliminares de vazamento, respectivamente, para o caso 1 (vazamento no nó 3), caso 2 (vazamento no nó 5) e caso 3 (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5), com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente.

A tabela 25 corresponde aos valores obtidos na estimação preliminar do caso 1 e, neste passo inicial, os nós 3, 4, 5 e 7 apareceram como nós promissores. Na tabela 26, para o caso 2, os nós promissores foram 2, 4 e 5 e na tabela 27 para o caso 3, os nós promissores foram 3, 4 e 5. Os nós mais promissores nesta estimativa preliminar foi o nó 3 para o caso 1 (tabela 25), o nó 5 para o caso 2 (tabela 26) e para o caso 3 nada pode-se afirmar (tabela 27).

As tabelas 28, 29 e 30 divulgam os valores obtidos na estimação final para os casos 1 (vazamento nó 3), 2 (vazamento no nó 5) e 3 (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5), respectivamente, com as condições iniciais do regime permanente antecipadamente desconhecidas.

A tabela 28 (caso 1) neste passo final, aponta o nó 3 como o único promissor. Na tabela 29 (caso 2), nesta etapa final, o nó 5 surge como o único promissor e, na tabela 30 (caso 3), despontam os nós 3 e 5 como os nós promissores restantes. Em todos os três casos, nesta estimativa final, os índices de acertos (IA) foram elevados, comprovando a eficiência do método quando se pretende identificar vazamentos em nós diferentes ou concomitantemente em mais de um nó em uma rede hidráulica.

O desempenho do método foi semelhante na busca da identificação do vazamento real para o nó 3 (caso 1), no nó 5 (caso 2) e um pouco inferior nos vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5 (caso 3).

Resultados dos casos 1, 2 e 3 com as condições iniciais conhecidas

TABELA 31 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar (vazamento no nó 3)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000049	0,0	1,18	18,2
3	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9
4	0,000000	0,000007	0,0	0,19	3,0
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,1
6	0,000000	0,000006	0,0	0,13	2,1
7	0,000000	0,000006	0,0	0,11	1,8
ΣQ_V	-	-	5,0	6,51	100,0

TABELA 32 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar (vazamento no nó 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000140	0,0	3,34	51,5
3	0,000000	0,000011	0,0	0,24	3,8
4	0,000000	0,000019	0,0	0,52	8,0
5	0,000187	0,000077	5,0	2,06	31,8
6	0,000000	0,000003	0,0	0,06	1,0
7	0,000000	0,000014	0,0	0,25	3,9
ΣQ_V	-	-	5,0	6,47	100,0

TABELA 33 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais conhecidas - estimativa preliminar (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000010	0,0	0,24	2,3
3	0,000229	0,000204	5,0	4,45	41,9
4	0,000000	0,000023	0,0	0,63	6,0
5	0,000184	0,000175	5,0	4,76	44,7
6	0,000000	0,000020	0,0	0,44	4,1
7	0,000000	0,000006	0,0	0,11	1,1
ΣQ_V	-	-	10,0	10,64	100,0

TABELA 34 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (vazamento no nó 3)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000002	0,0	0,05	1,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,04	100,0	-

TABELA 35 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (vazamento no nó 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000002	0,0	0,05	1,0	-
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000187	0,000185	5,0	4,95	99,0	99,0
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,00	100,0	-

TABELA 36 – Estimativas de vazamento – caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000229	0,000225	5,0	4,91	46,8	98,2
4	0,000000	0,000036	0,0	0,99	9,4	-
5	0,000184	0,000169	5,0	4,60	43,8	91,9
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	10,0	10,50	100,0	-

Comentários

As tabelas 31, 32 e 33 correspondem aos valores da estimativa preliminar de vazamento, respectivamente, para os casos 1 (vazamento no nó 3), 2 (vazamento no nó 5) e 3

(vazamentos simultâneos nos nós 3 e 5), com as condições iniciais do regime permanente previamente conhecidas.

