

**CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ÁGUA PELO MÉTODO INVERSO APLICADO A
ESCOAMENTO TRANSIENTE**

John Kenedy de Araújo

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Hidráulica
e Saneamento.

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 04.10.1.03

ASS:.....
John Kenedy de Araújo

DEDALUS - Acervo - EESC



31100043047

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry

São Carlos
2003



Class.	TESE
Cult.	0383
Tombo	T122/03
Sysno	1313829

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A663c Araújo, John Kenedy de
 Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente / John Kenedy de Araújo. -- São Carlos, 2003.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
 Área: Hidráulica e Saneamento.
 Orientador: Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry.

1. Calibração. 2. Transientes em redes. 3. Método inverso. 4. Algoritmo genético. I. Título.

122
 Data de entrada no Serviço
 EXEMPLAR RESERVADO
 Serviço de Informação EESC/USP

FOLHA DE JULGAMENTO

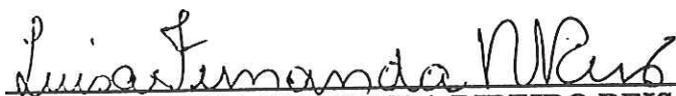
Candidato: Engenheiro JOHN KENEDY DE ARAÚJO

Tese defendida e julgada em 24/01/2003 perante a Comissão Julgadora:



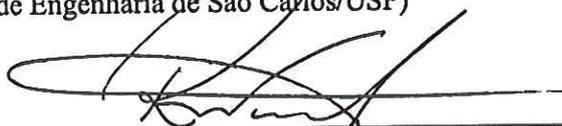
Prof. Tit. **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



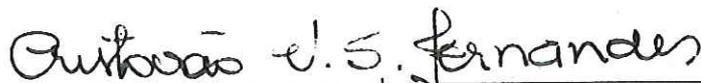
Profa. Dra. **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



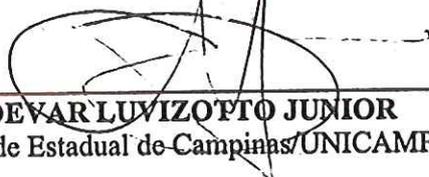
Prof. Dr. **RODRIGO DE MELO PORTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



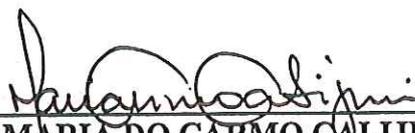
Prof. Dr. **CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES**
(Universidade Federal do Paraná/UFPR)

APROVADO



Prof. Dr. **EDEVAR LUVIZOTTO JUNIOR**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO



Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*À minha querida esposa Solange e aos meus
filhos Saulo e Samuel, meus grandes amores.*

AGRADEDIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry, orientador e amigo, pela competência, assistência e apoio incondicionais.

À Universidade Federal do Ceará pela licença concedida e pelo apoio oferecido.

À Universidade de São Paulo pela oportunidade concedida.

À CAPES – Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão de bolsa de estudos.

Aos professores Luisa Fernanda Ribeiro Reis e Rodrigo de Melo Porto pela assistência prestada em momentos oportunos.

Ao CISC – Centro de Informática de São Carlos na pessoa do funcionário Rogério Toshiaki Kondo pela ajuda e apoio prestados.

A todos os professores, funcionários e amigos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará que sempre nos incentivaram.

A todos os professores, funcionários e alunos do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos – USP pela receptividade e atenção recebida.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e incentivaram.

À minha esposa e aos meus filhos, que tanto os amo, pelo incentivo, paciência, compreensão e amor.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
RESUMO.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Resumo dos Capítulos.....	5
2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Modelos Hidráulicos em Regime Permanente.....	6
2.2 Modelos Hidráulicos em Regime Não Permanente.....	10
2.3 Modelos de Otimização em Redes Hidráulicas.....	17
2.4 Método de Busca do Algoritmo Genético.....	18
2.5 Alguns Modelos Disponíveis no Mercado.....	19
3. MODELO HIDRÁULICO.....	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Escoamento Transiente em Tubulações.....	27
3.3 Modelo da Coluna Elástica.....	29
3.3.1 Equações Fundamentais do Método das Características.....	30
3.3.2 Condições de Contorno.....	37
3.4 Considerações Finais.....	44

4.	ALGORITMO GENÉTICO.....	45
4.1	Histórico da Teoria Evolutiva.....	45
4.2	Terminologia Biológica.....	47
4.3	Estrutura dos Algoritmos Genéticos.....	48
4.3.1	Seleção.....	50
4.3.2	Representação dos Parâmetros.....	51
4.3.3	Cruzamento.....	54
4.3.4	Mutação.....	56
4.4	Definição da Função Objetivo.....	57
4.5	Algoritmos Genéticos e Otimização Convencional.....	58
5.	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA INVERSO E ESTRATÉGIAS DE RESOLUÇÃO.....	61
5.1	Definição do Problema Inverso.....	61
5.1.1	Conceitos Básicos.....	62
5.1.2	Tipos de Solução para o Problema Inverso.....	63
5.1.3	Formulação do Problema Inverso e Resolução.....	66
5.2	Estratégias de Resolução.....	67
5.2.1	Condições Iniciais.....	68
5.2.2	Manobras de Válvula.....	70
5.2.3	Estudo de Casos.....	71
5.2.4	Análise de Incertezas.....	76
5.2.5	AG Binário x AG Real.....	76
5.2.6	Medida de Eficiência da Calibração.....	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	78
6.1	Introdução.....	78
6.2	Programas Computacionais.....	79
6.3	Rede Exemplo.....	80
6.4	Parâmetros do Algoritmo Genético.....	82
6.5	Problema-tipo 1: identificação dos fatores de atrito.....	82
6.6	Problema-tipo 2: identificação das rugosidades absolutas.....	86

6.7	Problema-tipo 3: identificação dos diâmetros.....	94
6.8	Problema-tipo 4: localização e quantificação de vazamentos.....	99
6.9	Problema-tipo 5: localização e quantificação de vazamentos simultaneamente com a identificação dos fatores de atrito.....	104
6.10	Análise de Incertezas.....	110
6.11	Influência do tamanho do registro transiente.....	115
6.12	Identificação das rugosidades com AG real e binário.....	117
7	CONCLUSÕES.....	121
	ANEXO A.....	125
	ANEXO B.....	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	155

LISTA DE FIGURAS

3.1	Linhas características no plano $x-t$	32
3.2	Tubulação simples.....	32
3.3	Região de validade para uma tubulação simples.....	33
3.4	Excitação no nó de jusante.....	33
3.5	Excitação nos nós a montante e jusante.....	34
3.6	Definição da malha de discretização do método das características.....	35
3.7	Esquema de uma seção interna s de uma tubulação i	37
3.8	Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica i	38
3.9	Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica i	39
3.10	Esquema de um nó de consumo genérico M	40
3.11	Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica i	42
3.12	Exemplo de abertura e fechamento de uma válvula.....	44
4.1	Mutação simples para a codificação binária.....	57
5.1	Fluxograma do método de tentativa e erro.....	64
5.2	Fluxograma do método indireto.....	65
5.3	Fluxograma do método direto.....	66
5.4	Fluxograma do procedimento de calibração com auto-correção.....	69
5.5	Manobra suave da válvula.....	70
5.6	Manobra brusca da válvula.....	71
6.1	Organograma dos estudos realizados.....	79
6.2	Rede exemplo.....	80
6.3	Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 referente à identificação dos fatores de atrito.....	84
6.4	Fatores de atrito reais (variados) e estimados referentes às manobras suave e brusca da válvula.....	86

6.5	Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4, para as duas situações de rugosidades reais constantes e variadas, referente à identificação da rugosidade absoluta.....	88
6.6	Variação temporal do fator de atrito para os 3 casos de estudo no tubo 4 considerando rugosidades reais constantes.....	93
6.7	Variação temporal do fator de atrito para os 3 casos de estudo no tubo 5 considerando rugosidades reais constantes.....	93
6.8	Rugosidades reais (variadas) e estimadas para as duas manobras de válvula correspondente ao caso 2 (grau de conhecimento mediano do material dos tubos – ferro fundido).....	94
6.9	Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 referente às duas situações de identificação dos diâmetros (constantes e variados).....	96
6.10	Diâmetros reais e estimados para as duas manobras referentes ao caso 2...	99
6.11	Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 referente aos dois casos de identificação de vazamentos.....	101
6.12	Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 sem e com erros de medida referente à identificação de fatores de atrito.....	111
6.13	Formato da cadeia binária na representação das rugosidades.....	118
6.14	Rugosidades reais e estimadas usando AG com representações real e binária.....	120
6.15	Desempenho da função objetivo usando AG com representações real e binária.....	120
a.1	Sistema e volume de controle.....	126
a.2	Volume de controle para a equação da continuidade.....	129
a.3	Volume de controle para a equação do momento.....	134

LISTA DE TABELAS

2.1	Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente	21
4.1	Algoritmo Genético típico.....	49
5.1	Valores reais dos fatores de atrito para os dois casos de estudo.....	71
5.2	Valores reais das rugosidades absolutas dos tubos, em mm.....	73
5.3	Valores médios da rugosidade absoluta para alguns materiais.....	73
5.4	Valores reais dos diâmetros dos tubos, em mm.....	74
6.1	Características físicas dos tubos.....	81
6.2	Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação dos fatores de atrito.....	83
6.3	Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação dos fatores de atrito.....	83
6.4	Estimativas dos fatores de atrito segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra suave</u> referentes às duas situações (fatores de atrito constantes e variados).....	85
6.5	Estimativas dos fatores de atrito segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra brusca</u> referentes às duas situações (fatores de atrito constantes e variados).....	85
6.6	Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação da rugosidade.....	87
6.7	Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação da rugosidade.....	87
6.8	Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra suave</u> referentes aos três casos e <u>rugosidades reais constantes</u>	88
6.9	Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra suave</u> referentes aos três casos e <u>rugosidades reais diversas</u>	89

6.10	Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra brusca</u> referentes aos três casos e <u>rugosidades reais constantes</u>	89
6.11	Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra brusca</u> referentes aos três casos e <u>rugosidades reais diversas</u>	90
6.12	Fatores de atrito equivalentes e estimados diretamente referentes à situação de rugosidades reais constantes e grau de conhecimento mediano do material dos tubos (ferro fundido).....	91
6.13	Fatores de atrito equivalentes e estimados diretamente referentes à situação de rugosidades reais variadas e grau de conhecimento mediano do material dos tubos (ferro fundido).....	92
6.14	Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação dos diâmetros.....	95
6.15	Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação dos diâmetros.....	95
6.16	Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra suave</u> referentes aos três casos com <u>diâmetros reais constantes</u>	97
6.17	Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra suave</u> referentes aos três casos com <u>diâmetros reais variados</u> ..	97
6.18	Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra brusca</u> referentes aos três casos com <u>diâmetros reais constantes</u>	98
6.19	Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da <u>manobra brusca</u> referentes aos três casos com <u>diâmetros reais variados</u>	98
6.20	Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação de vazamentos.....	100
6.21	Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação de vazamentos.....	100
6.22	Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra suave. Estimação preliminar. (Passo 1 – nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	102
6.23	Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra suave. Estimação final. (Passo 2 – nó 2 como suspeito).....	102

6.24	Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra brusca. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	102
6.25	Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra brusca. Estimaco final. (Passo 2 – n 2 como suspeito).....	103
6.26	Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra suave. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	103
6.27	Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra suave. Estimaco final. (Passo 2 – ns 2 e 6 como suspeitos).....	104
6.28	Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra brusca. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	104
6.29	Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra brusca. Estimaco final. (Passo 2 – ns 2 e 6 como suspeitos).....	104
6.30	Vazes iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificaco simultnea de vazamentos e fatores de atrito.....	105
6.31	Cargas hidrlicas iniciais em regime permanente arbitradas nos ns referentes à identificaco simultnea de vazamentos e fatores de atrito.....	105
6.32	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra suave. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	106
6.33	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra suave. Estimaco final. (Passo 2 – ns 2 como suspeito).....	106
6.34	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra brusca. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	107
6.35	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra brusca. Estimaco final. (Passo 2 – ns 2 como suspeito).....	107
6.36	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra suave. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	108
6.37	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra suave. Estimaco final. (Passo 2 – ns 2 e 6 como suspeitos).....	109
6.38	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra brusca. Estimaco preliminar. (Passo 1 – ns 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).....	109
6.39	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra brusca. Estimaco preliminar. (Passo 2 – ns 2, 5 e 6 como suspeitos).....	109
6.40	Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra brusca. Estimaco final. (Passo3– ns 2 e 6 como suspeitos).....	110

6.41	Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes aos três casos de registros de observação.....	111
6.42	Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes aos três casos de registros de observação.....	112
6.43	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 com vários graus de imprecisão nas observações.....	112
6.44	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 5 e 7 com vários graus de imprecisão nas observações.....	113
6.45	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com vários graus de imprecisão nas observações.....	113
6.46	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 5 e 7 com imprecisão de 1% numa observação apenas.....	115
6.47	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com imprecisão de 1% numa observação apenas.....	115
6.48	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 com vários tempos de registro transiente nas observações com o uso da manobra suave.....	116
6.49	Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 com vários tempos de registro transiente nas observações com o uso da manobra brusca.....	117
6.50	Representação binária dos valores decimais das rugosidades.....	118
6.51	Estimativas das rugosidades absolutas obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 usando AG com representações real e binária....	119
b.1	Valores ótimos referentes ao exemplo 1.....	140
b.2	Valores ótimos referentes ao exemplo 2.....	140
b.3	Valores ótimos referentes ao exemplo 3.....	141
b.4	Valores ótimos referentes ao exemplo 4.....	141
b.5	Valores ótimos referentes ao exemplo 5.....	142
b.6	Valores ótimos referentes ao exemplo 6.....	144
b.7	Valores ótimos referentes ao exemplo 7.....	144
b.8	Valores ótimos referentes ao exemplo 8.....	145
b.9	Valores ótimos para comparação do tamanho da população referentes ao exemplo 9.....	146

b.10	Influência da taxa de cruzamento referente ao exemplo 9.....	147
b.11	Influência da taxa de mutação referente ao exemplo 9.....	147
b.12	Influência do tamanho da população referente ao exemplo 10.....	148
b.13	Influência da taxa de cruzamento referente ao exemplo 10.....	148
b.14	Influência da taxa de mutação referente ao exemplo 10.....	148
b.15	Comparação entre os tipos de cruzamento referente ao exemplo 11.....	149
b.16	Comparação entre os tipos de cruzamento referente ao exemplo 12.....	150
b.17	Valores ótimos referentes ao exemplo 13.....	151
b.18	Influência do tipo de mutação na representação real referente ao exemplo 14.....	151
b.19	Comparação entre as representações binária e real referente ao exemplo 15.....	152
b.20	Valores ótimos referentes ao exemplo 16 para 100 gerações.....	154
b.21	Valores ótimos referentes ao exemplo 16 para 1000 gerações.....	154
b.22	Valores ótimos referentes ao exemplo 16 para 10000 gerações.....	154

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do tubo
a	Celeridade da onda
a_j	Valor mínimo de uma variável qualquer x
A_v	Área do orifício
B	Variável auxiliar
b_j	Valor máximo de uma variável qualquer x
B_M	Variável auxiliar
C^-	Linha característica negativa
C^+	Linha característica positiva
c_1	Cromossomo filho 1
c_2	Cromossomo filho 2
C_d	Coefficiente de descarga
C_{p_i}	Variável auxiliar
C_v	Variável auxiliar
D	Diâmetro do tubo
D'	Taxa de dissipação viscosa
E	Módulo de elasticidade de Young
e	Vetor de codificação binária
e'	Espessura da parede do tubo
$E(p)$	Erro quadrático
E_{FO}	Erro na função objetivo
EMR	Erro médio relativo
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach
F	Erro quadrático
F_{obj}	Função objetivo
g	Aceleração da gravidade
H	Carga hidráulica
H_1	Carga na seção 1
$H_{i,j}$	Carga calculada para o nó i e tempo j

$H_{i,j}^m$	Carga medida para o nó i e tempo j
H_J	Carga no ponto J
H_M	Carga no ponto de nó de consumo M
H_N	Carga na seção N
H_P	Carga na seção P
H_v	Carga no nó de vazamento
IA	Índice de acerto
IAV	Índice de acerto de vazamento
J	Seção J na malha de discretização do MOC
J_x	Posição escolhida no cromossomo para o cruzamento de um ponto
k	Nível de iteração k
K	Módulo de elasticidade do fluido
$k+1$	Nível de iteração ($k + 1$)
L_1	Equação diferencial do movimento
L_2	Equação diferencial da continuidade
M	Nó de consumo ou demanda
m_j	Número de bits necessários em um cromossomo
N	Seção N
NB	Número total de bits no cromossomo
NC	População de indivíduos
NG	Número de gerações
NL	Número de locais de medida na rede
p	Pressão
P	Seção P na malha de discretização do MOC
p_1	Cromossomo pai 1
p_2	Cromossomo pai 2
p_c	Probabilidade de cruzamento
p_e	Taxa de elitismo
p_m	Probabilidade de mutação
p_o	Vetor de parâmetros iniciais
p_s	Taxa de sucessão
Q	Vazão
$Q_{EXT:M}$	Vazão de consumo no nó M
$Q_{i,s}$	Vazão na seção s da tubulação i
Q_J	Vazão na seção J

Q_M	Vazão na seção M
$Q_{O_i,N}$	Vazão através da válvula em estado permanente
Q_P	Vazão na seção P
Q_v	Vazamento
R	Constante do termo do atrito
Re	Número de Reynolds
$S(t)$	População de cromossomos
T	Energia cinética total
t	Tempo
TS	Tempo de registro transiente
U	Energia potencial
\mathbf{u}^{cal}	Vetor de dados calculados
\mathbf{u}^{obs}	Vetor de dados observados
V	Velocidade da água no tubo
\mathbf{V}	Conjunto de inteiros
W'	Taxa de trabalho externo
x_i	Seção x_i
z	Cota topográfica
z_v	Cota do nó de vazamento
ρ	Massa específica do fluido
ϕ	Índice de compressibilidade
λ	Operador do MOC
γ	Peso específico do fluido
ε	Rugosidade absoluta do tubo
δ	Limite de erro
τ	Coefficiente de abertura (ou fechamento) relativo da válvula
ν	Viscosidade cinemática
σ	Desvio padrão das medidas de carga hidráulica
ψ	Constante
β	Número aleatoriamente gerado no intervalo $[0,1]$
ν'	Razão de Poisson
Δt	Intervalo de tempo computacional
Δx	Intervalo de espaço

RESUMO

ARAÚJO, J. K. (2003). *Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente*. São Carlos, 2003. 166p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Desenvolve-se um método para estimar os parâmetros de uma rede hidráulica a partir de dados observados de cargas hidráulicas transientes. Os parâmetros físicos da rede como fatores de atrito, rugosidades absolutas, diâmetros e a identificação e quantificação de vazamentos são as grandezas desconhecidas. O problema transiente inverso é resolvido utilizando uma abordagem indireta que compara os dados disponíveis de carga hidráulica transiente observados com os calculados através de um método matemático. O Método Transiente Inverso (MTI) com um Algoritmo Genético (AG) emprega o Método das Características (MOC) na solução das equações do movimento para escoamento transiente em redes de tubos. As condições de regime permanente são desconhecidas. Para avaliar a confiabilidade do MTI-AG desenvolvido aqui, uma rede-exemplo é usada para os vários problemas de calibração propostos. O comportamento transiente é imposto por duas manobras distintas de uma válvula de controle localizada em um dos nós da rede. Analisam-se, ainda, o desempenho do método proposto mediante a variabilidade do tamanho do registro transiente e de possíveis erros de leitura nas cargas hidráulicas. Ensaios numéricos realizados mostram que o método é viável e aplicável à solução de problema inverso em redes hidráulicas, sobretudo recorrendo-se a poucos dados observados e ao desconhecimento das condições iniciais de estado permanente. Nos diversos problemas de identificação, as informações transientes obtidas da manobra mais brusca produziu estimações mais eficientes.

Palavras-chave: *calibração; transientes em redes; método inverso; algoritmo genético.*

ABSTRACT

ARAÚJO, J. K. (2003). *Calibração de redes de distribuição de água pelo método inverso aplicado a escoamento transiente*. São Carlos, 2003. 166p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A method for estimation of parameters of existing hydraulic networks on the basis of observed transients pressures. Such parameters include pipe friction factors or absolute roughness, their diameters and the leakage locations and discharges. The inverse transient problem in terms of unknown parameters is solved through an indirect calibration procedure, which compares the calculated and observed hydraulic heads. The search method for optimal parameters employs the Method of Characteristics for the solution equations of transient motions in pipes and Genetic Algorithms. The initial conditions in the state of equilibrium are supposed unknown and the observed transient behavior of the network is in response to a valve maneuver composed of partial closure and reestablishment of flow in a pipe. In order to validate the transient calibration method, an example network is used to test various proposed calibration problems. The results show that the proposed method can be used with confidence for determination of various kinds of parameters. The transient inverse method is capable of network calibration using transient data collected at few locations in response to a quick valve maneuver.

Keywords: *calibration; hydraulics transients in the network pipes; inverse method; genetic algorithm.*

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

A análise de sistemas de distribuição de água é um problema de grande interesse de pesquisadores e profissionais de engenharia. O assunto passou a ser investigado com maior precisão nos últimos trinta anos devido ao grande aumento populacional, provocando, assim, uma maior complexidade na estrutura das redes hidráulicas.

Uma rede hidráulica é formada por trechos de tubulações e composta de outros elementos hidráulicos, tais como: válvulas, bombas, reservatórios de alimentação, registros. Um nó é um ponto de encontro entre dois ou mais trechos de tubulações e pode ser considerado, também, como ponto de demanda. As redes hidráulicas costumam ser classificadas como ramificadas e malhadas.

Durante algum tempo a atenção dos pesquisadores foi para o dimensionamento das redes, desenvolvendo modelos hidráulicos para o cálculo de diâmetro e vazão. O aspecto econômico passou a desempenhar um papel relevante, pois o crescimento populacional obrigava a uma otimização do sistema.

SHAMIR e HOWARD (1977) descrevem os principais pontos a serem investigados na análise de sistemas de distribuição d'água, quais sejam: calibração; operação e controle; projeto e otimização; esqueletização de redes. A calibração pode ser interpretada como parte do processo de modelagem. Considera-se este processo como o primeiro passo no estudo de uma rede de tubos já existente. Através da determinação de parâmetros físicos e operacionais pode-se calibrar uma rede, como é o caso da estimativa dos coeficientes de resistência dos diversos tubos, com medidas de vazão e carga hidráulica. Completado o processo de calibração, deve-se partir para a possibilidade de operar e controlar o sistema estudando opções de funcionamento e carregamento da rede através de processamento computacional. Quando uma rede necessita ser ampliada, uma investigação deve ser feita sobre a localização de novos elementos a serem projetados. Se uma bomba ou outro dispositivo hidráulico está sendo projetado, então deve ser apresentada uma série de soluções alternativas. A alternativa mais viável deve ser escolhida através de simulação de operação e funcionamento da rede. Quando utiliza-se um modelo computacional de simulação, normalmente não é necessário incluir todos os tubos da rede original. Na prática, os sistemas de distribuição são

esquemáticos para a análise de forma a deixar apenas fatores mais importantes, tais como os tubos de maiores diâmetros. O objetivo do processo de esqueletização não é copiar a estrutura física do sistema real, mas garantir a reprodução da sua performance. Este processo simplifica bastante a análise, porém torna-se necessário conhecer os efeitos de sua escolha.

Existem vários métodos de resolução do sistema hidráulico correspondente às redes sob regime permanente de escoamento. A solução é obtida quando as vazões satisfazem as equações da continuidade em cada nó e as equações da energia nos diversos elementos. Os métodos estão em constante modificação e aperfeiçoamento, permitindo comparações em relação à facilidade e flexibilidade de uso, generalização (inclusão dos mais variados componentes hidráulicos), número de iterações, tempo e memória computacional necessários para a convergência do problema.

Diferentemente dos modelos desenvolvidos em regime permanente, nos modelos em regime não-permanente as equações de Bernoulli e da continuidade não se aplicam diretamente em sua forma algébrica, pois há uma variação de pressão e vazão em função do tempo. As pressões geradas pelos transientes chegam a ser, freqüentemente, três vezes superiores aos valores de pressões em operação normal.

O estudo dos transientes em redes de distribuição, por ser de difícil análise e envolver um grande esforço matemático, foi durante algum tempo negligenciado. Dois fatores impediram estudos mais detalhados sobre o assunto. Primeiramente, os pesquisadores, vez por outra, subestimavam a ocorrência e a severidade dos transientes em redes, pois os mesmos acreditavam que o próprio sistema reduziria o impacto do efeito transitório. Entretanto, há pouca base racional para essa atitude, e em alguns casos a posição contrária é verdadeira (KARNEY e McINNIS, 1990). Segundo, há uma grande dificuldade e um alto custo na construção de modelos em regime não-permanente, além da estafante tarefa de se conseguir dados de campo para alimentação do modelo.

Segundo SOUZA (1998), a análise em regime não-permanente em redes tem sido realizada principalmente de duas maneiras:

- Predição de transientes rápidos com altas freqüências, usando modelos de coluna elástica;
- Predição de transientes lentos com baixas freqüências, usando modelos de coluna rígida.

Os modelos aplicados em redes, tanto no regime permanente como não permanente, são encarados sob dois tipos de análise: o problema direto e o problema inverso. No

problema direto, o comportamento hidráulico do sistema (isto é, a vazão em cada tubo, a pressão em cada nó, as cargas hidráulicas e vazões nas bombas) é determinado pelas características do sistema, bem como pelas condições de operação e variação da demanda. No problema inverso, os parâmetros do sistema são tratados como variáveis e são determinados estabelecendo-se especificações de vazão e/ou pressão. Os problemas inversos têm sido usados em diferentes tipos de aplicação na análise de redes, incluindo calibração e localização de vazamentos.

Os modelos podem, também, ser usados como ferramentas para a determinação e quantificação de vazamentos no sistema. Métodos de localização de vazamentos datam da metade do século, com a exploração de petróleo. Naquela época, a identificação dos vazamentos era feita pela comparação de dados de vazão e carga hidráulica medidos com o resultado de simulação numérica. Desde então, vários esforços têm sido feitos pelos pesquisadores e cientistas na intenção de desenvolver métodos alternativos para a localização de vazamentos em sistemas hidráulicos simples e em redes. Técnicas inversas demonstram ser bastante úteis nesta análise, principalmente utilizando-se dados de eventos transientes.

As técnicas de otimização estão desempenhando um papel fundamental na análise de sistemas de distribuição de água, principalmente devido ao efeito do crescimento populacional e industrial. A ligação entre um modelo hidráulico e uma técnica de otimização é uma maneira eficiente de se obter valores das variáveis de decisão com sucesso, minimizando ou maximizando uma função objetivo.

1.2 - Objetivos

Segundo SHAMIR e HOWARD (1968) calibração de uma rede hidráulica consiste da determinação de características físicas e operacionais de um sistema em uso. Vários procedimentos de calibração foram desenvolvidos e estão agrupados em três categorias: modelos de tentativa e erro com o uso de equações analíticas; modelos explícitos ou de simulação hidráulica e modelos implícitos ou de otimização. A grande maioria desses modelos envolvia a calibração dos fatores de atrito das tubulações.

Os métodos tradicionais de localização de vazamentos são baseados no balanço de massa e apresentam a característica de apontar vazamentos na rede sem a preocupação da localização exata dos pontos de fuga de água.

LIGGETT e CHEN (1994) propuseram o Método Transiente Inverso como técnica de calibração e localização de vazamentos. Este método requer uma técnica de otimização

para ajustar os dados medidos e calculados. Eles usaram o método de Levenberg-Marquardt como ferramenta de busca. Entretanto, o espaço de busca para o problema pode ser grande e a solução é dependente do ponto inicial atribuído, o que compromete a convergência ao ótimo global. Uma alternativa ao método de Levenberg-Marquardt é usar a técnica do algoritmo genético pela simplicidade na sua formulação; pela sua capacidade e flexibilidade de uso e, principalmente, por aumentar as chances de uma solução mais próxima ao ótimo global.

É finalidade deste trabalho, estudar tanto a calibração quanto a localização de vazamentos empregando a análise inversa e a técnica de busca do algoritmo genético em redes de distribuição de água submetidos a escoamentos transientes.

O problema transiente inverso é resolvido utilizando uma abordagem indireta que compara os dados disponíveis de carga hidráulica transiente observados com os calculados através de um método matemático. As cargas hidráulicas transientes são determinadas pelo Método das Características. As condições de regime permanente são desconhecidas e determinadas pelo próprio método transiente. O comportamento transiente da rede é estabelecido pela manobra de uma válvula. O algoritmo genético é apropriado para este tipo de problema (calibração) e oferece a oportunidade de trabalhar-se com parâmetros contínuos e discretos bem como das representações binária e real.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é a aplicação do Método Transiente Inverso com um Algoritmo Genético na identificação de parâmetros de uma rede hidráulica, não apenas dos fatores de atrito, mas também das rugosidades absolutas e diâmetros. Pretende-se, também, desenvolver uma metodologia de localização e quantificação de vazamentos. Almeja-se mostrar, através dos vários problemas de identificação, a viabilidade do método a partir de dados de carga hidráulica transiente observados em poucos locais da rede. Os objetivos específicos do trabalho são: 1) Avaliar a influência do desconhecimento das condições iniciais de regime permanente. 2) Avaliar a conveniência da calibração das rugosidades em relação à identificação dos fatores de atrito. 3) Avaliar a influência do tipo de manobra de válvula de controle. 4) Avaliar a influência de erros provocados na leitura dos dados observados. 5) Avaliar a influência da utilização das codificações binária e real na representação dos parâmetros no AG.

O trabalho é um passo inicial para a implementação no procedimento de calibração contínua em uma rede real. Deseja-se que a técnica desenvolvida aqui, sobretudo na localização de vazamentos, seja aplicada em uma próxima fase do projeto.

1.3 – Resumo dos Capítulos

O capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica da literatura sobre calibração e otimização de sistemas de distribuição de água.

O capítulo 3 fornece as equações básicas do escoamento transiente em tubulações e apresenta o modelo hidráulico utilizado para a análise de redes hidráulicas.

O capítulo 4 contém as definições e estabelece a estrutura do algoritmo genético utilizado.

O capítulo 5 aborda os princípios e conceitos básicos do problema inverso e fornece as estratégias adotadas na resolução.

O capítulo 6 é uma aplicação do conteúdo apresentado nos capítulos anteriores para uma rede-exemplo. Resultados de simulações são apresentados para diferentes casos de calibração. Discussões dos resultados, indicando a eficiência e as vantagens da técnica utilizada são também apresentadas.

O capítulo 7 contém as conclusões desta pesquisa e também sugestões para estudos futuros.

2 – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Modelos Hidráulicos em Regime Permanente

Os modelos hidráulicos para a análise de redes em regime permanente, normalmente, baseiam-se no uso das leis da conservação da massa e nos princípios da mecânica dos fluidos. O número de parâmetros de indeterminação que podem ser resolvidos e as condições de contorno do problema são as principais características do uso desses modelos.

Esses modelos incluem várias técnicas: analogia elétrica, técnica de relaxação, aproximação linear, comprimento equivalente, técnica de Newton-Raphson, diâmetro equivalente, elementos finitos, técnica de Gauss-Seidel (SOR), mínimos quadrados, expansão da série de Taylor. Nestes modelos os efeitos da inércia e compressibilidade são desprezados. A solução para o problema de redes é obtida quando algumas condições hidráulicas são satisfeitas: (a) a soma algébrica das vazões em qualquer nó deve ser zero; (b) a carga hidráulica em um nó deve ser a mesma para todos os tubos conectados a este nó; (c) a relação de perda de carga e vazão deve ser satisfeita para cada elemento da rede.

- Métodos Diretos

Um método clássico, talvez o mais famoso, para a solução de redes, mas ainda comumente usado manualmente é o método de Hardy-Cross. Trata-se de um método iterativo que envolve a aplicação sucessiva de correções ótimas para as vazões em cada linha de circuito fechado ou para as energias em cada nó. De acordo com essa técnica os valores iniciais das vazões ou das energias são assumidos. Esse método é preferido para solução manual e facilmente adaptado aos microcomputadores.

A analogia entre uma rede elétrica e uma rede hidráulica foi a base do método de analogia elétrica, onde um circuito elétrico era comparado com um sistema de distribuição de água. Os principais pesquisadores que estudaram este método foram McILROY (1950), SURYAPRAKASAM, REID e GEYER (1950), HOAG e WEINBERG (1957), e McPHERSON e RADZIUL (1958).

A técnica do comprimento equivalente para a análise de redes hidráulicas foi estudado por TONG, O'CONNOR, STEARNS e LYNCH (1961). O procedimento é semelhante ao de Hardy-Cross mas evita um processo de tentativa e erro.

Trabalhando com a linearização da equação da perda de carga no circuito e com o ajuste simultâneo de vazões, WOOD e CHARLES (1972) desenvolveram o método da teoria linear. O método apresentou convergência rápida e a vantagem de assumir as vazões iniciais sem a necessidade de ajuste prévio.

LAM e WOLLA (1972) trabalharam com um método de Newton-Raphson modificado para as equações do nó. O modelo pode ser usado em redes simples ou complexas e requereu um menor tempo de processamento computacional em comparação com o método de Newton-Raphson padrão.

Um algoritmo eficiente para a resolução de redes usando o método de ajustes simultâneos das energias foi desenvolvido por LEMIEUX (1972). Ele usou um método de Newton-Raphson modificado combinado com eliminação de Gauss que assegurou uma maior convergência na solução e uma redução no número de iterações quando comparado com o método de Hardy-Cross e o método de Newton-Raphson padrão.

WILLIAMS (1973) trabalhou com a técnica de Hardy-Cross em um procedimento iterativo utilizando as equações do circuito. O modelo fez o balanço das vazões, assumindo a "equação exata" do circuito (sem truncamento na correção ΔQ), resultando em pouca flexibilidade, sem melhorar a convergência na solução.

Usando uma técnica de decomposição (L;U), CHANDRASHEKAR e STEWART (1974) propuseram um modelo de esparsidade orientado. A matriz Jacobiana foi examinada e decomposta visando uma orientação eficiente dos nós de uma rede hidráulica.

A técnica de elementos finitos foi usada por COLLINS e JOHNSON (1975) para linearizar as equações do circuito. O modelo apresentou vantagens de aplicação, tais como: aumento da velocidade de convergência; inclusão de outros elementos hidráulicos; adaptação fácil a pequenas e grandes redes.

JEPPSON e TAVALLAEE (1975) propuseram a inclusão de bombas e reservatórios na análise de uma rede hidráulica usando teoria linear. O modelo convergiu em poucas iterações e foi considerado mais apropriado a pequenas redes em relação ao método de Newton-Raphson.

Válvulas redutoras de pressão (VRP) em redes foram estudadas por JEPPSON e DAVIS (1976). Um método foi proposto para analisar a presença de VRP's nas equações da rede. Essa introdução não comprometeu a eficiência computacional.

RIGHETTO (1977) propôs uma linearização da relação perda de carga-vazão menos restritiva com a intenção de acelerar a convergência do método linear. Essa técnica fez com que, por aproximações sucessivas, a linearização se aproximasse a uma reta quase tangente à curva de perda de carga real aplicada em cada trecho, no ponto de trabalho.

DODGE, HOELLEIN e TETMAJER (1978) argumentaram sobre a viabilidade de resolução de uma grande rede hidráulica usando computadores de pequeno porte. Trabalhando com a técnica de Newton-Raphson nas equações do nó, minimizaram o processamento envolvendo o método da matriz esparsa. A rede pode conter bombas, booster's, VRP's e reservatórios.

Um método de resolução para as cargas nas junções, usando a teoria linear, foi proposto por ISAACS e MILLS (1980). Com a técnica de Gauss-Seidel foi possível melhorar a precisão e diminuir o tempo de processamento.

GOFMAN e RODEH (1981) propuseram um método para incorporar como incógnitas as características das tubulações, resolvendo as equações do circuito em termos de "geradores de energia". Foi usada a técnica de Newton-Raphson para o ajuste simultâneo das vazões através de fatores de correção em cada circuito.

WOOD e RAYES (1981) providenciaram uma comparação de cinco métodos de solução das equações da rede: LINEAR; S-PATH; PATH; S-NODE; e NODE, três deles baseados nas equações do circuito e dois nas equações do nó. Os métodos LINEAR e S-PATH obtiveram uma melhor convergência em poucas tentativas.

NIELSEN (1989) reformulou as equações governantes para uma rede hidráulica em forma matricial. Mostrou que o método linear oscila em torno do ponto ótimo e sugeriu que o mesmo deva ser utilizado como primeira aproximação e posteriormente usar Newton-Raphson.

Um algoritmo proposto por AYALA e LIGGETT (1991) visou eliminar pressões negativas surgidas durante a análise de um sistema de distribuição de água. A eliminação foi sugerida em duas situações: isolando os tubos que contêm ar e incluindo os tubos com escoamento parcial.

NOGUEIRA (1993) apresentou uma formulação de elemento híbrido no método do nó original, visando aumentar a convergência na solução das equações da rede.

- Métodos Inversos

O método de Hardy-Cross foi aperfeiçoado por VOYLES e WILKE (1962) para demonstrar que o número de correções nas vazões iniciais arbitradas dependem da quantidade de resistências comuns dos circuitos.

SHAMIR e HOWARD (1968) desenvolveram um modelo que explora as combinações de incógnitas que podem ser energias e demandas nos nós ou resistências nos elementos. O modelo mostrou-se flexível quando válvulas, bombas e reservatórios foram introduzidos na rede. O processo iterativo foi feito com balanço energético nos circuitos ou de massa nos nós. Eles argumentaram que em algumas aplicações pode ser interessante incorporar uma análise de sensibilidade investigando a influência dos parâmetros de resistência, demanda e energia quando muitas variáveis são alteradas simultaneamente.

Um modelo com ajuste simultâneo das vazões foi desenvolvido por EPP e FOWLER (1970) que utilizaram a técnica de Newton-Raphson. Os pesquisadores introduziram um algoritmo que estima as vazões iniciais automaticamente e também enumera os circuitos de tal forma a produzir uma matriz simétrica e diagonal mínima oferecendo, assim, uma redução de memória computacional.

DONACHIE (1974) descreveu um programa de computador para análise rápida e eficiente de uma rede, utilizando um método de Newton-Raphson modificado. O programa contém um balanceamento automático e providencia uma melhoria na eficiência computacional e na estabilidade (sob condições de demanda reduzida).

Um procedimento de calibração foi apresentado por WALSKI (1983) onde ele apresenta fórmulas de cálculo para o ajuste de vazões nos trechos e nos coeficientes de resistência dos tubos. Os parâmetros podem ser ajustados conforme a imprecisão entre valores de baixa e alta demanda.

Utilizando a técnica de Newton-Raphson para a linearização das equações da rede, ORMSBEE e WOOD (1986a) desenvolveram um algoritmo de calibração onde os termos de coeficientes de perdas globais foram introduzidos. O modelo resolve explicitamente as equações modificadas produzindo fatores de ajuste para alterar as rugosidades dos tubos.

Pela resolução simultânea das equações da energia e continuidade, ORMSBEE e WOOD (1986b) modificaram essas equações produzindo um fator de velocidade global nos tubos. O modelo fornece a calibração em função da velocidade e/ou do diâmetro e é uma versão modificada do método da teoria linear de WOOD e CHARLES (1972).

WALSKI (1986) trabalhando com as equações do nó, providenciou quais parâmetros devem ser ajustados e apresentou diferentes simulações para várias condições de demanda. O

pesquisador afirmou que uma calibração efetiva está condicionada a uma boa coleta de dados.

Com as equações básicas da rede resolvidas explicitamente por processo iterativo, BHAVE (1988) aplicou a técnica de WALSKI (1983) utilizando um fator de ajuste global na correção dos coeficientes de resistência dos tubos.

BOULOS e WOOD (1990) desenvolveram um modelo que calcula explicitamente os diversos parâmetros de uma rede: projeto, operação e calibração. Um grande intervalo de condições de operação da rede pode ser considerado.

Um algoritmo foi desenvolvido por LANCEY e BASNET (1991) para estimar parâmetros de uma rede hidráulica. Este algoritmo, de programação não-linear, teve por objetivo minimizar a diferença entre os valores dos dados observados e calculados. Foi usado na função objetivo tanto o desvio absoluto quanto o desvio quadrático.

DATTA e SHRIDHARAN (1994) propuseram um modelo baseado no método dos mínimos quadrados em que utiliza uma técnica de sensibilidade para estimar o coeficiente de Hazen-Williams dos tubos. São considerados três tipos de carregamentos na rede hidráulica.

O método dos mínimos quadrados baseado em uma técnica de minimização de Gauss-Newton foi usado por REDDY et al. (1996) na calibração dos coeficiente de resistência dos tubos. O trabalho mostrou a influência de diferentes escolhas de pesos na estimativa dos parâmetros.

AHMED, LANCEY e ARAÚJO (1999) utilizando expansão da série de Taylor propuseram um algoritmo para estudar as incertezas causadas por medidas e erros de estimativas na calibração de redes hidráulicas.

Uma nova técnica de "agrupamento" na estimativa de parâmetros em redes hidráulicas foi proposto por BASCIÀ, TERMINI e TUCCIARELLI (1999). O problema inverso é estudado na tentativa de estimar um coeficiente de resistência em uma rede hidráulica ramificada.

2.2 - Modelos Hidráulicos em Regime Não Permanente

A partir da década de 90 é que os pesquisadores ampliaram o estudo de modelos em regime transiente e começaram a dar grandes contribuições. O interesse pelo estudo tem sido na busca de esquemas de otimização para a obtenção da melhor solução nas dimensões das canalizações, estudos de operação de sistemas considerando a variabilidade da distribuição dos consumos e a dinâmica de funcionamento de bombas, reservatórios, válvulas, etc.

- Métodos Diretos

DRIELS (1975) realizou uma simulação transiente em um sistema contendo uma tubulação com um reservatório a montante e uma válvula a jusante. O sistema de controle de pressão projetado está baseado em um aparato servo-eleto-hidráulico realimentado, onde a pressão do fluido adjacente à válvula é medida e comparada com a pressão requerida. A diferença ou erro na pressão é usada para manipular a válvula, controlando a pressão até que o erro seja reduzido.

WYLIE (1983) apresentou vários conceitos relativos ao uso de computadores no estudo dos transientes em sistemas de tubulações. Os tópicos apresentados incluem: conceitos de organização para o manuseio dos dados; idéias de armazenamento computacional; eficiência nos cálculos, pelo uso do método das características. Várias alternativas com relação a escolha do intervalo de tempo são discutidas e uma modificação no termo da fricção foi introduzida visando melhorar a eficiência computacional. Dois elementos comuns em sistemas hidráulicos que influenciam a forma das ondas de pressão, tubos em série e perdas em acessórios, foram estudados, providenciando uma melhor visualização na resposta transiente.

SHIMADA e OKUSHIMA (1984) desenvolveram dois modelos para o cálculo dos transientes em sistemas de tubos: o método de solução em série e um método de Newton-Raphson modificado. Ao desenvolver o termo relativo ao erro de truncamento nas equações, os autores omitiram termos triviais e os novos métodos produziram uma solução com uma precisão estabelecida sem necessitar de iteração. O modelo de segunda ordem tornou-se mais eficiente e preciso do que o modelo de primeira ordem. A aplicação desses modelos não ficou restrita a sistemas com alta perda de carga, envolvendo também sistemas com moderadas perdas. Observou-se um erro no cálculo do regime permanente, mas foram propostas soluções de remoção e redução do mesmo.

ONIZUKA (1986) apresentou um método de análise, baseado na teoria da coluna rígida, para transientes lentos e escoamentos permanentes em redes. Para a descrição do estado não permanente da rede, o autor desenvolveu a dedução de um sistema de equações diferenciais ordinárias. Utilizando uma função definida de Liapunov, foi provada a existência da estabilidade da rede, bem como um critério de unicidade e precisão na obtenção do estado permanente. Observou-se, também, que o método não necessitou de um procedimento iterativo, pois as equações foram integradas pelo conhecido método de Runge-Kutta. O estado permanente foi obtido pela aplicação de uma técnica de relaxação dinâmica, a qual não trabalhou com o balanceamento das vazões iniciais.

SHIMADA (1988) desenvolveu a aproximação "time marching" (TMA) visando a determinação do fluxo em estado permanente como um limite assintótico do fluxo transiente em tubulações. O problema foi formulado pela minimização do raio espectral de uma matriz de coeficientes da equação de estado, sujeito às restrições da conservação da massa e energia. O número de parâmetros no problema original foi reduzido devido não ser necessário o cálculo dos autovalores da matriz. Formulou uma teoria generalizada da aproximação TMA utilizando o método das características, estabelecendo as várias condições de contorno do problema. O procedimento foi testado para os casos de sistemas simples e complexos, considerando, também, fatores de atrito constante e variável (aproximação de Halland com a equação de Colebrook-White). Em ambos os casos, o método mostrou-se útil.