A tabela 31 (caso 1), nesta etapa inicial, apresenta os nós 2 e 3 como promissores e, na tabela 32 (caso 2), desponta os nós 2, 4, e 5 como promissores restantes e, na tabela 33, surgem como promissores somente os nós 3, 4 e 5. O nó mais promissor nesta estimativa preliminar é o nó 3 para o caso 1 (tabela 31) e, nó 2 para o caso 2 (tabela 32). Quanto ao caso 3 (tabela 33), nada pode-se afirmar em relação ao nó mais promissor.

As tabelas 34, 35 e 36 apresentam a estimativa final de vazamento, respectivamente, para o caso 1, caso 2 e o caso 3, com as condições iniciais do regime permanente antecipadamente conhecidas. A tabela 34 (caso 1) apresenta como único nó promissor o nó 3, na tabela 35 (caso 2), o nó promissor é o nó 5 e, na tabela 36 (caso 3), os nós 3 e 5 são os promissores, constituindo estes nós encontrados iguais aos nós de vazamentos reais. Em todos os casos, os índices de acerto (IA) foram elevados, comprovando a eficiência do método em identificar vazamentos em nós diferentes ou simultaneamente em mais de um nó em uma rede hidráulica.

A conduta do modelo na busca da identificação do vazamento real nos três casos apresentou-se semelhante. É válido acentuar, com base nos resultados obtidos, que o modelo é pouco sensível à variação dos locais de vazamento, porém é um pouco inferior na identificação de dois vazamentos simultâneos.

4.5.5 Influência do local e quantidade de nós monitorados (situação 5)

A situação 5 analisará os resultados encontrados pelo método MTI-AG para identificar o vazamento no nó 3 ($A_v = 0,000226 \text{ m}^2$) com a variação do local e quantidade de nós monitorados na rede exemplo, em três diferentes casos, verificar a influência desta variação e comparar os resultados obtidos para as condições permanentes iniciais desconhecidas previamente e para aquelas com o conhecimento prévio. Os casos da situação 5 são:

caso 1- nó monitorado: nó2;

caso 2- nó monitorado: nó 8 e

caso 3- nós monitorados: nós 2 e 8.

O problema inverso pode ser posto da seguinte forma:

- a carga no nó 1 é constante e conhecida igual a 450,00 m;
- as demandas nos nós são conhecidas (tabela 2);
- os diâmetros e as rugosidades dos tubos são conhecidos;
- as cargas hidráulicas no nó 2 (caso 1), no nó 8 (caso 2) ou nos nós 2 e 8, simultaneamente (caso 3), são conhecidas e o tempo de análise do transiente é $t_s=10s$;
- a manobra de válvula é suave ($t_f=30s$) e
- os locais e áreas de vazamentos são desconhecidos.

As cargas hidráulicas transientes “observadas” para o nó 2 e para o nó 8 usadas na situação 5 são mostradas conforme na figura 29

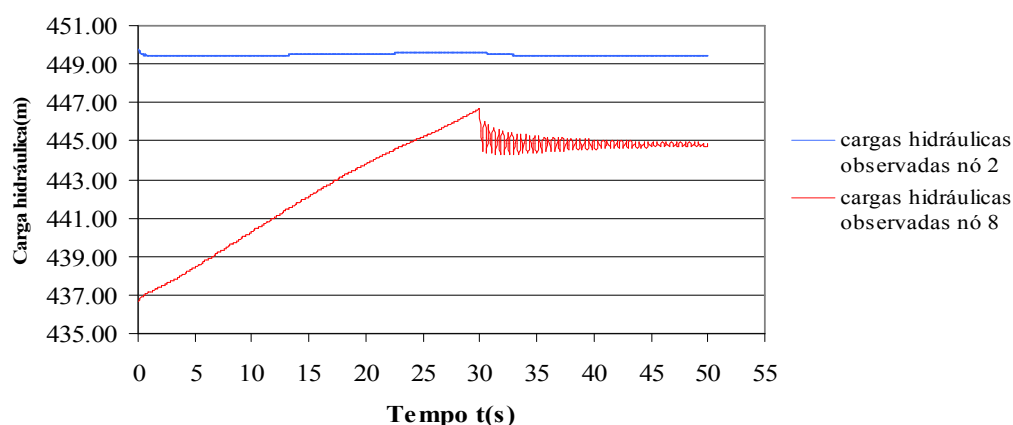


FIGURA 29 – Cargas hidráulicas transientes observadas no nó 2 e no nó 8 para um vazamento no nó 3

Resultados dos casos 1, 2, e 3 com as condições iniciais desconhecidas

TABELA 37 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 2)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000001	0,0	0,02	0,4
3	0,000226	0,000238	5,0	5,26	91,1
4	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,4
5	0,000000	0,000004	0,0	0,11	1,9
6	0,000000	0,000003	0,0	0,07	1,2
7	0,000000	0,000009	0,0	0,17	3,0
ΣQ_V	-	-	5,0	5,77	100,0

TABELA 38 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000015	0,0	0,36	4,9
3	0,000226	0,000207	0,0	4,57	61,4
4	0,000000	0,000030	0,0	0,83	11,2
5	0,000000	0,000026	5,0	0,71	9,6
6	0,000000	0,000004	0,0	0,09	1,2
7	0,000000	0,000046	0,0	0,88	11,8
ΣQ_V	-	-	5,0	7,45	100,0

TABELA 39 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa preliminar (nós monitorados: nós 2 e 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000049	0,0	1,18	18,0
3	0,000226	0,000221	5,0	4,88	74,1
4	0,000000	0,000007	0,0	0,19	2,9
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,1
6	0,000000	0,000006	0,0	0,13	2,0
7	0,000000	0,000003	0,0	0,06	0,9
ΣQ_V	-	-	5,0	6,59	100,0

TABELA 40 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 2)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000226	0,000190	5,0	4,20	95,0	83,9
4	0,000000	0,000008	0,0	0,22	5,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	4,42	100,0	-

TABELA 41 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	97,3	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,7	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,13	100,0	-

TABELA 42 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais desconhecidas – estimativa final (nós monitorados: nós 2 e 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000004	0,0	0,10	1,9	-
3	0,000226	0,000227	5,0	5,01	98,1	99,7
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,11	100,0	-

Comentários

As tabelas 37, 38 e 39 apresentam a estimativa preliminar de vazamento, respectivamente, para monitoramento das cargas hidráulicas no nó 2 (caso 1), no nó 8 (caso 2), monitoramentos simultâneos nos nós 2 e 8 (caso 3) e com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente.

A tabela 37, nesta estimativa preliminar, apresenta como promissor o nó 3, na tabela 38, pode-se afirmar que os nós 3, 4, 5 e 7 foram os promissores e, na tabela 39, os nós promissores restantes foram 2 e 3. Em todas os casos, desponta como mais promissor o nó 3.

As tabelas 40, 41 e 42 apresentam a estimativa final de vazamento, respectivamente, com o monitoramento das cargas hidráulicas no nó 2 (caso 1), no nó 8 (caso

2) e monitoramentos simultâneos nos nós 2 e 8 (caso 3), com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas previamente.

A tabela 40, nesta etapa final, permaneceu igual à preliminar, pois o único nó promissor restante que despontou foi o nó 3. Na tabela 41, assim como na tabela 42 é fácil visualizar que o único nó restante promissor foi o nó 3. Os índices de acerto (IA) para todos os casos, nesta estimativa final, foram elevados, confirmando a eficiência do método em identificar o vazamento com diferentes nós monitorados e sua quantidade em redes hidráulicas.