SHIMADA (1989) propôs um método, baseado na teoria da coluna rígida, para a análise de transientes lentos em redes. O método foi denominado método de incidência. Este demonstrou ser mais prático do que o método de circuitos, particularmente com relação aos problemas de abertura e fechamento de válvulas. Na discussão e elaboração dos diversos métodos numéricos usados na resolução das equações diferenciais ordinárias, constatou que a dificuldade em resolvê-las estava relacionada com o movimento de abertura da válvula. Conseqüentemente, instabilidades numéricas foram observadas, e por isso métodos mais estáveis do que o método Runge-Kutta de quarta ordem são necessários. Propôs, ainda, uma técnica para ajustar as vazões nos tubos, visando satisfazer a continuidade nos nós, uma vez que as vazões são arbitrariamente reduzidas a zero quando o fluxo transiente através de uma válvula diminui para um valor pequeno, próximo de zero. Foram apresentados resultados numéricos para transientes lentos e rápidos, utilizando os modelos de coluna rígida e elástica, respectivamente.

KARNEY e MCINNIS (1990) discutiram o fenômeno transiente em redes. Eles levantaram o problema afirmando que não se deve desprezar o efeito transiente sob pena de comprometer a estrutura física e o custo da obra. Afirmaram que no estudo dos transientes há uma grande quantidade de idéias simplificadoras sem, no entanto, haver uma compreensão completa dos efeitos. Os autores contestaram três 'axiomas' sobre os transientes em redes: (a) máxima velocidade no estado permanente produz uma máxima variação de pressão; (b) o efeito transiente é amenizado quando se trata de redes ramificadas ou malhadas; (c) se um dispositivo de proteção é bom, dois (ou mais) são melhores. Essas três idéias simplificadoras são encaradas como 'folclore' e sem sustentação científica. Os autores afirmam que os "transientes não são influenciados somente pelas características físicas do sistema; sua intensidade e comportamento dependem da permanência de fatores, tais como: configuração

da rede, duração dos eventos e condições iniciais". Para se ter uma boa análise do fenômeno transiente é necessária uma investigação das condições de fluxo, condições de operação e uma combinação dos dispositivos de proteção.

GUEVARA e CARMONA (1990) trabalharam com a possibilidade de redução de altas pressões transientes produzidas durante a partida e parada de bombas. Para produzir esta redução, propuseram um esquema de controle PID (proporcional-integral-derivativo) para determinar a redução gradual da rotação da bomba, em vez de usar o clássico controle por estrangulamento feito com fechamento parcial de uma válvula, proporcionando uma menor dissipação de energia. No procedimento proposto, o escoamento foi representado pelas equações características (resolvidas pelo método das características), pelas condições de contorno e a descrição matemática da bomba. Foi desenvolvido um procedimento computacional para simular a partida e a parada da bomba, e aplicando-se em um sistema de bombeamento simples, constatou-se a redução das altas pressões transientes.

Quando a vazão em um conduto forçado é alterada, ocorrem freqüentemente conversões de energia, particularmente se a tubulação está transportando água ou algum outro líquido ligeiramente compressível. As expressões matemáticas que descrevem essas transformações de energia transiente são motivadas pelo princípio da continuidade e momentum. KARNEY (1990) desenvolveu uma interpretação alternativa das condições transientes em uma tubulação através de uma expressão de energia integrada que resume a resposta transiente. Foi elaborada uma expressão da energia em uma tubulação na forma:

$$\frac{\rho A}{2} \left(\frac{g}{a} \right)^2 \frac{d}{dt} \int H^2 dx + \frac{\rho A}{2} \frac{d}{dt} \int V^2 dx + \frac{f \rho A}{2D} \int |V|^3 dx + \rho g A V(L,t) H(L,t) - \rho g A V(0,t) H(0,t) = 0 \quad (2.1)$$

onde V = velocidade do fluido; H = carga piezométrica; D = diâmetro do tubo; ρ = massa específica do fluido; g = aceleração da gravidade; f = fator de atrito de Darcy-Weisbach; dx = um comprimento infinitesimal. Essa expressão fornece uma interpretação natural das condições transientes e, principalmente, ajuda na distinção entre o modelo de coluna rígida (onde os efeitos da elasticidade da água e do tubo são ignorados) e o modelo da coluna elástica (onde os efeitos da elasticidade são incluídos). Por conveniência, a equação da energia pode ser escrita numa forma mais compacta da seguinte forma

$$\frac{dU}{dt} + \frac{dT}{dt} + D' + W' = 0 \quad (2.2)$$

onde T = energia cinética total; U = energia interna; D' = taxa de dissipação viscosa; e W' = taxa de trabalho externo. Foi definido, ainda, um índice de compressibilidade ϕ que relaciona a variação da energia interna total com a energia cinética total:

$$\phi = \frac{|\Delta U|_{\max}}{|\Delta T|_{\max}} \quad (2.3)$$

e KARNEY (1990) concluiu que se o valor de ϕ é grande ($\phi > 0,1$), os efeitos da compressibilidade são importantes. Quando ϕ é pequeno ($\phi < 0,01$), os efeitos da compressibilidade são menos importantes e o modelo da coluna rígida torna-se uma melhor aproximação da resposta transiente da tubulação. Para $0,01 < \phi < 0,1$, indica que a compressibilidade é moderadamente importante e que pode ser desprezada com alguma perda de precisão.

SIMPSON e WYLIE (1991) investigaram a variação da magnitude e a forma dos pulsos de pressão de curta duração em um sistema simples reservatório-tubo-válvula. Os pulsos de pressão, com a conseqüente cavitação no tubo, podem exceder o aumento da carga calculada pela expressão de Joukowski. Uma série de modelos numéricos e medidas experimentais indicaram que os pulsos de pressão de curta duração podem ocorrer após o colapso da cavitação. A magnitude das pressões depende da superposição das ondas do golpe.

O método das características (MOC) com interpolações polinomiais aplicado na análise transiente em uma tubulação horizontal sem atrito foi investigado por SIBETHEROS, HOLLEY e BRANSKI (1991). A nova análise serviu para avaliar a performance de três diferentes tipos de funções polinomiais e compará-los com outros esquemas numéricos. Concluíram que a precisão total do método com este tipo de interpolação foi significativamente aperfeiçoada quando comparada com o método das características tradicional ou técnicas explícitas de diferenças finitas, embora com um maior consumo de tempo computacional.

Trabalhando com uma extensão do método das características convencional, KARNEY e McINNIS (1992) analisaram os transientes em uma rede de tubos. O modelo permite manusear tanto as condições de contorno como a topologia da rede de uma forma generalizada, facilitando a solução de muitas combinações de dispositivos hidráulicos. O

modelo apresentou vantagem por ser mais flexível e mais simples, particularmente com a linearização do termo do atrito. Um algoritmo explícito foi desenvolvido para um elemento hidráulico chamado de “dissipador de energia externa”. Essa condição de contorno pode representar chaminés de equilíbrio, válvulas de alívio, reservatórios de armazenamento, válvulas descarregando na atmosfera e muitos outros dispositivos. O trabalho demonstrou que muitos desses dispositivos podem ser incluídos no equacionamento reduzindo a uma forma mais compacta, manuseável e matematicamente tratável, preservando a estrutura física e topológica do sistema.

ALMEIDA e KOELLE (1993) apresentaram um tratado sobre transientes hidráulicos em redes, onde é desenvolvido um equacionamento geral para a análise de sistemas complexos. Com relação à solução permanente, comentaram sobre a conveniência de ser utilizada a formulação do transitório, principalmente para facilitar a entrada de dados na análise transiente. Eles forneceram alguns aspectos práticos importantes para o cálculo hidráulico, particularmente o uso de uma celeridade fictícia para os trechos da rede.

RIGHETTO (1994) desenvolveu um algoritmo computacional baseado no método das características para transientes em redes. O modelo apresentou facilidade de caracterização do sistema, bem como o equacionamento explícito das cargas nos nós e das vazões nos trechos da rede. 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 sistema contendo estações elevatórias, reservatórios de ponta, válvulas e boosters. O modelo mostrou ser mais eficiente do que o método da coluna rígida tanto pela versatilidade e aplicação quanto pelo tempo de processamento para a obtenção da solução permanente.

ELANSARY, SILVA E CHAUDHRY (1994) calcularam os transientes em um sistema de tubulação usando duas formulações matemáticas: o modelo interativo fluido-estrutura (FSI), que inclui o coeficiente conjugado de Poisson; o tradicional modelo de duas equações. O modelo FSI contém quatro equações diferenciais parciais. O método das características foi usado em ambos os modelos, transformando as equações diferenciais parciais em diferenciais ordinárias. Os dois modelos foram aplicados em um sistema reservatório-tubo-válvula-tanque. Um fechamento parcial da válvula, localizada em um ponto intermediário, foi usado para provocar o transitório. Os resultados da simulação mostraram que o FSI obteve bons resultados, acompanhando os picos de pressão dos valores medidos. Concluíram, ainda, que o modelo FSI tem um forte efeito em fluidos com alta viscosidade.

McINNIS e KARNEY (1995) desenvolveram uma nova formulação para a análise de redes, sob condições transientes, em que os sistemas de demanda são representados por

um fluxo distribuído. Essa formulação foi comparada com duas técnicas convencionais: do orifício equivalente (ou consumo agregado) e com a técnica discreta agregada com retirada (consumo) constante. Os resultados obtidos pelos três modelos apresentaram semelhanças e se ajustaram bem com os dados experimentais. Os autores concluíram, ainda, que os três modelos acompanharam os picos de baixa pressão inicial e o primeiro pico de sobrepressão.

KARNEY e BRUNONE (1999) estudaram o comportamento transiente em redes hidráulicas em dois diferentes casos. O primeiro exemplo demonstrou a importância da topologia da rede para a resposta transiente. Concluíram que se alguns trechos são desprezados no processo de esqueletização, picos de pressão podem aparecer. No segundo exemplo, um acréscimo de pressão é provocado pelo fechamento instantâneo de uma válvula de controle. Verificou-se que a sobrepressão gerada decai mais rapidamente do que a prevista pelos modelos convencionais de fricção quase-linear. Concluíram, ainda, haver evidências de altas tensões de cisalhamento sob condições transientes.

- Métodos Inversos – Vazamentos e Calibração

A ocorrência de vazamentos nos sistemas de distribuição de água aflige governos, comunidades, pesquisadores e cientistas. Em geral, os vazamentos são o resultado de diversos fatores como mau funcionamento na operação e manutenção do sistema, envelhecimento das tubulações e conexões e acidentes repentinos. Atualmente, as perdas de água entre a captação e os consumidores finais, passando pela Estação de Tratamento de Água (ETA), reservatórios e rede hidráulica chegam até 40% do volume total distribuído. Em virtude de tais índices, projetos de redução de vazamentos tornam-se prioritários para autoridades e pesquisadores.

Métodos de localização e quantificação de vazamentos surgiram na metade do século 20, com a exploração e transporte de petróleo em tubulações. Estes métodos variam desde o uso de técnicas de geofonamento até a utilização de radares sofisticados. Métodos simples de localização de vazamentos podem ser de grande ajuda, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional.

Várias são as referências que dizem respeito a vazamentos e a maioria delas enfoca o problema de controle e operação ótima de válvula visando a minimização das perdas. Destacam-se os trabalhos de JOWITT e XU(1990) e REIS et al. (1997) que abordam a localização ótima de válvulas de controle.

Muitos autores têm proposto métodos alternativos para localização de vazamentos em tubulações usando medidas de carga e vazão, diferenciando, cada método, da técnica de otimização. PUDAR e LIGGETT (1992) propuseram uma metodologia baseada na comparação de cargas ou vazões medidas em regime permanente, com simulação computacional do sistema hidráulico. Este método é conhecido como Análise Inversa e pode ser efetuado também em regime transiente.

De acordo com LIGGETT e CHEN (1994), a análise inversa usando medidas do regime transiente permite, simultaneamente, a calibração do sistema e identificação de vazamentos. Além disso, com o uso de dados transientes, o monitoramento da rede torna-se mais adequado. Na verdade, efetuando, continuamente ou periodicamente, a calibração do sistema torna-se possível conhecer o estado de conservação geral da rede e prever vários problemas que podem ocorrer no futuro. Outra vantagem é proporcionar a rápida localização de rupturas repentinas.

No Método Transiente Inverso (ITM), como desenvolvido por LIGGETT e CHEN (1994), a informação transiente pode ser coletada em poucos locais. Um determinado distúrbio no fluxo é transmitido à rede. A onda transiente pode se deslocar com velocidades superiores a 1000 m/s. Essas ondas refletem-se nas junções, válvulas e contornos do sistema. A coleta de informações pela propagação da onda transiente é a razão de que o ITM oferece mais potencial em comparação as técnicas de calibração em estado permanente.

LIGGETT e CHEN (1994) aplicaram o método de Levenberg-Marquardt que usa derivadas generalizadas por meio de análises conjuntas na intenção de ajustar dados medidos e calculados pelo modelo. Segundo SIMPSON et al. (2000), o espaço de busca para o problema (calibração) pode ser enorme. O método de Levenberg-Marquardt é uma técnica de otimização padrão (método direto), mas a sua solução sempre depende do ponto inicial e não se pode garantir o ótimo global. A técnica do Algoritmo Genético (AG) é um método alternativo ao método de Levenberg-Marquardt. COVAS et al. (2000) apresentaram três técnicas de localização e quantificação de vazamentos, em regime transiente, fundamentadas na análise da primeira onda transiente refletida, na análise de frequência de amortecimento da onda, e na análise inversa.

2.3 – Modelos de Otimização em Redes Hidráulicas

O projeto de sistemas de distribuição de água tem recebido uma grande atenção nas últimas três décadas devido, sobretudo, ao crescimento industrial e populacional e ao papel

crucial que eles exercem na sociedade, tais como: saúde da comunidade, reserva para combate a incêndio e, principalmente, a qualidade de vida. Várias redes hidráulicas existentes em áreas urbanizadas têm se danificado e são inadequadas do ponto de vista das pressões e vazões requeridas. Devido a estes fatores e ao elevado custo de instalação e manutenção do sistema, são necessárias decisões no sentido de se obter um sistema capaz de satisfazer as exigências de pressão e vazão mínimas requeridas.

A maioria dos modelos aborda o critério de mínimo custo. Este problema é, normalmente, um exemplo típico de otimização não convexo, tendo um certo número de mínimos locais, tornando-o difícil de resolvê-lo. Na realidade, o problema de otimização em redes de distribuição d'água é um tema complexo e ainda não completamente resolvido. A Tabela 2.1 apresenta, cronologicamente, as principais características desses modelos.

2.4 – Método de Busca do Algoritmo Genético

Um algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca baseada na seleção natural e nos mecanismos de população genética (HOLLAND, 1975; GOLDBERG, 1989). A idéia de busca por AG's tem sua origem no processo biológicos de sobrevivência e adaptação das espécies formulado pelo naturalista inglês Charles Darwin. Esta analogia permite construir um algoritmo eficiente com características adequadas à solução de problemas com espaços de busca complexos tais como em sistemas de distribuição d'água. Optou-se por fazer uma abordagem mais ampla do método de busca do algoritmo genético no capítulo 4, pois esta é a ferramenta de busca adotada neste trabalho.

Existe um grande número de aplicações de AGs em problemas de recursos hídricos demonstrando sua habilidade em obter melhores soluções do que pelos métodos convencionais. Para citar as mais importantes, os AGs foram aplicados por SIMPSON et al. (1994) e SAVIC e WALTERS (1997) na obtenção do ótimo global para problema de projeto em redes hidráulicas. SAVIC e WALTERS (1995a,b) trabalharam com o problema de localização de válvulas em redes hidráulicas e REIS et al. (1997) consideraram o problema de localização ótima de válvulas de controle em redes hidráulicas com redução de vazamento como função objetivo a ser maximizada. MONTESINOS et al. (1999) apresentaram um AG modificado com a finalidade de aumentar a convergência do algoritmo e obter a solução de mínimo custo em poucas gerações. RITZEL et al. (1994) enfatizaram a importância do AG sobre a otimização convencional, trabalhando com problemas complexos altamente não-lineares e similares ao mundo real. CIENIAWSKI et al. (1995) investigaram um problema de

monitoramento multi-objetivo em água subterrânea usando AGs e dois objetivos, maximização da confiabilidade e minimização de áreas contaminadas. Eles afirmaram que a solução obtida pelo AG tem uma vantagem sobre aproximações multi-objetivo tradicionais, pois pode gerar tanto pontos convexos como não-convexos, acomodar a não-linearidade nas duas funções objetivo, encontrar vários pontos Pareto ótimo em uma simples iteração. CIENIAWSKI et al. (1995) apresentaram, analisaram e compararam quatro distintas formulações de AG: função objetivo ponderada, formulação AG com vetor-avaliado (VEGA), formulação por ordenamento do Pareto ótimo, e combinação do VEGA e formulações por ordenamento. GAMBALE (2000) aplicou a técnica dos algoritmos genéticos à calibração dos coeficientes de rugosidades de redes hidráulicas em regime permanente. SIMPSON et al. (2000) usaram o AG na calibração das rugosidades dos tubos sob condições transientes em um sistema de distribuição de água. Foram usados dois esquemas de codificação para o AG: discreto e contínuo. Na análise da calibração, usaram o Método Transiente Inverso (ITM).

2.5 – Alguns Modelos Disponíveis no Mercado

GAMBALE (2000) cita os principais modelos de calibração utilizados atualmente.

- EPANET – Desenvolvido pela “U. S. Environmental Protection Agency – EPA”, este programa de distribuição livre possui vários recursos como Controles (“Controls”), Padrões (“Patterns”) e as simulações em Período Extensivo (“Extended Period Simulations”) e de Qualidade de Água (“Water Quality”). Encontram-se disponíveis as versões no ambiente DOS e no ambiente com interface em WINDOWS. A versão totalmente em WINDOWS está em desenvolvimento, existindo uma versão “Beta”.
- BOSS SEM (“Epanet Modeling System”) – Desenvolvido no ambiente WINDOWS pela empresa “Boss International”, este simulador utiliza o cálculo do modelo EPANET, contando com todos os recursos disponíveis naquele modelo, tendo as vantagens da interface do WINDOWS para a criação da rede e visualização dos resultados.
- CFOR – O programa criado pela “Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da Universidade de São Paulo” foi desenvolvido em ambiente WINDOWS e possui os módulos de cálculo em regime permanente, extensivo e transitório.

- H₂ONET – Pertencente à “MW Soft, Inc.”, este programa é um dos mais completos existentes no mercado. Trabalha diretamente no ambiente AUTOCAD, dispondo dos módulos de cálculo de qualidade de água, regime permanente e extensivo. Possui, também, um vasto grupo de recursos, destacando-se o gerenciador de cenários e a interface com os sistemas GIS e SCADA. Apesar de ser um programa de grandes recursos, seu manejo não é simples, necessitando do programa AUTOCAD para funcionar.
- PIPE 2000 – Esta versão para WINDOWS do programa KPIPE, produzida pela Universidade do Kentucky (USA), dispõe de uma grande variedade de recursos, cumprindo destacar a utilização de imagens RASTER (“background”) e a calibração automática. Trata-se de um programa de fácil assimilação.
- WATERCAD – Criado pela empresa “Haestad Methods”, é um programa desenvolvido em WINDOWS, tendo uma extensa gama de recursos, dentre eles, o gerenciador de cenários. Talvez, a maior virtude deste programa seja a facilidade com que o operador aprende a utilizá-lo.

Tabela 2.1 - Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente

Autor	Variáveis	Função Objetivo	Comentários
Alperovits e Shamir (1977)	x_{ij} = comprimento	$\min \sum_{i,j} \sum_m c_{ijm} x_{ijm}$ onde: c_{ijm} = custo da tubulação por unidade de comprimento.	Um método de programação linear usando gradiente foi desenvolvido. A função objetivo envolve o custo total de instalação e operação. As restrições referem-se aos limites de pressão nos nós. Com mudanças no modelo de demanda, o método produziu um ótimo local.
Morgan e Goulter (1985)	X_{jdr} e X_{jds} = comprimento dos tubos.	$\min \sum_{j=1}^{NL} (K_{jdr} X_{jdr} + K_{jds} X_{jds})$ onde: K_{jdr} = custo unitário de mudança, no tubo j , de diâmetro d para um diâmetro maior r ; K_{jds} = custo de mudança, no tubo j , de diâmetro d para um diâmetro menor s ; NL = número de tubos na rede;	Um procedimento heurístico de programação linear foi proposto. O método foi capaz de analisar a rede sob uma grande variação da demanda. O método usa a técnica de Hardy-Cross bem como o algoritmo SIMPLEX.
Goulter et al. (1986)	x_{ijm} = comprimento dos tubos.	$\min \sum_{i,j} \sum_m COST_{ijm} x_{ijm}$ onde: $COST_{ijm}$ = custo por metro de tubo de diâmetro m entre os nós i e j .	Analisaram a solução de mínimo custo em redes hidráulicas através do efeito da variação da trajetória da perda de carga. O método usa a técnica de programação linear com gradientes. A trajetória escolhida mostrou afetar na otimização.
Lancey et al. (1989)	$D_{i,j}$ = diâmetro	$\min \sum_{i,j \in M} f(D_{i,j})$ onde: $f(D_{i,j})$ = custo como função do diâmetro; M = conjunto de possíveis tubos.	Estudaram a otimização em redes incorporando incertezas nas demandas requeridas, cargas e coeficientes de rugosidade. O problema foi formulado como um modelo de programação não-linear e resolvido pelo método do gradiente reduzido generalizado.
Zessler e Shamir (1989)	$X_i(t)$ = vazão bombeada; $V_i(t)$ = volume dos reservatórios; e $D(t)$ = vetor de demandas; $i = 1, \dots, J$ = índice dos reservatórios.	$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \{G_j [X_j(t), V(t), D(t)]\}$ onde: $j = 1, \dots, J$ = índice de estações de bombeamento; $t = 1, \dots, T$ = índice de intervalos de tempo; G_j = custo na estação de bombeamento j .	A operação ótima de um sistema de suprimento de água foi analisado por otimização progressiva (PO) usando um método de programação dinâmica (DP) iterativo. O ótimo global foi garantido sob certas condições, enquanto o ótimo local foi facilmente encontrado.

Tabela apresenta modelos típicos em ordem cronológica.

Tabela 2.1 - Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente – (continuação)

Autor	Variáveis	Função Objetivo	Comentários
Goulter e Bouchart (1990)	x_{ij} = comprimento do diâmetro j no tubo i .	$\min COST = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{ND(i)} c_{ij} x_{ij}$ <p>onde: NL = número total de tubos na rede; $ND(i)$ = número de diâmetros candidatos no tubo i; c_{ij} = custo por unidade de comprimento do j-ésimo diâmetro no tubo i.</p>	A essência da metodologia foi a medida da confiabilidade na otimização da rede. A confiabilidade foi definida por meio da probabilidade de falha na performance tanto nos componentes da rede como pelas demandas.
Duan e Lansley (1990)	y_i = bomba i do sistema; z_{in} = operação da bomba i na condição de carregamento n ; s_{lk} = reservatório de tamanho k e localização l .	$\min COST = \sum_i CP_i y_i + \sum_i \sum_n C_{in} T_{in} J_n z_{in} + \sum_l \sum_k W_{lk} s_{lk} + \sum_p \alpha_p L_p D_p^{\beta_p}$ <p>onde: $i = 1, 2, \dots, I$; $n = 1, 2, \dots, N$; $l = 1, 2, \dots, L$; e $k = 1, 2, \dots, K$; no qual I = número de bombas candidatas; N = número de condições de carregamento; L = número de locais candidatos dos reservatórios; e K = número de dimensões candidatas dos reservatórios para o local l; CP_i = custo inicial da bomba i; C_{in} = custo de operação da bomba i para a condição de carregamento n; W_{lk} = custo do reservatório para o local l de dimensão k; α_p, β_p = coeficientes de custo por unidade de comprimento do tubo p; L_p = comprimento do tubo p; D_p = diâmetro do tubo p; T_n = tempo da condição de carregamento n; e J_n = número de vezes que a condição de carregamento n aparece no período de projeto.</p>	O modelo determinou o custo mínimo considerando o custo de bombas e armazenamento nos reservatórios, tubos, e custo de energia. A confiabilidade do sistema foi calculada usando análise de frequência e duração, considerando falha mecânica da estação de bombeamento e reservatórios bem como falha hidráulica do sistema. O problema de otimização foi não linear e resolvido pelo gradiente reduzido generalizado.

Tabela apresenta modelos típicos em ordem cronológica.

Tabela 2.1 - Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente – (continuação)

Autor	Variáveis	Função Objetivo	Comentários
Jowitt e Xu (1990)	QS_{ij} = volume de vazamento ocorrendo em um tubo de comprimento L_{ij} entre os nós i e j .	$\min_{V(k)} \sum_{ij \in R} QS_{ij}$ onde: $V(k)$ = parâmetro que representa o conjunto da k -ésima válvula.	Desenvolveram um algoritmo para a minimização de vazamentos em redes hidráulicas. As equações não lineares da rede (nós e tubos) foram acrescidas pelos termos de vazamento/pressão e dos efeitos da ação das válvulas de controle. Essas equações foram linearizadas usando o método da teoria linear (Wood e Charles, 1972) e produziu um algoritmo linear de vazamento mínimo.
Ormsbee e Kessler (1990)	x_{pd} = comprimento do tubo p com diâmetro d .	$\min \sum_{p=1}^P \sum_{d \in \{D\}} C_d X_{pd}$ onde: P = total de tubos na rede; $\{D\}$ = diâmetros disponíveis; C_d = custo unitário associado com o diâmetro d .	Uma metodologia de dois estágios foi usada para a obtenção do custo mínimo. Introduziu-se um conceito de nível de redundância para a rede hidráulica. A otimização permitiu selecionar um projeto de custo total mínimo e o nível desejado de serviço.
Culliname et al. (1992)	D = vetor dos diâmetros; H = vetor das cargas.	$\min \text{cost} = f(D, H)$	A metodologia considerou a disponibilidade hidráulica e mecânica na otimização. A análise de disponibilidade foi embutida em um algoritmo de programação não linear.
Jowitt e Germanopoulos (1992)	x_{nm}^k = tempo de bombeamento; v_{ij}^k = acionamento das válvulas; s_i^k = volume dos reservatórios.	$\min \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} \sum_{h \in I_n} r_n^k x_{nm}^k U_{hm}^k \right)$ onde: r_n = tarifa unitária da estação de bombeamento n ; U_n = potência consumida na estação de bombeamento n	O estudo mostrou que programação linear, sujeita a um conjunto de hipóteses, pode ser usada para a solução de problemas de manobras ótimas de bombas. O método foi aplicado com sucesso em uma rede e produziu redução significativa dos custos.
Park e Liebman (1993)	X_{ij} = diâmetro	$\min \sum_{(ij)} \beta_{ij} L_{ij} X_{ij}$ onde: β_{ij} = custo por unidade de comprimento; L_{ij} = comprimento do tubo.	O modelo demonstrou a utilidade da medida de escassez esperada como uma alternativa para a confiabilidade da rede hidráulica, e o uso dessa medida como uma restrição em uma aproximação de mínimo custo. Um modelo de programação linear modificado foi desenvolvido.

Tabela apresenta modelos típicos em ordem cronológica.

Tabela 2.1 - Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente – (continuação)

Autor	Variáveis	Função Objetivo	Comentários
Fujiwara e Ganesharajah (1993)	q_i = vazão no tubo i .	$\max \sum_j \left(\sum_{i \in in(j)} q_i - \sum_{i \in out(j)} q_i \right) f_j$ <p>onde: q_i = vazão no tubo i; $in(j)$ e $out(j)$ = demandas entrando e saindo do nó j, respectivamente; f_j = disponibilidade hidráulica, ou carga, para o nó j.</p>	O método avaliou a confiabilidade de uma rede hidráulica por meio da insuficiência do fluxo nos nós; na falha no bombeamento e na operação das bombas. O problema foi formulado como não linear e usou o método da cadeia de Markov. O objetivo foi maximizar a soma efetiva das demandas nos nós.
Ostfeld e Shamir (1993)	q_a = vazões nos tubos; TC_{tsn}^k = custo de tratamento da água.	$\min (WC + EC)$ <p>onde WC = custo da água; EC = custo de energia.</p>	O objetivo do modelo foi minimizar o custo total, liberando para os usuários as quantidades requeridas para um nível aceitável de pressão e qualidade da água. A otimização foi feita usando o MINOS trabalhando com os multiplicadores de Lagrange.
Lancey e Awumah (1994)	$X_{i,jp}$ = manobras de operação	$\min \sum_{i=1}^{NLOAD} \sum_{jp=1}^{NPUMP} X_{i,jp} \left(C_i QP_{i,jp} \frac{HP_{i,jp}}{550ep_{i,jp}} \right)$ <p>onde: $NLOAD$ = número de períodos no horizonte de planejamento; $NPUMP$ = número de bombas; C_i = custo unitário de energia; $QP_{i,jp}$ = vazão na bomba; $HP_{i,jp}$ = carga; $ep_{i,jp}$ = rendimento.</p>	O modelo trabalhou com a determinação de manobras ótimas de operação das bombas em um sistema de distribuição de água. A análise foi feita com um algoritmo de programação dinâmica. O modelo foi restrito a pequenos e médios sistemas. Uma análise de sensibilidade foi feita para demonstrar como as decisões de operação e os critérios de otimização afetam as soluções ótimas.
Pezeshk et al. (1994)	Q_i = vazão na bomba i .	$\min \sum_{i=1}^l \frac{\gamma TDH_i Q_i}{e_i}$ <p>onde: l = número total de bombas; Q_i = vazão; e_i = rendimento; γ = peso específico da água; e TDH_i = carga dinâmica total.</p>	O modelo é não linear e o objetivo foi minimizar o custo de bombeamento em um sistema de distribuição de água subterrânea. A otimização foi conduzida por meio do MINOS.

Tabela apresenta modelos típicos em ordem cronológica.

Tabela 2.1 - Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente – (continuação)

Autor	Variáveis	Função Objetivo	Comentários
Kim e Mays (1994)	Diâmetro e potência das bombas	$\min \text{custo total} = (f_1 + f_2 + f_3 + f_4)$ onde: f_1 = custo de reposição dos tubos; f_2 = custo de reabilitação dos tubos; f_3 = custo de reparo esperado; e f_4 = custo de energia.	O modelo selecionou tubos a serem reabilitados e/ou substituídos em uma rede hidráulica existente, e determinou o aumento da capacidade de bombeamento. O modelo foi não linear e foi usado o KYPIPE como simulador hidráulico.
Eiger et al. (1994)	x = comprimento	$\min c^T x$ onde: c = custo unitário de comprimento.	Uma decomposição em dois estágios foi formulada. O problema principal foi não linear e não convexo; o secundo problema foi linear. Utilizou-se programação não linear e a teoria da dualidade.
Loganathan et al. (1995)	$Q_{(i,j)}$ = vazão; $J_{(i,j)m}$ = perda de carga; $x_{(i,j)m}$ = comprimento.	$\min f(x) = \sum_{(i,j)} \sum_{m=1}^M C_{(i,j)m} x_{(i,j)m}$ onde: $C_{(i,j)m}$ = custo por unidade de comprimento.	Usaram métodos heurísticos para a otimização: MULTISTART e ANNEALING. Uma decomposição foi feita para permitir o uso de programação linear junto com uma pesquisa do ótimo global. O modelo produziu uma região de soluções ótimas locais.
Anderson e Al-Jamal (1995)	Q_i^k = vazão; H_i^k = carga.	$\min \sum_{k=1}^L \left[\sum_{i=1}^M F_i (\Delta Q_i^k)^2 + \sum_{i=1}^N E_i (\Delta H_i^k)^2 \right]$ onde: ΔQ_i^k = erro na vazão para o i -ésimo ponto monitorado; ΔH_i^k = erro na carga; F_i e E_i = fatores de penalidade.	O objetivo foi criar uma pequena rede que tivesse o mesmo comportamento de uma grande rede. O modelo foi baseado em programação não linear para visando minimizar a diferença entre as redes original e simplificada.
Diba et al. (1995)	Q = vazão; Armazenamento em cada reservatório.	$\min \left[\mu \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D (D_t^d - Q_t^d) - vP + x \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F (F_t^f - Q_t^f) + \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R (O_t^r) + \omega \sum_{t=1}^T \sum_{r=1}^R \psi_t^r T_t^r - S_t^r \right]$ onde:	Um modelo de planejamento de um sistema de distribuição de água foi desenvolvido usando um algoritmo gráfico. O problema foi multiobjetivo e linear.

Tabela apresenta modelos típicos em ordem cronológica.

Tabela 2.1 - Modelos de Otimização de Redes de Distribuição em Estado Permanente – (continuação)

Autor	Variáveis	Função Objetivo	Comentários
Ormsbee e Reddy (1995)	Q_{it} = vazão; H_{it} = carga; X_{it} = duração de bombeamento.	$\min Z = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \frac{0,746\gamma Q_{it} H_{it}}{550e_{it}} X_{it} r_i$ <p>onde: Z = custo total de energia; T = número de intervalos de tempo; I = número de bombas; γ = peso específico do fluido; e_{it} = rendimento.</p>	Um método heurístico foi desenvolvido para obter políticas de operação de bombas de mínimo custo em sistemas de várias fontes e reservatórios. O algoritmo providenciou várias soluções viáveis.
Pezeshk e Helweg (1996)	Q_i = vazão bombeada	$\min \sum_{i=1}^I \frac{\gamma(TDH_i)Q_i}{e_i}$ <p>onde: γ = peso específico da água; TDH_i = carga dinâmica total; e_i = rendimento; e I = número total de bombas.</p>	Propuseram um método chamado de algoritmo de pesquisa adaptativo. O modelo trabalhou com otimização discreta que seleciona quais bombas devem ser acionadas ou desligadas usando uma combinação de coeficientes. Foi usado o KYPIPE como modelo de simulação. O algoritmo mostrou-se eficiente e rápido.
Guercio e Xu (1997)	\mathbf{D} = vetor dos diâmetros; \mathbf{H} = vetor das cargas; \mathbf{L} = vetor dos comprimentos.	$\min \text{custo} = f(\mathbf{D}, \mathbf{H}, \mathbf{L})$	Uma nova técnica foi desenvolvida baseada em programação linear. A função objetivo e as restrições foram expressas pela expansão de 1ª ordem da série de Taylor. O procedimento de otimização foi feito em duas etapas. O modelo destinou-se a avaliar projetos de confiabilidade em redes.
Sherali et al. (1998)	x_{ijk} = comprimento	$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k=1}^K c_k x_{ijk} + \sum_{i \in S} c_{si} H_{si}$ <p>onde c_k = custo unitário de comprimento; c_{si} = custo unitário de carga; H_{si} = carga adicional.</p>	Um esquema de otimização foi proposto para redes hidráulicas visando satisfazer demandas especificadas e cargas estabelecidas.
Kleiner et al. (1998)	T_{ij} = tempo de reabilitação	$\min \sum_{i=1, j \in R}^P CAP(T_{ij}) + C_M(T_{ij}) + C_{inf}(T_{ij}^{**}) e^{-rT_{ij}}$ <p>onde: $CAP(T_{ij})$ = custo de implementação do tubo i; $C_M(T_{ij})$ = custo de manutenção associado ao tubo i; $C_{inf}(T_{ij}^{**})$ = custo total (capital + manutenção).</p>	O modelo propôs analisar simultaneamente a capacidade econômica e hidráulica de uma rede. O objetivo foi identificar uma estratégia de reabilitação ótima. A função objetivo contém os custos com reabilitação e reparo em todos os tubos da rede.

Tabela apresenta modelos típicos em ordem cronológica.

3 – MODELO HIDRÁULICO

3.1 – Introdução

Um modelo matemático representa uma descrição matemática das características de um sistema. O primeiro passo na análise de um sistema dinâmico é obter o seu modelo. Na descrição da maioria dos sistemas dinâmicos, sejam mecânicos, elétricos ou hidráulicos, utilizam-se, normalmente, equações diferenciais. A resolução dessas equações diferenciais permite que se tenha uma dada resposta do sistema. Nem sempre é possível resolver diretamente as equações diferenciais para a obtenção da resposta, é prática comum lançar mão de um modelo numérico para fins de análise.

Este capítulo apresenta o modelo hidráulico adotado para a análise do transitório hidráulico. As equações parciais diferenciais não lineares são transformadas em equações diferenciais ordinárias de modo a facilitar a compreensão do transitório e da sua aplicação.

3.2 – Escoamento Transiente em Tubulações

Qualquer sistema que contenha elementos em movimento está sujeito a algum tipo de transitório, quer seja pela paralisação eventual desses elementos, quer pela necessidade de alteração da movimentação. O transitório hidráulico é definido como a situação de fluxo não permanente quando o fluxo varia de um estado permanente para outra situação de estado permanente. Uma alteração do fluxo permanente em um sistema de tubulações ocorre devido a uma mudança nas condições de contorno. Existem muitos tipos de condições de contorno que podem provocar transientes. Os tipos mais comuns de transientes em redes, que freqüentemente requerem análise, são:

- mudanças no ajuste de válvulas, acidental ou planejada;
- partida ou parada de bombas;
- variação nas demandas ou consumos;
- alteração do nível d'água de um reservatório.

O fenômeno transiente em tubulações, atualmente, é considerado de grande importância. As equações que governam o movimento são equações diferenciais parciais e que necessitam de um método numérico para resolvê-las. O comportamento dos elementos hidráulicos é complexo e os sistemas de tubos estão sujeitos a uma grande variedade de condições de operações e restrições.

Embora as redes de distribuição de água existam há centenas de anos, os transientes não têm sido detalhadamente considerados nos projetos. As redes hidráulicas eram alimentadas por gravidade por meio de grandes reservatórios ou caixas-d'água e as condições quase-permanentes prevaleciam. Além disso, os diâmetros dos tubos e os comprimentos das linhas eram pequenos, assim como as baixas pressões existentes. O problema mais importante era prever uma distribuição equilibrada do fluxo sob determinadas condições de demanda. Devido a isso, pouca atenção foi dada às considerações transientes.

Modernos sistemas de distribuição de água, pelo contrário, são alimentados por numerosas estações de bombeamento descarregando diretamente no sistema. Distúrbios no fluxo são comuns. Parada e partida de bombas, manobras de válvulas, e a influência de eventos acidentais podem gerar ondas de alta pressão. Essas ondas de pressão conduzem informações para todo o sistema hidráulico. Quando as condições de fluxo mudam lentamente, as variações nas pressões são pequenas e se há uma mudança rápida nas condições de fluxo, entretanto, grandes pressões são geradas com magnitudes suficientes para causar sérios danos nos tubos e equipamentos hidráulicos. A complexidade do fenômeno transiente tem induzido, às vezes, a adoção de procedimentos simplificados, tais como: (1) componentes complexos e outras complicações no próprio sistema físico podem ser ignorados; ou (2) o intervalo de operação e as condições de carregamento na qual o sistema está sujeito são substancialmente reduzidos. Até um pequeno ou secundário evento pode produzir uma resposta previsível de pressões máximas e mínimas. A análise transiente não é um remédio milagroso para todos os problemas hidráulicos e falhas no sistema de tubos. Algumas falhas nos tubos podem estar relacionadas com a ocorrência de terremotos, corrosão, etc. Sejam em projetos ou pesquisas, as condições transientes não devem ser excluídas e uma boa análise implica em investigar o fenômeno transiente sob uma larga variedade de condições de fluxo, operações e combinações de mecanismos e componentes do sistema. Os benefícios de tal análise incluem uma melhora no modelo, uma operação mais econômica e possivelmente um custo mais baixo.

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 levam em consideração estes efeitos. Os modelos rígidos são

empregados usualmente para descrever os fenômenos de oscilação de massa, e os elásticos na análise do golpe de aríete. Como as condições transientes ocorrem devido à ação de válvulas, bombas e outros dispositivos hidráulicos, um ajuste qualquer de um fluxo local provoca um distúrbio do regime permanente. Sendo a água ligeiramente compressível, um pequeno desequilíbrio de fluxo pode produzir grandes variações de pressões e permitir que uma quantidade considerável de energia seja armazenada. O emprego do modelo da coluna rígida justifica-se quando as mudanças no fluxo são graduais, tal que os desequilíbrios de energia e massa nas tubulações sejam pequenos. No entanto, rápidas mudanças, causadas por operações planejadas ou acidentais, podem criar grandes pulsos de pressão capazes de romper ou prejudicar as linhas de tubulações. Neste caso, o modelo elástico é mais apropriado.

O fluxo transiente em um conduto forçado é governado por equações diferenciais parciais 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, Q é a vazão volumétrica, A é a área da seção transversal do tubo, a é a celeridade da onda de pressão, D é o diâmetro interno da tubulação, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, g é a aceleração da gravidade, x é a distância e t o tempo.

A equação (3.1) representa a conservação da massa, enquanto a equação (3.2) representa a conservação de "momentum". Em geral não há uma solução analítica simples para esse conjunto de equações. Utiliza-se, portanto, o recurso de métodos numéricos. Antes da aplicação do método numérico, essas equações devem ser transformadas em equações diferenciais ordinárias para serem resolvidas. Neste capítulo utiliza-se o modelo da coluna elástica através do método das características como ferramenta de modelagem do fenômeno transiente.

3.3 – Modelo da Coluna Elástica

Esta seção apresenta o modelo elástico para um sistema de distribuição de água. As equações diferenciais parciais não-lineares (3.1) e (3.2) são discretizadas e linearizadas.

3.3.1 – Equações Fundamentais do Método das Características

O transitório hidráulico pode ser expresso matematicamente pelas equações (3.1) e (3.2). Essas duas equações diferenciais permitem calcular os valores da vazão Q e da carga piezométrica H ao longo da tubulação x e do tempo t . Há muitas referências (CHAUDHRY, 1987; e WYLIE e STREETER, 1978) que fornecem as deduções dessas equações e ilustram o uso delas em simulações com fluxo de redes hidráulicas. Estas deduções podem ser vistas no ANEXO A.

Para resolver o sistema de equações diferenciais torna-se necessário um método numérico e as condições de contorno do sistema necessitam ser especificadas. Na literatura há vários métodos numéricos, tais como: método das características; método das diferenças finitas; método dos elementos finitos; método espectral; método de contorno integral; método de volumes finitos. Sabe-se que estes métodos são aproximados, mas com uma boa escolha dos intervalos de discretização e uma definição explícita e coerente das condições de contorno do problema, as soluções são bastante razoáveis. Dentre os métodos, há a preferência ao método das características pelo fato do fenômeno transitório seguir uma lei de propagação de ondas que associa o tempo t com a abcissa x definida ao longo da canalização através da celeridade a . A principal vantagem do método das características é apresentar a possibilidade de obter equações explícitas para a determinação das cargas e vazões. O método é muito eficiente quando se aplicam valores convenientes para a celeridade da onda ($V \ll a$, onde V é velocidade média de escoamento).

As equações (3.1) e (3.2) podem ser reescritas como:

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

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

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), então as derivadas totais podem ser escritas como:

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

e

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

Definindo o multiplicador λ como:

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

e utilizando as equações (3.8), (3.9) e (3.10), as equações características tornam-se:

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

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

Note que a equação (3.11) é válida para $(dx/dt) = a$, e que a equação (3.12) é válida para $(dx/dt) = -a$. Em outras palavras, 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. Por exemplo, um distúrbio no ponto A (figura 3.1) em t_0 alcançaria o ponto P depois de um intervalo de tempo Δt .

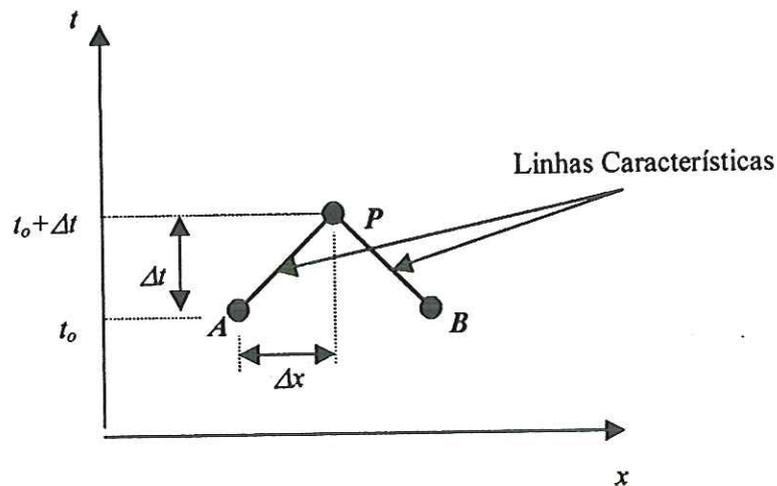


FIGURA 3.1 – Linhas Características no plano $x-t$.

Antes da apresentação do procedimento de solução das equações (3.11) e (3.12), será discutido o significado físico das linhas características. Para facilitar a discussão, considere uma tubulação simples mostrada na figura 3.2.