O desempenho do método com base nos resultados obtidos foi melhor para os nós 2 e 8 monitorados (caso 3), seguidos do monitoramento no nó 8 (caso 2) e, por fim o monitoramento no nó 2 (caso 1).

Resultados dos casos 1, 2, e 3 com as condições iniciais conhecidas

TABELA 43 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 2)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000001	0,0	0,02	0,5
3	0,000226	0,000115	5,0	2,54	53,4
4	0,000000	0,000009	0,0	0,25	5,2
5	0,000000	0,000004	0,0	0,11	2,3
6	0,000000	0,000065	0,0	1,45	30,4
7	0,000000	0,000020	0,0	0,38	8,0
ΣQ_V	-	-	5,0	4,75	100,0

TABELA 44 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (nó monitorado: nó 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000049	0,0	1,18	18,2
3	0,000226	0,000215	5,0	4,75	72,9
4	0,000000	0,000007	0,0	0,19	3,0
5	0,000000	0,000005	0,0	0,14	2,1
6	0,000000	0,000006	0,0	0,13	2,1
7	0,000000	0,000006	0,0	0,11	1,8
ΣQ_V	-	-	5,0	6,51	100,0

TABELA 45 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa preliminar (nós monitorados: nós 2 e 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)
2	0,000000	0,000024	0,0	0,58	9,7
3	0,000226	0,000182	5,0	4,02	67,4
4	0,000000	0,000002	0,0	0,06	0,9
5	0,000000	0,000003	0,0	0,08	1,4
6	0,000000	0,000025	0,0	0,56	9,3
7	0,000000	0,000035	0,0	0,67	11,2
ΣQ_V	-	-	5,0	5,96	100,0

TABELA 46 – Estimativas de vazamento - caso 1 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 2)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
3	0,000226	0,000212	5,0	4,68	95,5	93,6
4	0,000000	0,000003	0,0	0,08	1,7	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000002	0,0	0,04	0,9	-
7	0,000000	0,000005	0,0	0,10	1,9	-
ΣQ_V	-	-	5,0	4,91	100,0	-

TABELA 47 – Estimativas de vazamento - caso 2 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (nó monitorado: nó 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000002	0,0	0,05	1,0	-
3	0,000226	0,000226	5,0	4,99	99,0	99,8
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,04	100,0	-

TABELA 48 – Estimativas de vazamento - caso 3 - com as condições iniciais conhecidas – estimativa final (nós monitorados: nó 2 e 8)

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IAV (%)	
2	0,000000	0,000007	0,0	0,17	3,3	-
3	0,000226	0,000220	5,0	4,86	93,4	97,2
4	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000000	0,000006	0,0	0,13	2,6	-
7	0,000000	0,000002	0,0	0,04	0,7	-
ΣQ_V	-	-	5,0	5,20	100,0	-

Comentários

As tabelas 43, 44 e 45 expõem os resultados da estimativa preliminar de vazamento para o monitoramento das cargas hidráulicas no nó 2 (caso 1), no nó 8 (caso 2) e monitoramentos simultâneos nos nós 2 e 8 (caso 3), com as condições iniciais do regime permanente com o conhecimento prévio.

A tabela 43, nesta estimativa preliminar, expõe os nós 3, 4, 6 e 7 como promissores; na tabela 44, mostra como promissores os nós 2 e 3; e na tabela 45, são promissores os nós 2, 3, 6 e 7. Nos três casos, surge como o mais promissor o nó 3.

As tabelas 46, 47 e 48 divulgam os resultados da estimação final de vazamento para o monitoramento das cargas hidráulicas no nó 2 (caso 1), no nó 8 (caso 2) e monitoramentos simultâneos nos nós 2 e 8 (caso 3), com as condições iniciais do regime permanente com conhecimento prévio.