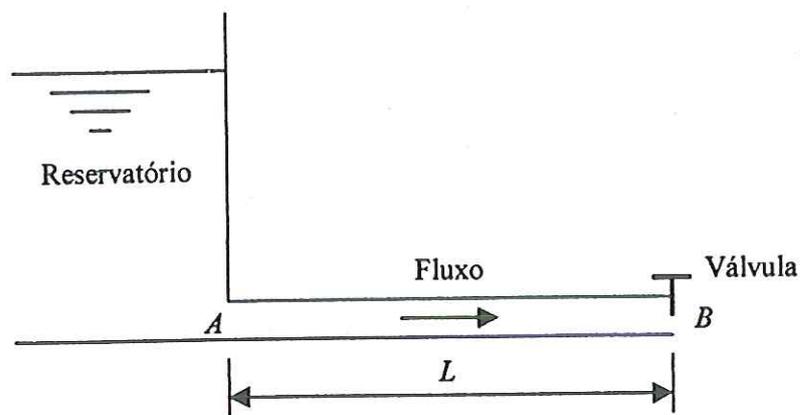


FIGURA 3.2 – Tubulação simples.

As equações (3.11) e (3.12) são válidas ao longo do comprimento do tubo ($0 < x < L$) e é necessário estabelecer condições de contorno nas extremidades (para $x=0$ e $x=L$) (figura 3.3).

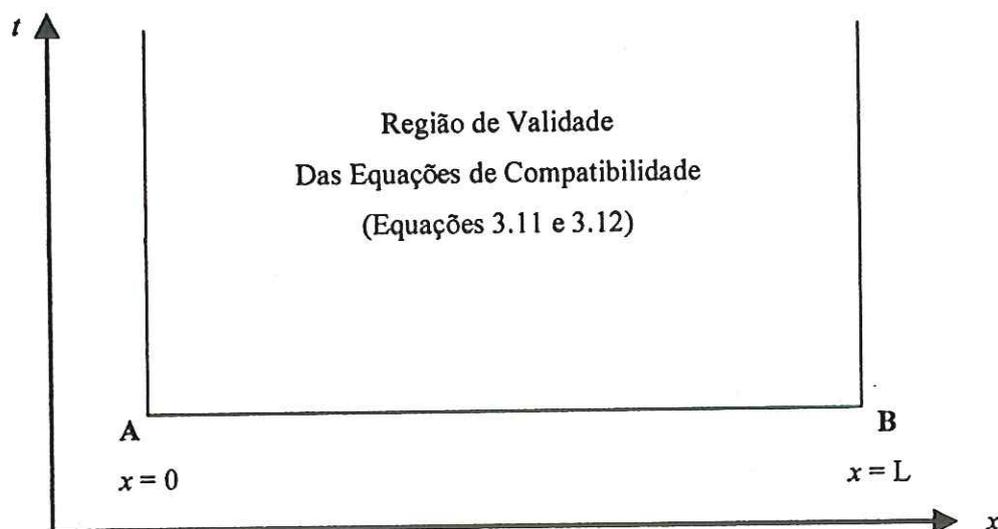


FIGURA 3.3 – Região de validade para uma tubulação simples.

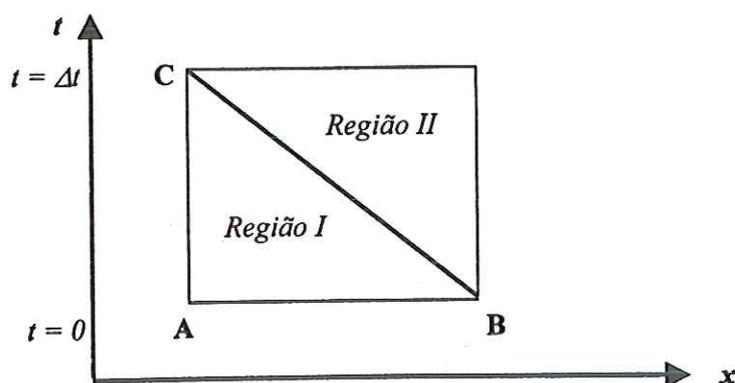


FIGURA 3.4 – Excitação no nó de jusante.

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 que há um fluxo inicial ($t = 0$) permanente na tubulação quando a válvula é instantaneamente fechada. Isso reduz o fluxo através da válvula a zero e

resulta em uma elevação da pressão na válvula. Devido a esta elevação de pressão, uma onda de pressão se propaga para montante. Se o caminho desta onda é plotado no plano $x-t$, ele será representado pela linha BC como mostrado na figura 3.4. 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.

Portanto, a linha característica BC separa os dois tipos de soluções. Se excitações são impostas simultaneamente nos pontos A e B , então a região influenciada pelas condições iniciais é conforme mostrado na figura 3.5.

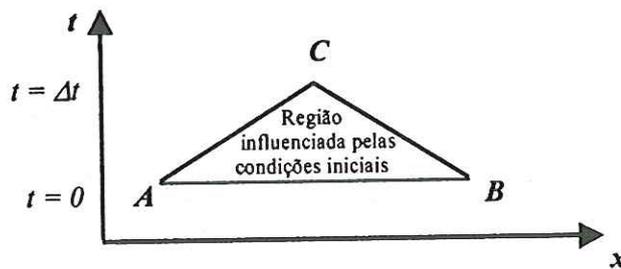


FIGURA 3.5 – Excitação nos nós a montante e jusante.

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.

A resolução numérica das equações (3.11) e (3.12) é obtida discretizando-se o domínio e o tempo em intervalos Δx e Δt , respectivamente. Assim, têm-se os valores discretos de x , que indicam as seções consideradas: $x_0 = 0, x_1 = 1\Delta x, x_2 = 2\Delta x, \dots, x_N = N\Delta x$. Para o tempo t , tem-se: $t_0 = 0, t_1 = 1\Delta t, t_2 = 2\Delta t, \dots, t_M = M\Delta t$. Necessariamente, por imposição do método das características, tem-se que $\Delta x = a\Delta t$. A figura 3.6 ilustra a discretização de x e t .

Os pontos M, J e P correspondem, respectivamente, aos pontos de coordenadas $(x_{i-1}, t_j), (x_{i+1}, t_j), (x_i, t_{j+1})$. A Eq. (3.11) é usada para relacionar os valores de H_P e Q_P com o par de valores H_M e Q_M e a Eq. (3.12) para relacionar H_P e Q_P com H_J e Q_J .

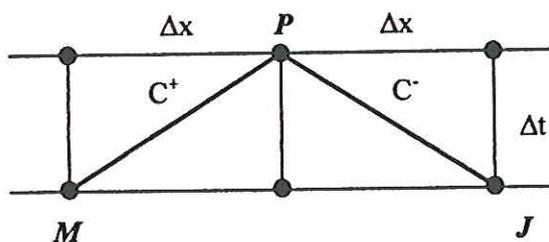


FIGURA 3.6 – Definição da malha de discretização do método das características.

Rearranjando as equações (3.11) e (3.12), as equações características tornam-se:

$$C^+ : dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = a \quad (3.13)$$

$$C^- : -dH + BdQ + RQ|Q|dt = 0, \quad \text{para } \frac{dx}{dt} = -a \quad (3.14)$$

onde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad (3.15)$$

$$R = \frac{fa}{2gDA^3} \quad (3.16)$$

Integrando as equações (3.13) e (3.14) ao longo de MP e JP respectivamente (figura 3.6):

$$C^+ : \int_M^P dH + B \int_M^P dQ + R \int_M^P Q|Q|dt = 0 \quad (3.17)$$

$$C^- : -\int_J^P dH + B \int_J^P dQ + R \int_J^P Q|Q|dt = 0 \quad (3.18)$$

Os dois primeiros termos das equações (3.17) e (3.18) podem ser facilmente avaliados, entretanto o terceiro termo destas, representando perdas por atrito, apresenta uma

certa dificuldade, pois não se conhece explicitamente a variação de Q com t . Como os intervalos de tempo usados para resolver essas equações em problemas práticos são usualmente pequenos, uma técnica de primeira ordem sugerida por WYLIE e STREETER (1978) é suficientemente viável e precisa. Usando esta técnica para o termo do atrito, as equações (3.17) e (3.18) tornam-se:

$$C^+ : (H_p - H_M) + B(Q_p - Q_M) + R\Delta t Q_M |Q_M| = 0 \quad (3.19)$$

$$C^- : -(H_p - H_j) + B(Q_p - Q_j) + R\Delta t Q_j |Q_j| = 0 \quad (3.20)$$

com a aproximação do termo do atrito:

$$\int_M^P Q_M |Q_M| dt \cong Q_M |Q_M| \Delta t \quad \text{para } C^+ \quad (3.21)$$

e

$$\int_j^P Q_j |Q_j| dt \cong Q_j |Q_j| \Delta t \quad \text{para } C^- \quad (3.22)$$

Esse método é conhecido como explícito e produz usualmente resultados satisfatórios em aplicações na engenharia. Entretanto, se o termo do atrito tornar-se muito grande, a aproximação de primeira ordem pode produzir resultados instáveis. Para tais casos, um método previsor-corretor ou uma aproximação de segunda ordem deve ser usada para evitar instabilidade.

A teoria desenvolvida será válida se o fluxo transiente não flutuar muito distante do estado permanente por um longo período de tempo.

- **Cálculo da Celeridade**

HALLIWELL apud CHAUDHRY (1987) apresenta uma expressão geral para o cálculo da velocidade da onda:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (3.23)$$

onde: ψ é um parâmetro adimensional que depende das propriedades elásticas do conduto; E = módulo de elasticidade de Young da parede do conduto; K e ρ são o módulo de elasticidade e a massa específica do fluido, respectivamente. Existem várias expressões que calculam o parâmetro ψ para diferentes condições dos condutos. Neste trabalho, os condutos serão considerados como elásticos de paredes finas. A expressão é a seguinte:

$$\psi = \frac{D}{e'}(1 - 0,5\nu') \quad (3.24)$$

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

3.3.2 – Condições de Contorno

O método das características providencia um meio sistemático de cálculo das condições transientes em uma tubulação. Cada trecho é dividido em $N-1$ segmentos de comprimento Δx com N seções. No início de cada trecho (primeira seção) e ao término do trecho (última seção) uma equação de contorno e uma equação característica são necessárias. Nos nós interiores ($1 < i < N$), ambas as equações características são empregadas. Aplicando este esquema de discretização, obtêm-se equações para as diversas seções de uma rede hidráulica.

- Seção Interna

Considere uma seção genérica s interna a um trecho i da tubulação. A figura (3.7) apresenta as linhas características positiva e negativa no plano $x-t$.

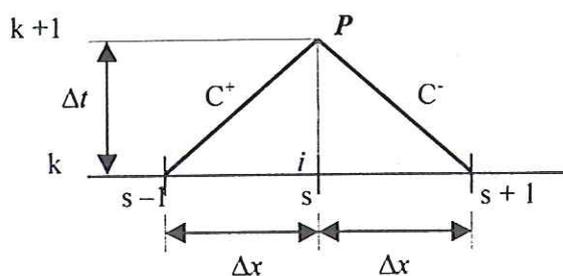


FIGURA 3.7 – Esquema de uma seção interna s de uma tubulação i .

As equações características são dadas por:

$$C^+ : [H_{i,s}(k+1) - H_{i,s-1}(k)] + B_i [Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,s-1}(k) Q_{i,s-1}(k) = 0 \quad (3.25)$$

$$C^- : -[H_{i,s}(k+1) - H_{i,s+1}(k)] + B_i [Q_{i,s}(k+1) - Q_{i,s+1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,s+1}(k) Q_{i,s+1}(k) = 0 \quad (3.26)$$

Das equações (3.25) e (3.26), vem:

$$Q_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k) - H_{i,s+1}(k)}{2B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s-1}(k)|]}{2B_i} Q_{i,s-1}(k) + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s+1}(k)|]}{2B_i} Q_{i,s+1}(k) \quad (3.27)$$

Substituindo a equação (3.27) na equação (3.25) ou na equação (3.26), resulta:

$$H_{i,s}(k+1) = \frac{H_{i,s-1}(k) + H_{i,s+1}(k)}{2} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s-1}(k)|]}{2} Q_{i,s-1}(k) - \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,s+1}(k)|]}{2} Q_{i,s+1}(k) \quad (3.28)$$

- Reservatório de Nível Constante a Montante

Considere um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica i (figura 3.8).

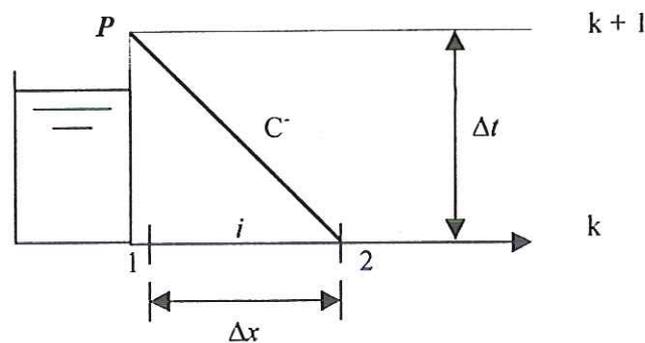


FIGURA 3.8 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a montante de uma tubulação genérica i .

A equação característica negativa é dada por:

$$C^- : -[H_{i,1}(k+1) - H_{i,2}(k)] + B_i [Q_{i,1}(k+1) - Q_{i,2}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,2}(k) Q_{i,2}(k) = 0 \quad (3.29)$$

Contorno:

$$H_{i,1}(k+1) = H_1 = \text{constante} \quad (3.30)$$

Das equações (3.29) e (3.30):

$$Q_{i,1}(k+1) = \frac{H_1}{B_i} - \frac{H_{i,2}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t Q_{i,2}(k)]}{B_i} Q_{i,2}(k) \quad (3.31)$$

- Reservatório com Nível Constante a Jusante

Considere um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica i (figura 3.9).

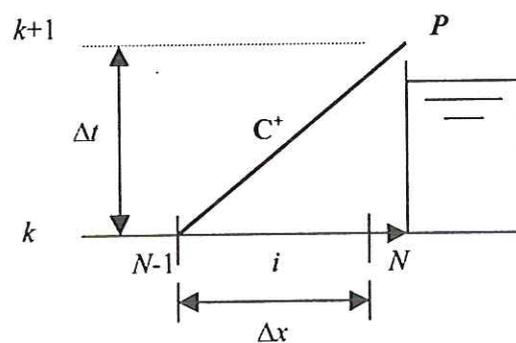


FIGURA 3.9 – Esquema de um reservatório de nível constante localizado a jusante de uma tubulação genérica i .

A equação característica positiva é dada por:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) Q_{i,N-1}(k) = 0 \quad (3.32)$$

Contorno:

$$H_{i,N}(k+1) = H_N = \text{constante} \quad (3.33)$$

Das equações (3.32) e (3.33):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_N}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (3.34)$$

- **Nó de Consumo ou Demanda**

Considere um nó de consumo genérico M com vazão de demanda igual a $Q_{EXT,M}$ e duas tubulações i e j 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 3.10).

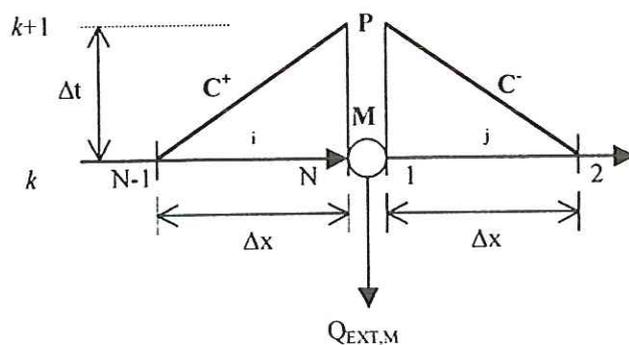


FIGURA 3.10 – Esquema de um nó de consumo genérico M.

As equações características são dadas por:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) Q_{i,N-1}(k) = 0 \quad (3.35)$$

$$C^- : -[H_{j,1}(k+1) - H_{j,2}(k)] + B_j [Q_{j,1}(k+1) - Q_{j,2}(k)] + R_j \Delta t Q_{j,2}(k) Q_{j,2}(k) = 0 \quad (3.36)$$

Contorno:

$$\sum_{i \in N_1} Q_{i,N}(k+1) - \sum_{j \in N_2} Q_{j,1}(k+1) - Q_{EXT,M} = 0 \quad (3.37)$$

$$H_{i,N}(k+1) = H_{j,1}(k+1) = H_m(k+1) \quad (3.38)$$

Das equações (3.35) e (3.36):

$$Q_{i,N}(k+1) = -\frac{H_{i,N}(k+1)}{B_i} + \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) \quad (3.39)$$

$$Q_{j,1}(k+1) = \frac{H_{j,1}(k+1)}{B_j} + \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + \frac{[B_j - R_j \Delta t |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) \quad (3.40)$$

Substituindo as equações (3.39) e (3.40) na equação (3.37) e usando a equação (3.38):

$$H_M(k+1) = B_M \sum_{i \in N_1} \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + B_M \sum_{j \in N_2} \frac{H_{j,2}(k)}{B_j} + B_M \sum_{i \in N_1} \frac{[B_i - R_i \Delta t |Q_{i,N-1}(k)|]}{B_i} Q_{i,N-1}(k) - B_M \sum_{j \in N_2} \frac{[B_j - R_j \Delta t |Q_{j,2}(k)|]}{B_j} Q_{j,2}(k) - B_M Q_{EXT,M} \quad (3.41)$$

onde:

$$B_{vr} = \left[\sum_{i \in N_1} \frac{1}{B_i} + \sum_{j \in N_2} \frac{1}{B_j} \right]^{-1} \quad (3.42)$$

- **Válvula a Jusante**

Considere uma válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica i (figura 3.11)

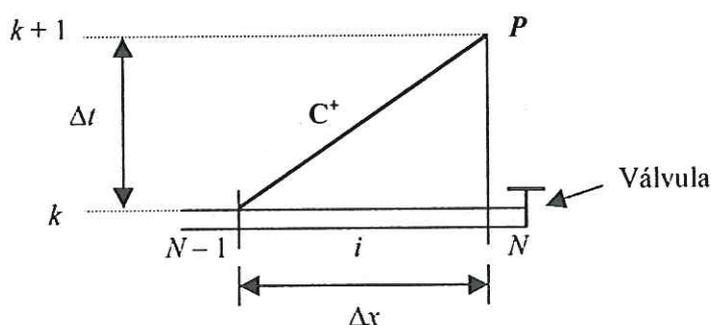


FIGURA 3.11 – Válvula localizada a jusante de uma tubulação genérica i .

A equação característica positiva é dada por:

$$C^+ : [H_{i,N}(k+1) - H_{i,N-1}(k)] + B_i [Q_{i,N}(k+1) - Q_{i,N-1}(k)] + R_i \Delta t Q_{i,N-1}(k) Q_{i,N-1}(k) = 0 \quad (3.43)$$

O fluxo permanente através da válvula pode ser escrito como:

$$Q_{o,i,N} = (C_d A_v)_o \sqrt{2gH_{o,i,N}} \quad (3.44)$$

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

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

$$Q_{i,N}(k+1) = (C_d A_v) \sqrt{2gH_{i,N}(k+1)} \quad (3.45)$$

Dividindo a equação (3.45) pela equação (3.44) e elevando ao quadrado ambos os lados, obtêm-se:

$$Q_{i,N}^2(k+1) = \frac{(Q_{o,i,N} \tau)^2}{H_{o,i,N}} H_{i,N}(k+1) \quad (3.46)$$

onde: $\tau = (C_{dA_v}) / (C_{dA_o})$ é a abertura ou fechamento relativo da válvula.

Substituindo $H_{i,N}(k+1)$ da equação (3.45) na equação (3.46), produz:

$$Q_{i,N}^2(k+1) + C_v Q_{i,N}(k+1) - C_{p_i} C_v = 0 \quad (3.47)$$

onde:

$$C_v = (\tau Q_{o,i,N})^2 B_i / H_{o,i,N} \quad (3.48)$$

$$C_{p_i} = \frac{H_{i,N-1}(k)}{B_i} + Q_{i,N-1}(k) - \frac{R_i}{B_i} \Delta t Q_{i,N-1}(k) |Q_{i,N-1}(k)| \quad (3.49)$$

Resolvendo a equação (3.47) para $Q_{i,N-1}(k+1)$ e desprezando o termo negativo em uma das raízes, vem:

$$Q_{i,N}(k+1) = 0.5 \left(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{p_i} C_v} \right) \quad (3.50)$$

$H_{i,N}(k+1)$ pode ser calculado, agora, por meio da equação (3.43).

Para o cálculo das condições transientes provocadas por abertura ou fechamento de uma válvula, uma relação entre τ e t deve ser especificada. Geralmente esta relação apresenta-se sob forma gráfica. A figura 3.12 ilustra exemplo de abertura e fechamento de uma válvula. Notar que $\tau = 1$ corresponde a uma abertura na qual o escoamento é permanente.

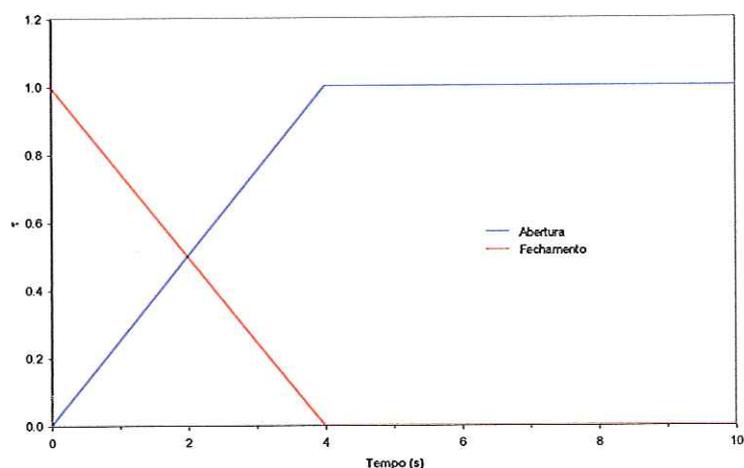


FIGURA 3.12 – Exemplo de abertura e fechamento de uma válvula.

3.4 – Considerações Finais

O Método das Características é um método de resolução das equações hiperbólicas que governam o escoamento transiente. O método conduz a uma análise abrangente dos mecanismos de operação de transientes e mostra que o cálculo do transitório hidráulico em uma rede é facilmente realizado por meio de equações explícitas, que fornecem diretamente os valores das cargas nos nós e vazões nas tubulações da rede em cada passo de tempo em função dos respectivos valores no passo de tempo anterior.