As tabelas 46, 47 e 48 apresentam como único nó promissor restante o nó 3, nó de vazamento real. Os índices de acerto (IA) foram elevados, confirmando a eficiência do método na identificação do vazamento para os três casos, com as condições iniciais do regime permanente conhecidas antecipadamente.

O desempenho do método na identificação do vazamento com as condições iniciais do regime permanente conhecidas antecipadamente foi melhor no caso 2 (nó monitorado nó 8), seguido do caso 3 (nós monitorados 2 e 8) e, por último, no caso 1 (nó monitorado nó 2).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo realizou a calibração de uma rede de distribuição de água a partir de dados de cargas transientes observados. Por meio de um procedimento na resolução do problema inverso aplicado em uma rede hidráulica, a solução adotou uma abordagem indireta, que compara dados de cargas transientes disponíveis com os calculados pelo método matemático, o Método das Características. O Método Transiente Inverso (MTI) associado a um algoritmo genético (AG), utiliza o Método das Características (MOC) na solução das equações do movimento e da continuidade em regimes transientes de uma rede hidráulica.

A identificação de vazamento em uma rede exemplo foi investigada e aplicada pelo método em cinco diferentes situações, a saber: a) influência do efeito da severidade do transiente provocada por mudanças no tipo de manobra de válvula; b) influência da variação do tamanho do registro transiente na calibração; c) influência da variação dos parâmetros do AG; d) influência do local e quantidade de vazamentos no processo de calibração e e) influência da quantidade de nós monitorados. Os resultados foram obtidos e analisados a cada situação, tendo as condições iniciais do regime permanente previamente conhecidas ou calculadas para cada solução simulada, sendo esta última forma considerada desconhecida. Nas duas formas, conhecidas e desconhecidas as condições iniciais de regime permanente foram calculadas por um programa computacional estabelecido na metodologia.

A rede exemplo consiste de um sistema de abastecimento de água, apresentada no estudo de Liggett e Chen (1994), com uma válvula de controle, usada para demonstração da eficácia do método MTI-AG. Embora uma rede simples tenha sido considerada neste trabalho, para formulação detalhada de um algoritmo utilizado como ferramenta de busca na solução do problema inverso, o método pode ser também utilizado na identificação e quantificação de vazamentos em redes mais complexas.

Na análise da influência da severidade do transiente, o método apresentou desempenho melhor, com a manobra suave em relação à brusca, com as condições iniciais do regime permanente desconhecidas, entretanto, para as condições iniciais conhecidas, o desempenho foi equivalente para ambas as manobras.

Na análise da influência do tamanho do registro transiente com as condições iniciais desconhecidas, o método teve um desempenho equivalente até o tempo de 30s (tempo de fechamento da válvula) e permaneceu igual, porém com desempenho pior para os tempos 40s e 50s. Com as condições iniciais conhecidas, o método foi insensível a esta variação, permanecendo com o mesmo desempenho.

A análise da influência da variação dos parâmetros do AG foi realizada para dois casos. Para o caso 1 variou a probabilidade de cruzamento (p_c) para valores de 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100%. Com as condições iniciais desconhecidas, o método obteve melhores desempenhos com as probabilidades maiores de 80%, 90% e 100%, contudo, com as condições iniciais conhecidas, os melhores desempenhos foram com as probabilidades de 100% e 50%. No caso 2, variou-se a probabilidade de mutação (p_m) para valores de 0%, 0,05%, 1% e 5%. O desempenho do método foi semelhante para as condições iniciais desconhecidas e conhecidas, sendo o melhor desempenho com probabilidade de mutação (p_m) de 0,05% e o pior com o valor de 0%.

Na análise da influência da variação dos locais de vazamento, assim como da quantidade de vazamentos, o modelo apresentou desempenhos semelhantes com as condições iniciais conhecidas e desconhecidas. Pode-se concluir, com base nos resultados, que, tanto nas condições iniciais desconhecidas como nas conhecidas, o método foi pouco sensível à variação do local de vazamento, porém apresentou desempenho inferior na busca por dois vazamentos simultâneos.