No equacionamento do modelo hidráulico apresentado visando à calibração da rede, foram apresentadas várias condições de contorno em uma rede hidráulica. Este trabalho não contempla os transientes provocados por operações de bombas e de reservatórios de nível variável, porém as respectivas condições de contorno podem ser equacionadas sem causar grandes dificuldades na modelagem.

4 – ALGORITMO GENÉTICO

4.1 – Histórico da Teoria Evolutiva

No decorrer da história, os homens têm construído uma vasta rede de conhecimento que os habilita a prever, com certo grau de variação, o clima, o movimento dos planetas, os eclipses solar e lunar, as fontes das doenças, a subida e descida dos indicadores econômicos, os estágios de desenvolvimento da linguagem das crianças, e um vasto panorama de outros fenômenos naturais, sociais e culturais. Mais recentemente, a ciência compreendeu alguns limites de sua capacidade em prever estes fenômenos, devido sobretudo à alta complexidade dos mesmos. A interação com a natureza tem permitido um aprendizado mais adequado: existe um grau de controle para entender determinado fenômeno, ou melhor, há fenômenos que são guiados pela aleatoriedade.

O advento dos computadores foi, provavelmente, a maior e melhor ferramenta na história da ciência e tecnologia. Essa revolução tecnológica permitiu aumentar a capacidade de previsão dos fenômenos naturais e também impulsionou o surgimento de um novo fenômeno: a inteligência artificial.

Os cientistas mais modernos da área de computação como Alan Turing, John von Neumann, Norbert Wiener foram motivados por visões de programas de computador com inteligência e com capacidade adaptativa de aprender e controlar o seu meio-ambiente. Esses pesquisadores da ciência computacional estavam interessados tanto em biologia e psicologia quanto em eletrônica. Não deverá ser uma surpresa que os computadores de hoje possam não somente calcular, por exemplo, a trajetória de um míssil, mas também que possam modelar o cérebro humano e simular a evolução biológica. Estas atividades estão se desenvolvendo em três frentes: no campo das redes neurais, no aprendizado das máquinas e no campo do cálculo evolucionário, dos quais os algoritmos genéticos são os exemplos mais evidentes.

Nas décadas de 1950 e 1960 vários cientistas estudaram sistemas evolucionários com a idéia de que os mecanismos da evolução natural das espécies poderiam servir de base para uma nova ferramenta de otimização nos problemas de engenharia. A idéia era fazer evoluir uma população de possíveis soluções usando operadores inspirados na genética e na seleção natural.

Na década de 1960, foram introduzidas as *estratégias de evolução* em um método para otimizar aerofólios de aeronaves. O campo das estratégias de evolução permanece em atividade independentemente do campo dos algoritmos genéticos. Posteriormente, desenvolveu-se as primeiras técnicas da *programação evolutiva*: uma técnica em que as possíveis soluções de um problema eram modificadas por mutação aleatória (MITCHELL, 1996). Juntos, as estratégias de evolução, a programação evolutiva, e os algoritmos genéticos formam o campo da computação evolutiva.

Os algoritmos genéticos foram introduzidos por John Holland (HOLLAND, 1975) e popularizados por um de seus alunos, David Goldberg (GOLDBERG, 1989). Estes algoritmos seguem o princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto, declarado em 1859 pelo naturalista e fisiologista inglês Charles Darwin, "Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes". Em contraste com as estratégias de evolução e a programação evolutiva, o objetivo original de Holland não foi o de projetar algoritmos visando resolver problemas específicos, mas estudar os fenômenos de adaptação como ocorrem na natureza. Holland apresentou o algoritmo genético como uma abstração da evolução biológica e forneceu as bases teóricas para a sua aplicação.

O algoritmo genético de Holland é um método de evolução a partir de uma população inicial de *cromossomos* (isto é, *strings* de uns e zeros, também chamados de *bits*) gerando uma nova população, imitando os mecanismos seleção naturais e operadores genéticos de cruzamento e mutação. Cada cromossomo consiste de *genes*, cada gene assumindo o valor 0 ou 1. O operador seleção escolhe aqueles cromossomos em uma população que irão se reproduzir. Os cromossomos mais aptos irão produzir mais filhos do que os menos aptos. O cruzamento troca partes de dois cromossomos de maneira análoga ao que ocorre nos organismos biológicos.

A idéia de Holland de trabalhar com uma população inicial para gerar outras populações usando o cruzamento e a mutação é a principal inovação com relação às estratégias de evolução. Holland foi o primeiro a tentar introduzir a evolução computacional com uma base teórica sólida. Antes da idéia de Holland, a noção de *esquemas* era base de quase todo o desenvolvimento teórico dos algoritmos genéticos.

Nos últimos anos tem havido uma interação entre os vários métodos computacionais usando a teoria evolutiva. Atualmente, os pesquisadores usam o termo algoritmo genético para descrever algo mais do que a idéia original de Holland.

4.2 – Terminologia Biológica

Na biologia, a teoria da evolução diz que o meio ambiente seleciona, em cada geração, os seres vivos mais aptos de uma população para sobrevivência. Como resultado, somente os mais aptos conseguem se reproduzir, uma vez que os menos adaptados geralmente são eliminados antes de gerarem descendentes. Durante a reprodução, ocorrem fenômenos como mutação e cruzamento, entre outros, que atuam sobre o material genético armazenado nos cromossomos. Estes fenômenos conduzem à variabilidade dos seres vivos na população. Sobre esta população diversificada age a seleção natural, permitindo a sobrevivência apenas dos seres mais adaptados.

Um algoritmo genético é a metáfora desses fenômenos, o que explica porque AG's possuem muitos termos originados da biologia. A lista apresentada a seguir descreve os principais termos encontrados na literatura.

- Cromossomo e Genoma: na biologia, genoma é o conjunto completo de genes de um organismo. Um genoma pode ter vários cromossomos. Nos AG's, os dois representam a estrutura de dados que codifica uma solução para um problema, ou seja, um cromossomo ou genoma representa um simples ponto no espaço de busca.
- Gene: na biologia, é a unidade de hereditariedade que é transmitida pelo cromossomo e que controla as características do organismo. Nos AG's, é um parâmetro codificado que representa uma variável de decisão no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o cromossomo.
- Indivíduo: um simples membro da população. Nos AG's, um indivíduo é uma possível solução para o problema.
- Genótipo: na biologia, representa a composição genética contida no genoma. Nos AG's, representa a informação contida no cromossomo ou genoma.
- Fenótipo: nos AG's, representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo. 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, representa uma das formas alternativas de um gene. Nos AG's, representa os valores que o gene pode assumir. Por exemplo, um gene que representa o parâmetro cor de um objeto poderia ter o alelo azul, preto, verde, etc.

- Epistasia: interação entre genes do cromossomo, isto é, quando um valor de gene influencia o valor de outro gene. Problemas com alta Epistasia são de difícil solução por AG's.

4.3 – Estrutura dos Algoritmos Genéticos

Otimização é a busca da melhor solução para um dado problema. Consiste em tentar várias soluções e utilizar a informação obtida neste processo de forma a encontrar soluções cada vez melhores. As técnicas de otimização por busca, geralmente, apresentam:

- Um espaço de busca, onde estão todas as possíveis soluções do problema;
- Uma função objetivo (algumas vezes chamada de função de aptidão na literatura de AG's), que é utilizada para avaliar as soluções produzidas, associando a cada uma delas um valor.

Em termos matemáticos, a otimização consiste em achar a solução que corresponda ao ponto de máximo ou mínimo da função objetivo.

As técnicas de otimização convencional por busca (por exemplo, os métodos do gradiente) apresentam dificuldades em localizar o ponto de máximo global de uma função com múltiplos pontos de máximo.

O primeiro passo de um AG típico é a geração de uma “população inicial de cromossomos” que é formada por um conjunto aleatório de cromossomos que representam possíveis soluções do problema a ser resolvido. Durante o “processo evolutivo”, esta população é avaliada e cada cromossomo recebe uma nota (denominada de “aptidão” no jargão da literatura de AG's), refletindo a qualidade da solução que ele representa. Em geral, os cromossomos mais aptos são selecionados e os menos aptos são descartados (Darwinismo). Os “membros” selecionados podem sofrer modificações em suas características fundamentais através dos “operadores” de *crossover* (cruzamento ou recombinação) e “mutação”, gerando descendentes para a próxima geração. Este processo é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada. A tabela 4.1 ilustra este procedimento através de um algoritmo.

TABELA 4.1 – Algoritmo Genético típico

 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

Um AG processa populações de “cromossomos”. Um cromossomo é uma estrutura de dados, geralmente vetor ou cadeia de bits (cadeia de bits é a estrutura mais tradicional, porém nem sempre é a melhor), 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 é um espaço com n dimensões. Para funções objetivos com múltiplas variáveis de decisão, tais variáveis são representadas na mesma cadeia de bit, com cada uma ocupando uma parte da cadeia. A cada cromossomo s_i é atribuída uma aptidão f_i . Aptidão é um valor que avalia quão boa é a solução codificada em s_i .

Um Algoritmo Genético começa com uma “população inicial” de N cromossomos, geralmente gerada aleatoriamente. Após a geração da população inicial, o AG aplica os operadores de cruzamento e mutação aos melhores cromossomos da população inicial para gerar cromossomos filhos. Os melhores cromossomos são escolhidos por meio de um processo de seleção. Os operadores de cruzamento e mutação são os principais mecanismos dos AG’s para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca.

A estrutura do AG (com todos os seus operadores) aqui adotado foi definida com base em testes realizados durante todo o processo de revisão bibliográfica. O ANEXO B apresenta os passos que permitiram chegar a versão final.

4.3.1 - Seleção

A seleção é um processo através do qual os cromossomos são escolhidos de acordo com os valores da função objetivo. A função objetivo representa uma medida de benefício, utilidade ou vantagem que se deseja maximizar. Os cromossomos com um alto valor desses benefícios têm maior probabilidade de contribuir com um ou mais descendentes na próxima geração. Este operador, logicamente, é uma versão artificial da seleção natural de Darwin. Em populações naturais, a aptidão é determinada pela habilidade do ser vivo sobreviver aos predadores, às doenças e a outros obstáculos para a idade adulta e a subsequente reprodução. Nos esquemas artificiais, a função objetivo é o árbitro final que decide se o cromossomo deve viver ou morrer.

Há diversas maneiras de proceder-se na escolha dos cromossomos mais aptos. Para o presente trabalho será adotado um procedimento de seleção proporcional à aptidão baseado na idéia do *Elitismo*. O *Elitismo* foi proposto por DEJONG (1975) e é uma estratégia que permite transferir os melhores cromossomos de uma geração para outra sem alterações. Isto ocorre devido ao corte do cruzamento ou à ocorrência de mutação.

O procedimento de seleção com elitismo adotado aqui é o seguinte:

1. Seja a população de NC indivíduos (a_1, a_2, \dots, a_{NC});
2. A aptidão, $F_{obj}(a_j)$, de cada indivíduo é calculada conforme o valor da função objetivo;
3. Faz-se o ordenamento decrescente da aptidão (para problema de maximização);
4. Selecionam-se os melhores indivíduos deste ordenamento de maneira a formar uma população de $p_e \times NC$ indivíduos, onde p_e está sendo definido como taxa de elitismo;
5. Forma-se o restante da população com uma escolha aleatória de indivíduos (dentre os melhores) que irão compor a população de pais.
6. Finalmente vem a sucessão. A população de indivíduos para a próxima geração é formada de 50% dos cromossomos dos pais e 50% dos cromossomos dos filhos, dentre aqueles de melhor aptidão. Estabelece-se, então, uma probabilidade de sucessão: $p_s = 0,5$.

Este procedimento visa melhorar o desempenho do AG.

4.3.2 – Representação dos Parâmetros

Os algoritmos genéticos costumam trabalhar com codificação dos parâmetros do problema. Esta codificação tem o objetivo de adaptar os parâmetros para o devido manuseio dos operadores genéticos.

- **Representação Binária**

Se V é um conjunto de inteiros que varia no intervalo de $\{0, 1, \dots, 2^l - 1\}$ então 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:

$$V = \sum_{i=1}^l bin_i 2^{i-1} \quad (4.1)$$

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

As operações com números binários podem ser entendidas da seguinte forma

Representação de um número na base dois

Escrever um número inteiro em binário, isto é, na base dois, não apresenta problema. Cada posição digital representará uma potência de dois, da mesma forma que nos números decimais cada posição, uma potência de dez. Assim, o número 23457 significa:

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

Na base dois, a base usada nos computadores binários, o número 1 1 0 1 0 1 representa:

$$1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = (53)_{\text{decimal}}$$

Conversão Decimal - Binário

A conversão do número inteiro, na base dez para binário, será feita da direita para a esquerda, isto é, determina-se primeiro os algarismos das unidades (o que vai ser multiplicado por 2^0), em seguida o segundo algarismo da direita (o que vai ser multiplicado por 2^1), e assim por diante.

O importante é observar se o número é par ou ímpar. Em binário, o número par termina em 0 e o ímpar em 1. Assim, determina-se o algarismo da direita, pela simples divisão do número por 2; se o resto for 0 (número par) o algarismo da direita é 0; se for 1 (número ímpar) o algarismo da direita é 1. Como exemplo, o número 25 pode ser convertido para binário da seguinte forma:

$$\begin{array}{r|l}
 25 & 2 \\
 \hline
 1 & 12 \\
 & 0 \\
 & 6 \\
 & 0 \\
 & 3 \\
 & 1 \\
 & 1 \\
 & 1
 \end{array}$$

$$25 = 11001$$

Na representação binária em um algoritmo genético, o comprimento do cromossomo depende da precisão desejada. Por exemplo: o domínio da variável x_j é $[a_j, b_j]$ e a precisão desejada é de 5 casas decimais. A precisão implica que o intervalo do domínio de cada variável possa ser dividido no mínimo por $(b_j - a_j) \times 10^5$ intervalos. Dessa forma, o número de bits necessários para uma variável pode ser calculado como segue:

$$2^{m_j-1} < (b_j - a_j) \times 10^5 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (4.2)$$

onde m_j = número de bits necessários em um cromossomo. O exemplo a seguir mostra como se determina m_j .

O mapeamento do cromossomo binário para um número real na variável x_j pode ser calculado assim (GEN & CHEN, 1997):

$$x_j = a_j + \text{decimal (indivíduo } j) \times \frac{b_j - a_j}{2^{m_j} - 1} \quad (4.3)$$

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

Exemplo: Considere o seguinte problema de otimização (GEN & CHEN, 1997):

$$\begin{aligned} \max f(x_1, x_2) &= 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2) \\ &- 3.0 \leq x_1 \leq 12.1 \\ &4.1 \leq x_2 \leq 5.8 \end{aligned}$$

Supor que a precisão desejada seja de 4 casas decimais. Os bits necessários para as variáveis x_1 e x_2 são calculados da equação (4.2):

$$\begin{aligned} (12.1 - (-3.0)) \times 10^4 &= 151000 \\ 2^{17} < 151000 \leq 2^{18}, & \quad m_1 = 18 \\ (5.8 - 4.1) \times 10^4 &= 17000 \\ 2^{14} < 17000 \leq 2^{15}, & \quad m_2 = 15 \\ m = m_1 + m_2 &= 18 + 15 = 33 \end{aligned}$$

O comprimento total do cromossomo é 33. Um cromossomo qualquer da população será representado assim:

$$\overbrace{000001010100101001}^{18 \text{ bits}} \overbrace{1011110111111110}^{15 \text{ bits}}$$

Os valores correspondentes para as variáveis x_1 e x_2 são:

	Número Binário	Número Decimal
x_1	000001010100101001	5417
x_2	1011110111111110	24318

A representação binária é historicamente importante, uma vez que foi utilizada nos trabalhos pioneiros de HOLLAND (1975). É a representação tradicional, sendo fácil de utilizar e manipular, como também é simples de analisar teoricamente. Contudo, se um problema tem parâmetros contínuos e o usuário quer trabalhar com boa precisão numérica,

ele precisará armazenar cromossomos longos na memória. Para cada ponto decimal acrescentado na precisão, é necessário adicionar 3,3 bits na cadeia. Se 8 casas decimais forem necessárias, $8 \times 3,3 \approx 27$ bits serão utilizados para cada parâmetro. Quando há muitos parâmetros, obtêm-se cadeias de bits que podem fazer o algoritmo convergir vagarosamente. Por exemplo, mutação nos primeiros bits do gene afeta mais a aptidão que mutação nos últimos bits do gene.

- **Representação Real**

Os parâmetros podem ser representados com casas decimais ou inteiros por escalonamento ou quantificação. Se $V \in \{V_{max}, V_{min}\}$, então e é a representação binária da parte inteira de:

$$\frac{(2^l - 1)V}{(V_{max} - V_{min})} \quad (4.4)$$

A representação real, ou com ponto flutuante, gera cromossomos menores e é compreendida mais naturalmente pelo ser humano do que a cadeia de bits. No exemplo anterior referente à codificação binária, o cromossomo em questão seria representado por um vetor, (-2.687969; 5.361653), de dois números com ponto flutuante conforme a eq. 4.3:

$$x_1 = -3.0 + 5147 \times \frac{12.1 - (-3.0)}{2^{18} - 1} = -2.687969$$

$$x_2 = 4.1 + 24318 \times \frac{5.8 - 4.1}{2^{15} - 1} = 5.361653$$

Outra vantagem da representação real é a facilidade de criar novos operadores.

4.3.3 - Cruzamento

O operador cruzamento permite a criação de uma nova geração. Ele é considerado o principal mecanismo de busca dos AG's para explorar regiões desconhecidas do espaço de busca. Há inúmeros tipos de cruzamento na literatura especializada, tanto para codificação binária quanto codificação real. Neste trabalho, o operador cruzamento será limitado a dois

tipos: cruzamento de um ponto (para codificação binária) e cruzamento aritmético (codificação real).

- **Cruzamento de Um Ponto**

O operador cruzamento é aplicado a cada par de cromossomos pais gerando dois cromossomos filhos com uma probabilidade p_c . Seja $a_p = (b_1, b_2, \dots, b_{NB})$ o primeiro pai e $a'_p = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{NB})$ o segundo pai. Um número inteiro J_x é gerado aleatoriamente entre 1 e $NB - 1$ (NB é o número de bits no cromossomo) e os *strings* dos pais são separados na posição J_x :

$$a_p = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (4.5)$$

$$a'_p = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{J_x} | b'_{J_x+1}, \dots, b'_{NB}) \quad (4.6)$$

Produzindo, pela troca da segunda parte, os dois filhos a_f e a'_f :

$$a_f = (b_1, b_2, \dots, b_{J_x} | b'_{J_x+1}, \dots, b'_{NB}) \quad (4.7)$$

$$a'_f = (b'_1, b'_2, \dots, b'_{J_x} | b_{J_x+1}, \dots, b_{NB}) \quad (4.8)$$

A escolha do ponto de corte não é constante em toda a população, ou seja, para cada par de pais um novo número inteiro J_x é gerado aleatoriamente. Não ocorrendo o cruzamento, os filhos serão iguais aos pais (isto permite que algumas soluções sejam preservadas). É prática comum utilizar probabilidade de cruzamento entre 60% e 100%.

- **Cruzamento Aritmético**

Os operadores convencionais de cruzamento (cruzamento de n pontos e uniforme) são resultados das adaptações dos operadores utilizados para representação binária. Estes operadores funcionam bem na representação binária, mas na representação real eles basicamente trocam valores dos genes e, portanto, não criam informações novas (i.e., novos números reais). Melhor então é usar operadores aritméticos.

Os operadores aritméticos realizam algum tipo de combinação linear entre os cromossomos pais. Dentre os vários tipos de cruzamento existentes na literatura de AG's, este trabalho adota o cruzamento aritmético. O cruzamento aritmético foi proposto por MICHALEWICZ (1994) e é uma combinação linear entre dois vetores.

Sejam p_1 e p_2 os cromossomos pais representados por:

$$p_1 = (p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}) \quad (4.9)$$

$$p_2 = (p_{21}, p_{22}, \dots, p_{2n}) \quad (4.10)$$

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

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

$$c_1 = \beta p_1 + (1 - \beta)p_2 \quad (4.11)$$

$$c_2 = (1 - \beta)p_1 + \beta p_2 \quad (4.12)$$

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

4.3.4 - Mutação

Após a operação de cruzamento, o operador de mutação é aplicado, com uma probabilidade p_m , em cada cromossomo filho gerado. A mutação consiste em fazer alterações, geralmente pequenas, nos valores de um ou mais genes num dado cromossomo. A mutação melhora a diversidade dos cromossomos na população, por outro lado, destrói informação contida no cromossomo, logo, deve ser utilizada uma probabilidade de mutação pequena, mas suficiente para assegurar a diversidade. Esta probabilidade geralmente está no intervalo $p_m \in [0,001; 0,05]$

- **Mutação Simples**

Em cromossomos binários a mutação simples inverte os valores de bits, ou seja, muda o valor de um dado bit de 1 para 0 ou de 0 para 1. A figura 4.1 apresenta um exemplo em que dois bits do primeiro filho e um bit do segundo sofrem 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> 000001111111)

FIGURA 4.1 – Mutação simples para codificação binária

- **Mutação Uniforme**

A mutação uniforme é um dos vários tipos de operadores de mutação existentes aplicados a cromossomos de representação real. A mutação uniforme é a simples substituição de um gene individual por um número aleatório. A mutação é aplicada para cada gene individual com uma probabilidade p_m . Dado um cromossomo p , com o j -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo c da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} U(a_i, b_i), & \text{se } i = j \\ p_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.13)$$

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 $[a_i, b_i]$.

4.4 – Definição da Função Objetivo

Há na literatura inúmeras formas de proceder-se ao ajuste entre os parâmetros medidos e calculados. Há funções objetivos que levam em consideração várias medidas tais como: cargas hidráulicas, vazões nos tubos, demandas e custos. Estas medidas são aglomeradas na função objetivo através da definição de pesos que servem como indicadores dos respectivos graus de influência da medida no processo de otimização.

Para o processo de calibração proposto neste estudo, utilizando-se o Método Transiente Inverso em conjunto com um Algoritmo Genético, serão necessárias medidas de cargas hidráulicas em um ou mais nós da rede hidráulica durante um certo intervalo de tempo. A idéia de trabalhar somente com cargas hidráulicas tem o objetivo de justificar a eficiência dos processos inversos ao mesmo tempo em que simplifica a construção da função objetivo.