Na análise da influência da variação do local e quantidade de nós monitorados, o método foi aplicado a três casos. O caso 1 referia-se à identificação com o monitoramento no nó 2, o caso 2 à identificação com o monitoramento no nó 8 e o caso 3 à identificação de vazamento com os nós 2 e 8, monitorados simultaneamente. O desempenho do método foi pior tanto com as condições iniciais conhecidas e desconhecidas para o caso 1, ou seja, quando o nó monitorado foi o nó 2, coincidentemente um dos nós mais distantes da válvula.

O método na busca da identificação de vazamento com as condições iniciais desconhecidas precisou de um tempo computacional na ordem de dez a onze vezes maiores do que o gasto na busca com as condições iniciais com o conhecimento prévio. O desconhecimento prévio das condições iniciais do regime permanente, de uma maneira geral,

aparece na maioria dos problemas inversos de situações reais que tenham o objetivo a identificação de vazamento em redes de abastecimento de água.

A utilização do algoritmo genético é uma ferramenta eficaz empregada em muitos estudos para calibrar redes hidráulicas na busca das soluções ótimas de problemas inversos. A aplicação do AG neste estudo foi compensadora e motivadora, pois as soluções encontradas para a identificação de vazamento em uma rede exemplo apresentaram valores muito aproximados dos sugeridos. Como anteriormente exposto, os AG's apresentam vantagens e desvantagens. Entre as vantagens, ressalta-se a não-exigência de conhecimentos matemáticos muito complexos para a sua aplicação. O método é bastante flexível, permitindo a aplicação de seus operadores em diferentes formas, como seleção (randômica, determinística, mista), com ou sem elitismo, codificação (real, binária), cruzamento (n pontos, uniforme, aritmético) e mutação (simples, uniforme), assim como uso de tipos diferente de função objetivo, permitindo a sua aplicação na melhor forma ao problema estudado. Uma das desvantagens consiste na velocidade de convergência para encontrar a solução ótima, se comparado a outros métodos de otimização convencionais.

O AG utilizado neste estudo mostrou-se adequado ao problema proposto, produzindo resultados satisfatórios para identificação do vazamento em uma rede exemplo.

Conclusão geral

A metodologia baseada no Método Transiente Inverso (MTI), associado ao algoritmo genético (AG), mostrou-se como um procedimento promissor na identificação e quantificação de vazamentos em redes de distribuição de água.

Este estudo revelou-se como o passo inicial na busca de técnicas investigativas de vazamento, que possam ser utilizados por empresas e concessionárias de distribuição de água para o controle de suas perdas em razão deste indesejável fator.

Constituiu um estudo que pode ser utilizado para trabalhos futuros, que busquem o aperfeiçoamento de métodos que empreguem a análise transiente inversa com o uso de um AG, para a identificação de vazamentos em redes de distribuição de água.

Proposições

Este ensaio identificou vazamento mediante o método MTI-AG aplicado a uma rede exemplo de abastecimento de água. O estudo constitui uma contribuição ao aperfeiçoamento de várias técnicas de identificação. Muitas circunstâncias devem ser ainda investigadas, como:

- aplicar o método em uma rede real de abastecimento;
- identificar vazamentos com transientes provocados por outros efeitos, como parada e partida de bombas, variação temporal da demanda;
- identificar vazamentos de áreas com formas variadas em tubulações inseridas em diferentes meios como solo, ao ar livre e outros e
- aplicar o algoritmo genético, juntamente com outras técnicas de otimização convencional ou com o uso de variadas funções objetivas, no intuito de aumentar a velocidade de convergência ou melhorar os resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, John K. **Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento permanente**. 2003. 166 p. Dissertação (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BÄCK, Thomas. **Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms**. New York: Oxford University Press, 1996. 78p.

BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial ferramentas e teorias**. Florianópolis: Ed. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. v.1, p.362.

BRANDÃO JÚNIOR, Mozart. Tecnologia de automação para centro de controle operacional como resultado de gestão de projeto integrado de controle e redução de perdas. *In*: SEMINÁRIO HÍSPANO – BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA (SEREA), 4., 2004, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2004.

BRUNONE, B.; FERRANTE, M. Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients. **Journal of Hydraulic Research**, v. 39, n. 4, p. 1-9, 2001.

CHAUDHRY, M. H. **Applied hydraulic transients**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. 521p.

LIGGETT, James A.; CHEN, Li-Chung. Inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.120, n. 8, p. 934-955, 1994.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CNUMAD), 1., 1992, Rio de Janeiro. **Conservação e Gestão dos Recursos para o Desenvolvimento, seção II, Cap. 18 da Agenda 21**: documento final elaborado na conferência. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <<http://www.bdt.fat.org.br/publicacoes/politica/agenda21/>>. Acesso em: 10 maio 2005.

COVAS, Dídia I. C.; ALMEIDA, A. Betânio; RAMOS, Helena, M. Leak location in pipe systems using pressure surges. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRESSURE SURGES, 8th, 2000, Hagur. **Proceedings of...** Hagur: BHR group, 2000. p. 169-179.

COVAS, Dídia I. C.; RAMOS, Helena M. Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER PIPELINE SYSTEMS, 4th, 2001, United Kingdom. **Proceedings of...** United Kingdom: BHR group, 2001. p. 227-238.

DEJONG, K. **The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems**. 1975. Thesis (PhD) - University of Michigan, Michigan, 1975.

GALVÃO, C. O. *et al.* **Sistemas inteligentes – aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 1999. 246p.

GAMBALE, Sergio R. **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. 266 p.

GEN, M.; CHENG, R. **Genetic algorithms and engineering design**. New York: John Wiley & Sons, 1997. 411 p.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Addison-Wesley: Reading, 1989. 412 p.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial system**. Boston: MIT Press, 1975.

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. **Inverse transient analysis in pipe networks for leakage detection and roughness calibration**: proceedings water network modelling for optimal design and management, United Kingdom: Exeter, 2000. v.1, p.143-159,

KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Optimal sampling design methodologies for water distribution model calibration. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.131, n.3, p.190-200, 2005.

KARNEY, B. W.; MCINNIS, D. Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.118, n. 7, p. 1014-1029, 1992.

KARNEY, B. W.; MCINNIS, D. Transient analysis of water distribution systems. **Journal of the American Water Works Association**, v. 82, n. 7, p. 62-70, 1990.

MANZANO, José; AUGUSTO, N.G. **Estudo Dirigido de FORTRAN**. São Paulo: Érica, 2003. 173 p.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1994.

MOTA, Suetônio. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental - ABES, 2000. cap.5, p.143-147, 416p.

MPESHA, Whitnes; CHAUDHRY, M. H.; GASSMAN, Sarah L. Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation. **Journal of Hydraulic Research**, v.40, n.1, p. 55-62, 2002.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **The Computer Journal** , v.7, p.308-313, 1965.

NEUMAN, S. Calibration of distributed parameter groundwater flow models viewed as a multiple-objective decision process under uncertainty. **Water Resources Research**, v.9, n.4, p.1006-1021, 1973.

PIZZO, Henrique da S.; LUZIVOTTO JÚNIOR, Edevar. **Metodologia para seleção de pontos de monitoramento de pressão na calibração de redes hidráulicas**. In: SEMINÁRIO HÍSPANO – BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA (SEREA), 4., 2004, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2004.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 2. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (EESC- USP), 1999. 540 p.

POSTEL, Sandra. **Last oasis: Facing Water Starcity**. 2. ed. W.W. New York: Norton & Company, 1992. cap. 1, p. 17- 20.