A identificação dos parâmetros é baseada na minimização da soma dos desvios absolutos e pode ser expressa pelo erro quadrático F :

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (4.14)$$

onde: TS = duração do transitório, NL = número de locais de medida na rede, $H_{i,j}^m$ = carga hidráulica medida, $H_{i,j}^c$ = carga hidráulica calculada, $i = 1, 2, \dots, NL$ e $j = 1, 2, \dots, TS$. Dessa maneira, pode-se definir a função objetivo como o negativo do erro quadrático:

$$F_{obj} = -F \quad (4.15)$$

Portanto, durante a calibração dos diversos parâmetros da rede hidráulica, a otimização compreende maximizar a função objetivo.

4.5 – Algoritmos Genéticos e Otimização Convencional

Visando situar Algoritmos Genéticos no contexto das ferramentas de otimização em geral, considerem-se algumas das principais classes de métodos de otimização:

- Gerar-e-Testar: O algoritmo Gerar-e-Testar (também conhecido como método de busca exaustiva ou aleatória) é uma abordagem da força bruta. Emprega dois módulos: o módulo de geração, que enumera possíveis soluções sistematicamente ou aleatoriamente, e o módulo de teste, que avalia cada possível solução podendo aceitá-la ou rejeitá-la. O módulo gerador pode produzir todas as possíveis soluções antes do módulo de teste começar a agir. O mais comum é o uso intercalado destes dois módulos. O método pode encerrar sua execução quando uma solução satisfatória for encontrada, depois de encontrar um número de soluções satisfatórias ou continuar até que todas as possíveis soluções sejam achadas;
- Métodos Analíticos: Os métodos analíticos utilizam técnicas do Cálculo Diferencial para determinar os pontos extremos de uma função e apresentam várias desvantagens: não informam se o ponto encontrado é um ponto de mínimo local ou global, requerem funções com derivadas e, além disso, quando existe

grande número de parâmetros torna-se difícil encontrar, analiticamente, todos os pontos de mínimo e máximo. Isto torna estes métodos impraticáveis para otimizar diversos problemas do mundo real;

- Subida de Encosta: Os métodos de Subida de Encosta (*hill climbing*) investigam os pontos adjacentes do espaço de busca e movem-se na direção do melhor valor da função objetivo. Pode ser observado, portanto, que para funções com muitos ótimos locais, este método apresenta dificuldade em localizar qual “encosta” leva ao ótimo global. O uso de Métodos de Subida de Encosta também é complicado quando existem planícies ou platôs na superfície de busca. Contudo, estes métodos são geralmente rápidos. Um grande número de técnicas importantes de otimização segue os princípios da Subida de Encosta. Um exemplo é o método do gradiente.

Os Algoritmos Genéticos têm sido empregados em problemas complicados de otimização, em que, muitas vezes, os métodos de busca convencional falham. Algumas vantagens dos AG's são:

- Funcionam tanto com parâmetros contínuos como discretos ou uma combinação deles;
- Realizam pesquisas simultâneas em várias regiões do espaço de busca, pois trabalham com uma população e não com um único ponto;
- Utilizam informações de custo ou recompensa e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
- Otimizam um número grande de variáveis;
- Otimizam parâmetros de funções objetivos com superfícies complexas e complicadas, reduzindo a incidência de mínimos locais;
- Adaptam-se bem a computadores paralelos;
- Trabalham com uma 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 serem implementados em computadores;

- São modulares e portáteis, ou seja, o mecanismo de evolução é separado da representação particular do problema considerado. Assim, eles podem ser transferidos de um problema para outro;
- São flexíveis para trabalhar com restrições arbitrárias e otimizar múltiplas funções com objetivos conflitantes;
- São também facilmente hibridizados com outras técnicas e heurísticas.

Apesar dessas vantagens, os AG's não são eficientes para muitos problemas. São bastante lentos e não raro ainda estão avaliando a população inicial enquanto muitos métodos de Subida de Encosta já têm encontrado a solução. O principal campo de aplicação dos AG's é em problemas complexos, com múltiplas variáveis de decisão e mínimos/máximos, para os quais não é conhecido um algoritmo de otimização eficiente.

5 – FORMULAÇÃO DO PROBLEMA INVERSO E ESTRATÉGIAS DE RESOLUÇÃO

5.1 – Definição do Problema Inverso

Os vários métodos aplicados na análise de redes de distribuição de água visando não apenas à calibração, mas outras finalidades, enquadram-se sob duas formas de abordagem, o problema direto e o problema inverso. No problema direto, por exemplo, as demandas e as demais características físicas da rede são conhecidas e desejam-se calcular as cargas hidráulicas nos nós e as vazões nos tubos. Este é o caso clássico de projeto. No problema inverso, diferentemente do problema direto, não se dispõe das referidas informações. Há alguns dados disponíveis de carga hidráulica em poucos nós e desejam-se calcular ou estimar alguns parâmetros da rede, tais como fatores de atrito, rugosidades, diâmetros e demandas (incluem-se aí a identificação e quantificação de vazamentos). O problema inverso, portanto, trata as características da rede como variáveis.

No estudo de redes hidráulicas em regime permanente, os problemas inversos têm sido aplicados de diferentes formas, incluindo operação, calibração (ORMSBEE & WOOD – 1986a, b; BHAVE – 1988) e identificação de vazamentos (PUDAR & LIGGETT – 1992).

Em geral, a resolução dos problemas inversos é feita por meio de métodos diretos e indiretos. Os métodos inversos diretos buscam resolver diretamente o sistema de equações diferenciais considerando os parâmetros como variáveis dependentes. Por outro lado, os métodos inversos indiretos utilizam um processo iterativo em que os parâmetros variam e a simulação é repetida até conseguir-se reproduzir de forma satisfatória a resposta do sistema. Os métodos indiretos são os mais utilizados devido à simplicidade de sua formulação matemática e ao fato de serem menos sensíveis a erros nos dados de entrada.

5.1.1 – Conceitos Básicos

Em um problema do tipo inverso pode-se desejar determinar apenas os parâmetros físicos, fontes e sumidouros, condições iniciais ou de contorno, ou identificá-los simultaneamente.

Durante anos, os pesquisadores estudaram o problema inverso com as dificuldades estabelecidas por ser esse tipo de problema dito como “mal posto”. Rigorosamente, um problema matemático estaria “bem posto” se sua solução existisse e fosse única e estável com respeito a pequenas variações nos dados de entrada (PUDAR & LIGGETT, 1992). Dependendo da quantidade e qualidade dos dados, e da forma em que o problema é posto, o problema inverso pode não satisfazer algumas destas condições. É por isto que o problema inverso é tradicionalmente conhecido como sendo “mal posto”. No entanto, mesmo que existam situações nas quais o problema inverso não tenha solução, existem também muitas circunstâncias nas quais é possível modificar a formulação do problema ou impor limitações adequadas para determinar uma solução com significado físico e matematicamente bem comportada (CARRERA & NEUMAN, 1986b).

O problema inverso pode ser formulado de várias maneiras. Em caso de projeto em redes hidráulicas, conhecem-se a vazão abastecida, as demandas e pressões em alguns pontos e calculam-se as características da rede sob estes dados. Há mais de uma solução em problemas de projeto deste tipo. Sendo assim, é impossível determinar as características de uma rede hidráulica somente pela observação de variáveis de estado. Por isso, comumente observa-se solução “não única”. Pode-se resolver a “não unicidade” de solução do problema inverso acrescentando-se mais medições de determinadas variáveis (PUDAR & LIGGETT, 1992).

O problema mais comum na solução do problema inverso é o de instabilidade. A instabilidade é caracterizada pela oscilação da solução. Geralmente isto ocorre devido às variações dos dados de entrada (ex.: parâmetros físicos, variáveis de controle, condições iniciais) serem suficientemente pequenas. Pode-se considerar que mudanças leves nas condições de contorno ou nos parâmetros hidráulicos implicam em mudanças na carga hidráulica, o que torna esta solução instável.

Os problemas inversos podem ser classificados como *exatamente determinado* onde o número de parâmetros desconhecidos é igual ao número de equações, *subdeterminado* onde existem mais incógnitas do que equações ou *sobredeterminado* onde existem mais medidas de cargas e equações do que de incógnitas (PUDAR & LIGGETT, 1992)

5.1.2 – Tipos de solução para o problema inverso

Seguindo a classificação definida por NEUMAN (1973), os métodos de resolução do problema inverso podem ser divididos em diretos e indiretos. A aproximação direta tem como critério minimizar os erros gerados na resolução das equações, de uma maneira não iterativa. No método indireto, busca-se minimizar o erro residual existente entre os dados calculados e estimados de forma iterativa. O método de tentativa e erro é considerado por SUN (1994) como a forma mais antiga de resolução do problema inverso.

- **Método de Tentativa e Erro**

O método de tentativa e erro necessita apenas, segundo SUN (1994), de alguns dados observados, uma sub-rotina para resolver o problema avançado e um pesquisador experiente que esteja familiarizado com o sistema em estudo.

CLEARY (1989) salientou que nesse tipo de abordagem deve-se “adivinhar” os parâmetros iniciais mais próximos da realidade para se ganhar tempo. Pode-se ver vantagens no método de tentativa e erro, como a possibilidade de uso em qualquer tipo de problema inverso e a dispensa em se criar um programa computacional mais sofisticado. Porém, essas possíveis vantagens caem por terra quando se observa que a possibilidade de erro é muito alta, pois a precisão dos resultados obtidos varia de acordo com o especialista envolvido no problema. A figura 5.1 apresenta um fluxograma do método de tentativa e erro.

- **Solução Indireta**

Para SUN (1994) o método indireto tenta retirar a participação do homem na decisão final de escolha. O método indireto é essencialmente um procedimento de tentativa e erro que procura melhorar uma estimativa existente dos parâmetros de forma iterativa, até que a resposta do modelo esteja suficientemente próxima à do sistema real. Esta melhora pode ser realizada utilizando critérios empíricos ou procedimentos matemáticos formais. O método baseia-se na minimização da diferença entre os resultados observados e calculados, para o qual costuma-se definir uma função objetivo. O procedimento posterior seria obter uma estimativa inicial dos parâmetros, realizar uma simulação completa e comparar o resultado calculado com o resultado medido no sistema real. Se os dois resultados estiverem suficientemente próximos, de acordo com um “critério de comportamento” expresso na função objetivo, o processo é finalizado e adota-se o atual conjunto de parâmetros estimados.

Se os resultados não estiverem suficientemente próximos, utiliza-se um conjunto corrigido de parâmetros em uma nova simulação e o processo continua iterativamente. CARRERA & NEUMAN (1986a) salientam que a solução indireta conduz a melhores soluções do problema inverso, já que conseguem filtrar parte dos ruídos dos dados de carga hidráulica devido ao uso do método de mínimos quadrados (ou métodos similares), aspecto que os métodos diretos não são capazes de atender. A figura 5.2 apresenta um fluxograma do método indireto.

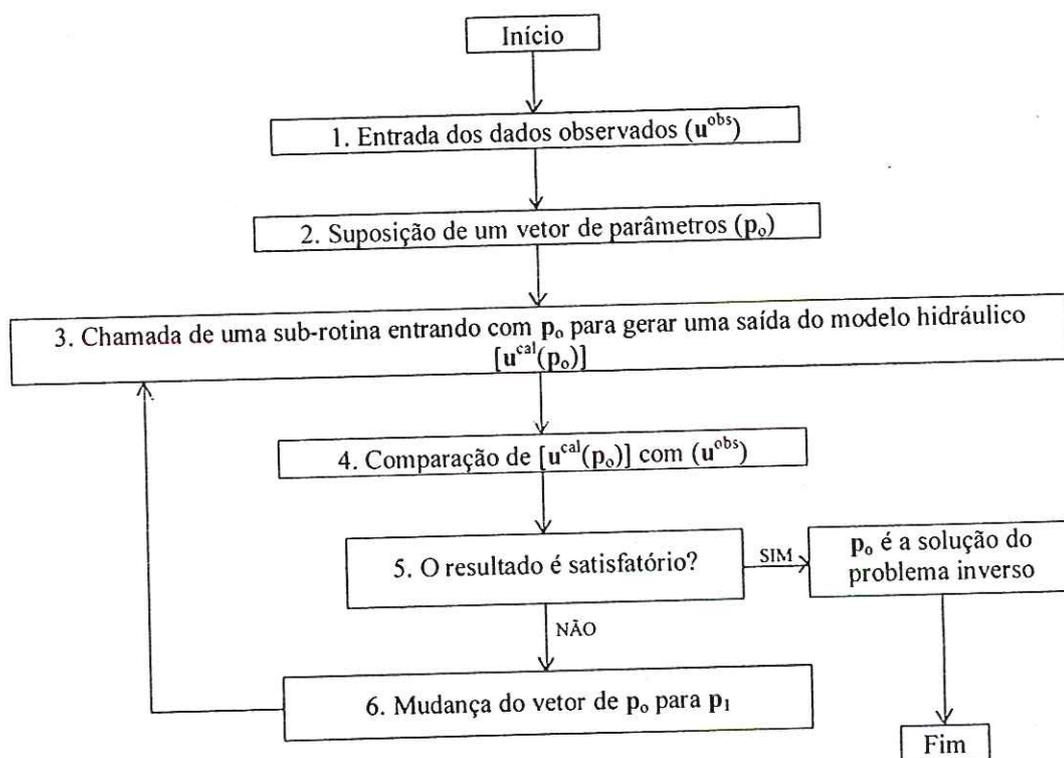


FIGURA 5.1 – Fluxograma do método de Tentativa e Erro

Fonte: SUN (1994)

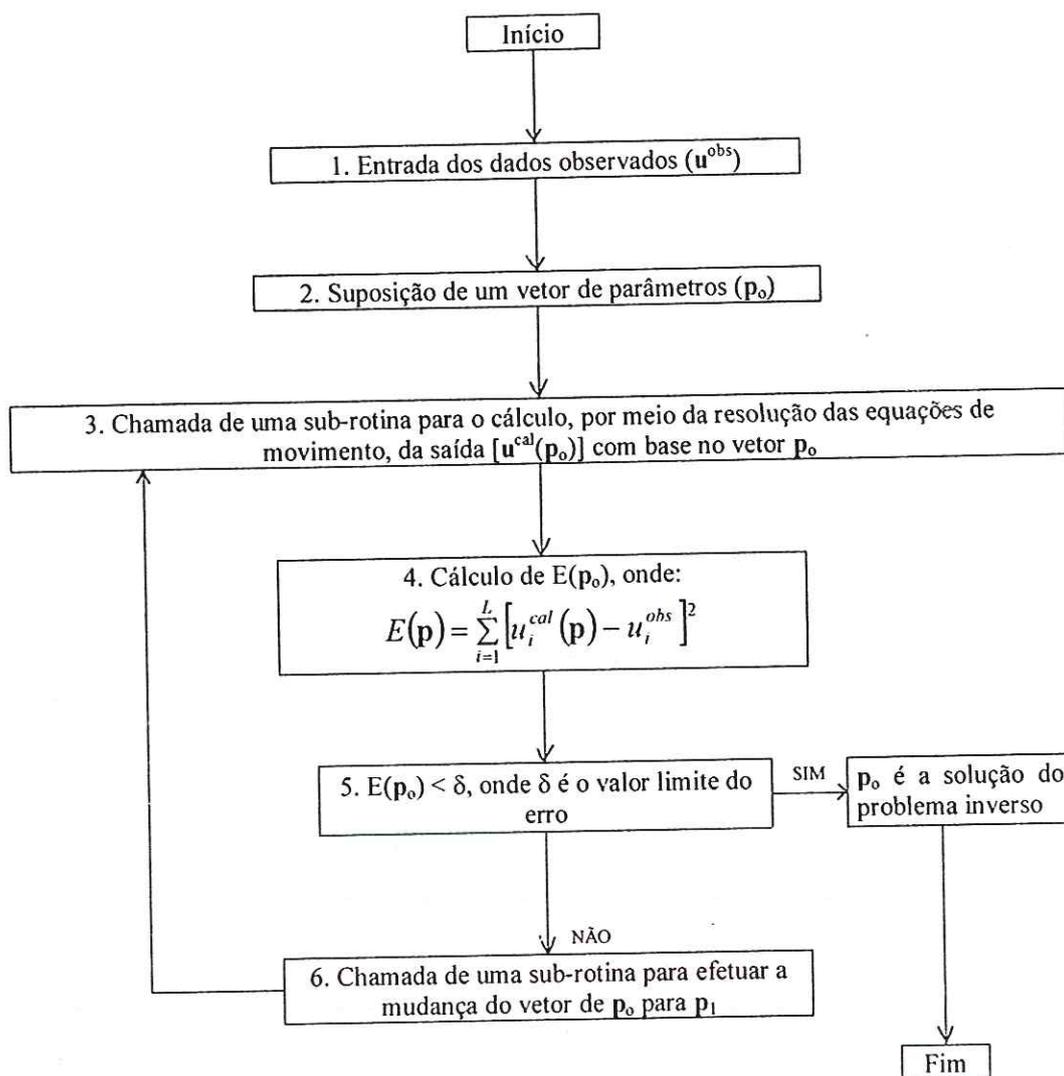


FIGURA 5.2 – Fluxograma do método indireto.

Fonte: SUN (1994)

• Solução Direta

O método direto trata os parâmetros como variáveis dependentes, em problema inverso formal com especificação de condições de contorno. O método baseia-se na minimização dos resíduos que resultam nas equações diferenciais que definem o problema discretizado, uma vez substituídos nelas os valores das observações e os valores calculados dos parâmetros. A figura 5.3 apresenta os passos desenvolvidos no método direto.

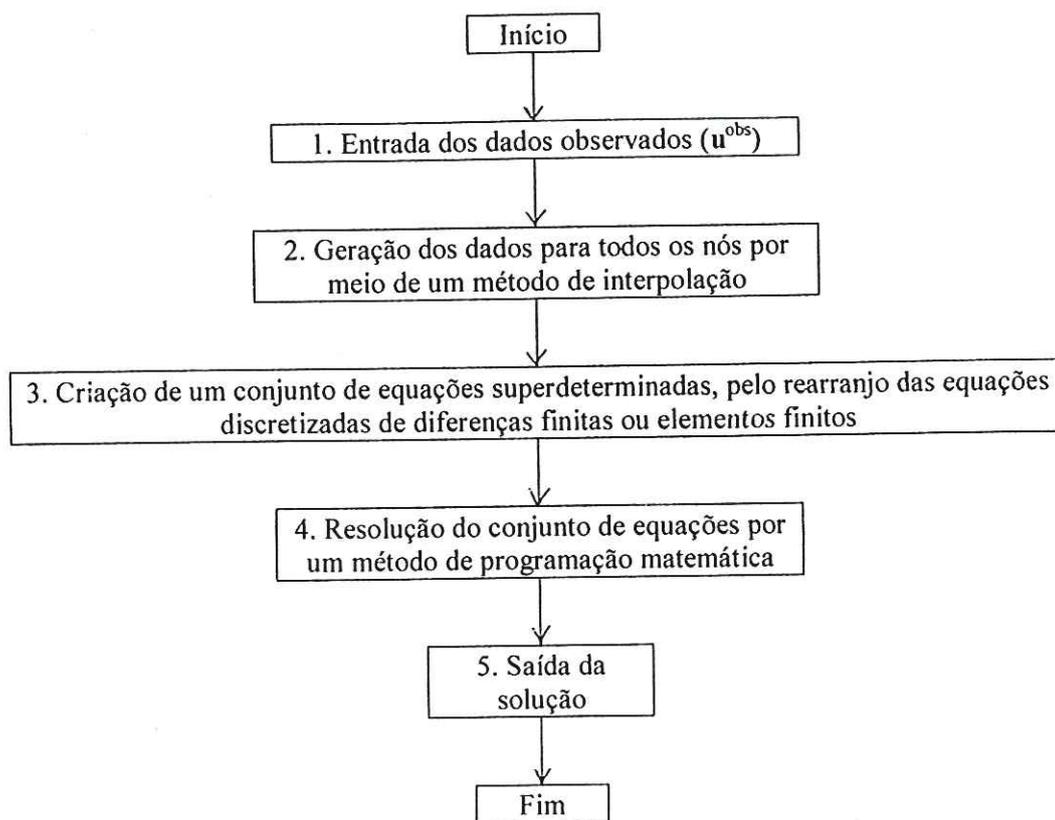


FIGURA 5.3 – Fluxograma do método direto.

Fonte: SUN (1994)

5.1.3 – Formulação do Problema Inverso e Resolução

O problema inverso tratado neste trabalho pode, então, ser formulado como segue: dadas medidas de carga hidráulica transientes em um ou mais nós de uma rede hidráulica, obter os valores de parâmetros de forma a lograr um ótimo ajuste entre os valores observados e calculados destas cargas.

A resolução do problema inverso segue o procedimento indireto com a minimização da diferença quadrática entre os resultados observados e calculados. A descrição formal pode ser posta da seguinte forma:

$$F = \sum_{i=1}^{NL} \sum_{j=1}^{TS} (H_{i,j}^m - H_{i,j}^c)^2 \quad (5.1)$$

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

5.2 – Estratégias de Resolução

No presente trabalho pretende-se identificar os parâmetros de uma rede hidráulica com a utilização de dados transientes de carga hidráulica por meio de um método inverso. O estudo compreende a calibração da rede hidráulica exemplo conforme os seguintes problemas propostos:

- Problema-tipo 1: identificação dos fatores de atrito, f ;
- Problema-tipo 2: identificação das rugosidades absolutas, ε ;
- Problema-tipo 3: identificação dos diâmetros, D ;
- Problema-tipo 4: localização e quantificação de vazamentos;
- Problema-tipo 5: localização e quantificação de vazamentos simultaneamente com a identificação dos fatores de atrito.

O método inverso proposto neste trabalho deve ser validado adequadamente para que seja útil em casos reais. O procedimento correto seria adquirir medições de campo e ainda dados observados sobre variação temporal da carga hidráulica e, utilizando tais dados, resolver o problema inverso realizando um confronto entre as cargas hidráulicas coletadas e estimadas. Neste estudo, submete-se a metodologia de estimação de parâmetros a testes de validação com dados sintéticos. Neste procedimento, as cargas hidráulicas transientes em uma rede hidráulica de parâmetros reais conhecidos são geradas e consideradas como sendo “observações” de campo. Ressalta-se que no método inverso, tais parâmetros são considerados desconhecidos sendo objeto de busca no problema de calibração. Só posteriormente à calibração, os parâmetros reais serão comparados com os estimados.

As cargas hidráulicas transientes sintéticas são frutos de um evento transiente provocado pela manobra de uma válvula localizada em um dos nós da rede hidráulica. Duas manobras de válvula, uma suave e outra brusca, são utilizadas como forma de análise dos efeitos na calibração dos parâmetros. Estas cargas transientes são coletadas em apenas um nó (onde se encontra a válvula) e usadas em todo o processo de identificação dos parâmetros, com exceção feita ao estudo de incertezas onde analisam-se erros de medição para um conjunto de nós.