PUDAR, Ranko S.; LIGGETT, James A. Leaks in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.118, n. 7, p.1031-1046, 1992.

REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of Water Resources planning and Management**, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.

RIGHETTO, A. M. **Cálculo hidráulico de rede de distribuição de água a partir de condições transitórias: adequação e estudo de casos**. 1994. Tese (Livre Docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

ROSSIGNEUX, Nanci V. Q.; FERNANDES, Cristovão V. S. Estabelecendo a importância relativa do controle de perdas em redes de distribuição de água - o exemplo de uma rede hipotética. In: SEMINÁRIO HÍSPANO – BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA (SEREA), 4., 2004, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2004.

SIBETHEROS, I. A.; HOLLEY, E. R.; BRANSKI, J. M. Spline interpolations for water hammer analysis. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.117, n. 10, p.1332-1351, 1991.

SILVA, Fernando G. B.; REIS, Luisa F. R. Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética. In: Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SILUBESA), 6. 2002, Vitória (ES). **Anais...** Vitória (ES): ABES, 2002.

SILVA, Ricardo T.; CONEJO, João Gilberto L.; DE MIRANDA, Ernani C.; ALVES, Rodrigo Flecha F. **Indicadores de Perdas nos Sistemas de Abastecimento de Água, Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água (Pncda), Documentos Técnicos de Apoio A2 (DTA - A2)**. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 1998. Disponível em: <<http://www.pncda.gov.br/Download/dta-c2.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2005.

SIMPSON, Angus R.; DANDY, Graeme C.; MURPHY, Laurence J. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. **Journal of Water Resources planning and Management**, v.120, n.4, p.423-443, 1994.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES DE SANEAMENTO – SNIS. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. 2002. Brasília: Ministério das Cidades, 2004. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diag_2002.htm>. Acesso em: 10 abr. 2005. 420 p.

SOARES, Alexandre K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. 2003, 153p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SOLANO, Francisco J. M.; REY, Pedro L. I.; PATIÑO, Gonzalo L.; MIGUEL, Vicente S. F. Reducción de errores durante la automatización del proceso de simplificación de modelos para redes hidráulicas a presión. *In*: SEMINÁRIO HÍSPANO – BRASILEIRO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO URBANO DE ÁGUA, 4., 2004, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SEREA, 2004.

STEPHENS, Mark L.; VÍTKOVSKÝ, John P.; LAMBERT, Martin F.; SIMPSON, Angus R.; KARNEY, Bryan W.; NIXON, John B. Transient analysis to assess valve status and topology in pipe networks. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRESSURE SURGES, 9., 2004, Chester. **Congressional records**. Chester: BHR Group Limited, 2004. p.1-14.

SWAMEE, P. K. Design of a submarine pipeline. **J. Transp. Eng.**, v.119, n.1, p.159-170, 1993.

SWISS CENTRE FOR DEVELOPMENT COOPERATION IN TECHNOLOGY AND MANAGEMENT (SKAT). **Review of modelling software for piped distribution networks**. St. Galen: SKAT Foundation, 2002. Disponível em: <http://www.skat-foundation.org/publications/pdf/wss_2002.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2005.

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.

VÍTKOVSKÝ, John P.; LIGGETT, James A.; SIMPSON, Angus R.; LAMBERT, Martin F. Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.129, n.6, p.480-492, 2003.

VÍTKOVSKÝ, John P.; SIMPSON, Angus R.; LAMBERT, Martin F. **Transients for calibration of pipe roughnesses using genetic algorithms**. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRESSURE SURGES, 8., 2000, Hague. **Proceedings of...** Hague: BHR Groups, 2000a. p. 587-597.

VÍTKOVSKÝ, John P.; SIMPSON, Angus R.; LAMBERT, Martin F. Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.126, n.4, p.262-265, 2000b.

WYLIE, Evan B.; STREETER, Victor L. **Fluid transients**. New York: McGraw-Hill, 1978, 384 p.