5.2.1 – Condições Iniciais

O funcionamento dos modelos transientes baseia-se no conhecimento prévio das condições iniciais ou de estado permanente, em torno das vazões nos tubos e cargas nos nós. Num problema de calibração via observações transientes, não se conhecem as condições reais de regime permanente em todos os nós e tubos, com exceção das informações de carga hidráulica no(s) nó(s) de medida. Em virtude disso, torna-se necessário estabelecer uma estimativa inicial para as vazões nos tubos e cargas nos nós em estado permanente. Pode ser estabelecido qualquer critério de inicialização como fatores de atrito médios, rugosidades médias, fatores de atrito ou rugosidades arbitrados aleatoriamente, ou velocidade máxima nas tubulações. Neste trabalho propõe-se prover a primeira tentativa da condição permanente por meio do seguinte algoritmo (para o caso em que observam-se apenas as cargas em alguns nós):

1. Escolhe-se aleatoriamente um conjunto de parâmetros objetos de calibração (ex.: fatores de atrito, rugosidades ou diâmetros) para os tubos da rede.
2. Utiliza-se um modelo hidráulico permanente para calcular as vazões e as cargas.
3. De posse da informação da cargas hidráulicas no(s) nó(s) de medida, comparam-se com a carga calculada. Se a diferença entre as cargas for menor ou igual a 0,1 m, assumem-se os atuais valores das cargas e vazões, senão retornar ao passo 1 e repetir o processo até a convergência.

O modelo hidráulico permanente referido foi estabelecido por meio do modelo transiente até a obtenção do estado permanente. O algoritmo de obtenção das condições iniciais sofre uma alteração quando da identificação de vazamentos – situações 4 e 5 do processo de calibração. Na situação 4 apenas os vazamentos são desconhecidos e o passo 1 do algoritmo prevê a escolha aleatória de vazamentos, enquanto que na situação 5 as incógnitas são os vazamentos e fatores de atrito, dificultando ainda mais a obtenção da condição inicial.

As condições iniciais obtidas a partir deste algoritmo serão dados de entrada para o modelo hidráulico transiente. Como não se tem conhecimento da condição inicial real, o procedimento de calibração contempla uma auto-correção nestas condições na medida em que são feitas as várias avaliações da função objetivo. A figura 5.4 apresenta o esquema do procedimento de calibração estabelecido acima.

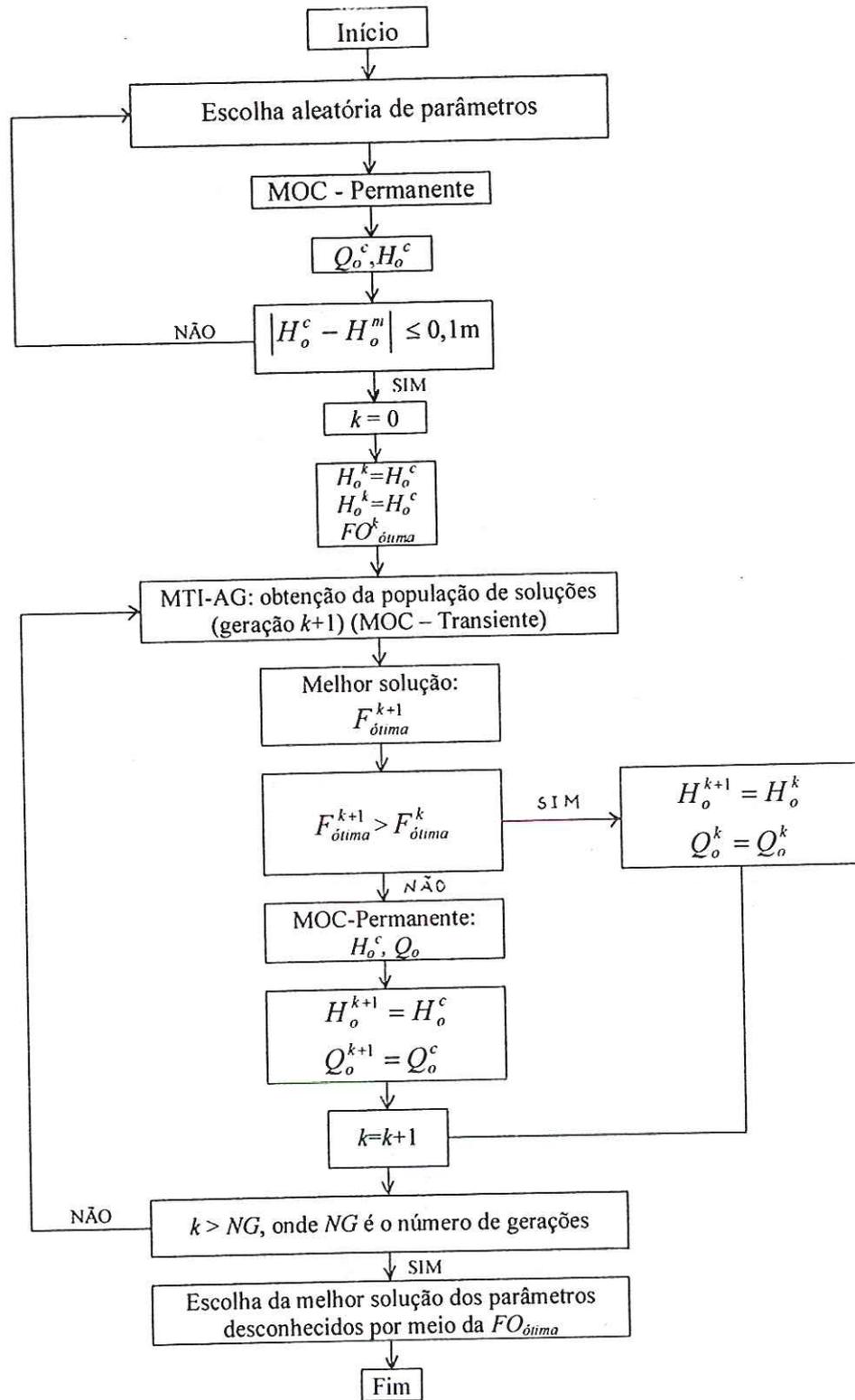


FIGURA 5.4 – Fluxograma do procedimento de calibração com auto-correção.

5.2.2 – Manobras de Válvula

Com o objetivo de analisar o efeito da severidade do transiente na identificação dos parâmetros, foram selecionadas duas manobras de válvula. Uma manobra suave e outra brusca. Uma manobra de válvula é caracterizada pela relação entre o coeficiente de abertura (ou fechamento) relativo, τ , em função do tempo t .

Nas duas manobras, a válvula de controle encontra-se inicialmente aberta ($\tau = 1$) até o tempo de 2s onde, a partir deste tempo, o fechamento e abertura possuem variações temporais distintas. O fechamento mínimo ocorre quando $\tau = 0,5$.

a) Manobra Suave

A manobra suave segue o seguinte procedimento. Após o tempo $t = 2,0$ s, a válvula fecha-se linearmente até o tempo $t = 10,0$ s. Depois disso, abre-se até a posição original no tempo $t = 20,0$ s. A figura 5.5 mostra esta manobra.

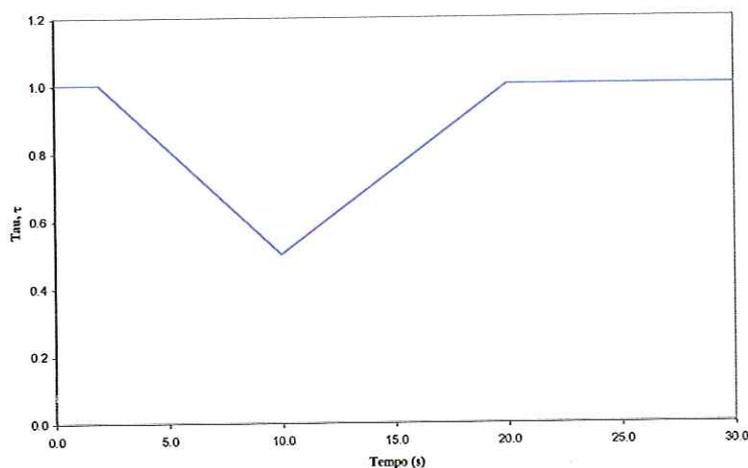


FIGURA 5.5 – Manobra suave da válvula.

b) Manobra Brusca

Após o tempo $t = 2,0$ s, a válvula fecha-se linearmente até o tempo $t = 3,0$ s e abre-se até atingir a posição original no tempo $t = 6,0$ s. A figura 5.6 mostra esta manobra.

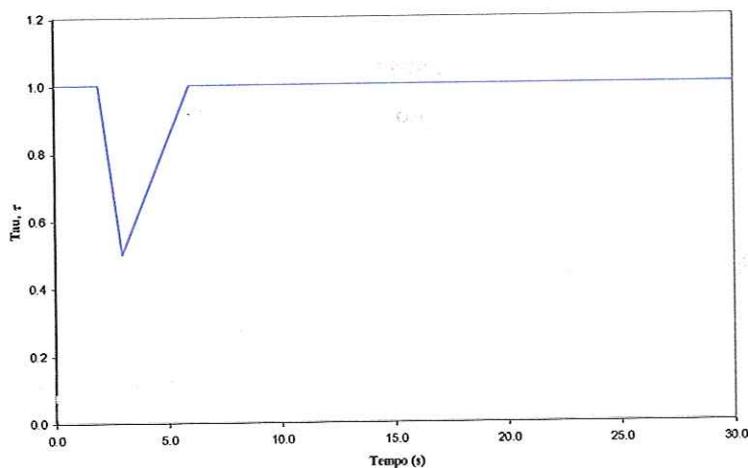


FIGURA 5.6 – Manobra brusca da válvula

5.2.3 – Estudo de Casos

Este trabalho pretende analisar a calibração em termos dos diferentes parâmetros.

a) Estudo de casos na identificação do fator de atrito

Neste problema prevê-se a identificação dos fatores de atrito dos tubos em dois casos distintos, fator de atrito constante e variado. A tabela 5.1 mostra os valores reais dos fatores de atrito para os dois casos com base nos quais foram obtidas as cargas sintéticas consideradas “observadas”.

TABELA 5.1 – Valores reais dos fatores de atrito para os dois casos de estudo.

Casos	Tubo / Fatores de atrito										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_{\text{constante}}$	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
f_{variado}	0,040	0,040	0,040	0,025	0,025	0,025	0,030	0,030	0,030	0,020	0,020

Optou-se pelo uso da codificação contínua para os fatores de atrito. A escolha dos fatores de atrito está sujeita a um intervalo contínuo fechado entre 0,010 e 0,050.

b) Estudo de casos na identificação das rugosidades absolutas

A calibração das rugosidades visa, principalmente, mostrar a sua conveniência quando comparada à identificação do fator de atrito.

Nos modelos hidráulicos existentes, o fator de atrito de Darcy-Weisbach é geralmente considerado como um parâmetro constante. Entretanto, no regime não-permanente, onde as vazões sofrem variações com o tempo, o fator de atrito tende a sofrer alterações. Sabe-se que o fator de atrito depende tanto da vazão (através do Número de Reynolds, Re) como da rugosidade relativa, (ε / D) . Matematicamente, o fator de atrito pode ser calculado pela equação de SWAMEE (1993):

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (5.2)$$

onde: ε = rugosidade absoluta; D = diâmetro do tubo; Re = número de Reynolds $[4Q/(\pi D \nu)]$; ν = viscosidade cinemática do fluido.

A cada valor da vazão corresponde um número de Reynolds que produz um fator de atrito. Nesta situação, as rugosidades absolutas são tratadas como parâmetros a serem calibrados. Na identificação consideram-se 3 possibilidades de grau de conhecimento das características das tubulações da rede:

- Caso 1: O material dos tubos é desconhecido, bem como se possuem a mesma rugosidade.
- Caso 2: O material dos tubos pertence a categoria de ferro fundido. Os tubos não são do mesmo material e não possuem a mesma rugosidade.
- Caso 3: O material dos tubos é conhecido e possui rugosidade uniforme.

A calibração envolverá, também, situações de rugosidades reais constantes e diferentes para os diversos tubos. A tabela 5.2 mostra os valores reais das rugosidades para as duas possibilidades.

TABELA 5.2 – Valores reais das rugosidades absolutas dos tubos, em mm.

Situações	Tubo / rugosidades absolutas (mm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\epsilon_{\text{constante}}$	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$\epsilon_{\text{variada}}$	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25

Optou-se pelo uso da codificação discreta para as rugosidades absolutas. A escolha das rugosidades está sujeita a um intervalo de valores discretos correspondente a alguns tipos de tubos, segundo PORTO (1998). A tabela 5.3 apresenta esta codificação.

TABELA 5.3 – Valores médios da rugosidade absoluta para alguns materiais.

Material	ϵ (mm) *	Código
Cobre, latão, aço revestido de epoxi; PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,00575	1
Cimento amianto novo	0,025	2
Concreto protendido Freyssinet	0,04	3
Aço comercial novo	0,045	4
Aço laminado revestido de asfalto, ferro forjado, ferro fundido centrifugado	0,05	5
Aço laminado novo	0,07	6
Aço soldado novo	0,075	7
Aço soldado revestido de cimento centrifugado, fofo em uso com cimento centrifugado	0,1	8
Aço galvanizado, sem costura	0,105	9
Ferro fundido com revestimento asfáltico, concreto centrifugado novo	0,16	10
Aço soldado limpo, usado; aço galvanizado, com costura	0,175	11
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,25	12
Ferro fundido com leve oxidação	0,3	13
Ferro fundido novo	0,375	14
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4	15
Ferro fundido oxidado	1,25	16
Aço rebitado novo, concreto com acabamento normal	2	17
Ferro fundido velho	4	18
Aço rebitado em uso	6	19

Fonte: Porto (1998)

Como ferramenta de análise da viabilidade e conveniência da identificação das rugosidades em relação ao fator de atrito, propõe-se a comparação entre os fatores de atrito equivalentes (obtidos com as rugosidades estimadas) e aqueles estimados diretamente.

c) Estudo de casos na identificação dos diâmetros

Serão realizadas calibrações com dois diferentes conjuntos de diâmetros dos tubos, diâmetros constantes e variados. A tabela 5.4 mostra os valores destes conjuntos.

TABELA 5.4 – Valores reais dos diâmetros dos tubos, em mm.

Situações	Tubo / Diâmetros (mm)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$D_{\text{constante}}$	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
D_{variado}	250	250	200	200	250	250	200	150	250	150	250

A identificação dos diâmetros seguirá um critério de grau de conhecimento da rede tal como na calibração das rugosidades. Considera-se que o diâmetro mínimo dos tubos seja conhecido e igual a 100 mm. O caso 1 refere-se a um total desconhecimento do diâmetro máximo e a partir daí estabeleceu-se um valor de 2000 mm. A escolha desse valor, que é um exagero para a rede-exemplo, tem um objetivo de avaliar o erro de estimação alcançado. É óbvio que, do ponto de vista prático, esta escolha não é conveniente, justificando-se sobretudo como uma abordagem teórica. O caso 2 apresenta um intervalo mediano de escolha dos diâmetros, onde supõe-se que o diâmetro máximo é de 1000 mm. O caso 3 representa o grau de conhecimento mais fiel e adequado com a realidade, pois apresenta um diâmetro máximo de 500 mm. O objetivo principal da identificação dos diâmetros é mostrar o quanto é importante um conhecimento prévio parcial das dimensões dos tubos.

- Caso 1: Os diâmetros dos tubos estão no intervalo: $100 \text{ mm} \leq D_i \leq 2000 \text{ mm}$.
- Caso 2: Os diâmetros dos tubos estão no intervalo: $100 \text{ mm} \leq D_i \leq 1000 \text{ mm}$.
- Caso 3: Os diâmetros dos tubos estão no intervalo: $100 \text{ mm} \leq D_i \leq 500 \text{ mm}$.

Optou-se pelo uso da codificação discreta para esta identificação. A escolha dos diâmetros, ou melhor, o incremento dado de um valor para outro, está sujeita a um intervalo de valores discretos representando os diâmetros comerciais.

d) Estudo de casos na identificação de vazamentos

Na análise dos sistemas de distribuição de água, as demandas ocorrem normalmente nos nós. Neste trabalho, assume-se que os vazamentos ocorrem nos nós, caso contrário

seriam necessárias medidas adicionais e métodos mais sofisticados. Em virtude dos vazamentos ocorrerem nos nós, os mesmos tornam-se simplesmente demandas adicionais.

Fisicamente, um vazamento funciona como um orifício descarregando livremente na atmosfera. Desprezando a energia cinética no interior do tubo, o vazamento, Q_V , pode ser calculado pela equação do orifício:

$$Q_V = C_d A_V \sqrt{2g(H_V - z_V)} \quad (5.3)$$

onde: C_d = coeficiente de descarga, A_V = área do orifício, H_V = carga hidráulica no nó do vazamento e z_V = cota do nó do vazamento. Os valores de A_V tornam-se as incógnitas em vez de Q_V . Essa formulação facilita os cálculos pois os valores de Q_V não são variáveis independentes mas os A_V 's são.

Nesta fase de identificação do nó com vazamento e sua magnitude, as possíveis soluções do problema, ou seja, as áreas de vazamentos, foram tratadas como variáveis contínuas obedecendo ao seguinte intervalo $10^{-6} \text{ m}^2 \leq A_V \leq 10^{-2} \text{ m}^2$. Este intervalo largo foi adotado em vista de inicialmente desconhecer-se a ordem de grandeza do vazamento real.

A identificação será desenvolvida em dois passos. No primeiro passo, realizam-se simulações com a finalidade de apontar os nós mais promissores para a ocorrência do(s) vazamento(s) descartando aqueles com vazamento desprezível. O segundo passo mantém os vazamentos em locais promissores como os ainda desconhecidos a serem identificados. Como critério para descartar vazamentos desprezíveis, utilizou-se o Índice de Aceitação do Local de Vazamento, $IALV_i$:

$$IALV_i (\%) = \frac{Q_{V_i}}{\sum_{i=1}^{NN} Q_{V_i}} \times 100 \quad (5.4)$$

onde: Q_{V_i} = vazamento no nó i e NN = número total de nós suspeitos de vazamentos. Aqueles nós que atingirem um percentual maior ou igual a 20% serão candidatos a vazamentos reais caso contrário serão rejeitados. Dois casos de identificação de vazamentos na rede-exemplo são considerados:

- Caso 1: Ocorre vazamento em um nó.
- Caso 2: Ocorrem vazamentos em dois nós.

e) Estudo de casos na identificação simultânea de vazamentos e fatores de atrito

Nesta situação, os vazamentos e fatores de atrito são desconhecidos. O processo de calibração segue os passos da identificação referente ao item (d) com a dificuldade de não se conhecer o conjunto de fatores de atrito reais. O procedimento aqui, também, será feito em dois passos. Após a confirmação dos nós com vazamentos retorna-se ao início do processo para melhorar a calibração dos fatores de atrito.

5.2.4 – Análise de Incertezas

No processo de calibração é importante que os dados observados sejam de boa qualidade. O cenário ideal seria aquele em que não houvesse nenhum tipo de erro nas medidas. Na prática, a observação é cheia de dificuldades e erros oriundos de desajustes dos aparelhos, leituras erradas, etc. Nesta análise, propõe-se avaliar a influência dos erros de medidas no processo de calibração dos fatores de atrito dos tubos. O objetivo é determinar a melhor combinação de fatores de atrito usando dados observados de forma precisa ($\sigma = 0$) e com erros de medida ($\sigma \neq 0$), onde σ é o desvio-padrão das medidas (imperfeições de leitura, defeito nos aparelhos, erro humano, etc).

5.2.5 – AG Binário x AG Real

Os testes pilotos realizados na fase preliminar de preparação deste estudo permitiram escolher a representação real como a padrão neste trabalho, todavia pretende-se realizar uma comparação entre estas representações. Esta comparação dar-se-á com a calibração dos fatores de atrito e levará em conta tanto o desempenho da função objetivo como o resultado final da identificação.

5.2.6 – Medida de Eficiência da Calibração

Com o objetivo de quantificar o resultado da calibração dos diversos parâmetros da rede hidráulica, este trabalho propõe dois índices que representem a eficiência na identificação. Para a estimação dos fatores de atrito, rugosidades e diâmetros, a análise da

qualidade da identificação dos parâmetros é feita pelo Erro Médio Relativo (*EMR*) e que pode ser escrito assim:

$$EMR(\%) = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{|w_i^{real} - w_i^{estimado}|}{w_i^{real}} \times 100 \right] \quad (5.5)$$

onde: w = representa os parâmetros f , ε e D a serem identificados, i = número do tubo e n = número total de tubos na rede.

Para avaliar o grau de acerto na localização e magnitude de vazamento referente aos nós que contém vazamento real, o Índice de Acerto (*IA*) pode ser escrito assim:

$$IA(\%) = \left\{ \left[1 - \frac{|Q_{v_i}^{real} - Q_{v_i}^{estimado}|}{Q_{v_i}^{real}} \right] \times 100 \right\} \quad (5.6)$$

onde: Q_{v_i} = vazamento no nó i , em l/s e i = número do nó que contém vazamento real.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 – Introdução

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida nos capítulos anteriores. O processo de calibração de um sistema de distribuição de água, via Método Transiente Inverso (MTI) e o Algoritmo Genético, conforme estabelecido no capítulo 5, visa à solução dos seguintes problemas-tipo:

- Problema-tipo 1: identificação dos fatores de atrito;
- Problema-tipo 2: identificação das rugosidades absolutas;
- Problema-tipo 3: identificação dos diâmetros;
- Problema-tipo 4: localização e quantificação de vazamentos;
- Problema-tipo 5: localização e quantificação de vazamentos simultaneamente com a identificação dos fatores de atrito.

A medida que o método é aplicado em cada calibração, os resultados são apresentados e discutidos. Em todas as identificações, o processo de análise dos resultados levará em consideração alguns aspectos importantes, como:

- Adequação do Método Transiente Inverso na identificação dos parâmetros e detecção de vazamentos;
- Viabilidade da calibração da rede hidráulica utilizando-se poucos dados observados;
- A influência do conhecimento das condições de contorno iniciais;
- A influência do tipo de manobra da válvula de controle na identificação dos parâmetros;
- A influência de erros provocados na leitura dos dados observados no processo de calibração;
- A influência do tamanho do registro transiente na calibração;

- A influência da utilização das codificações binária e real na representação dos parâmetros.

Em todos os problemas-tipo, os indicadores básicos de eficiência do procedimento de calibração serão o Erro Médio Relativo (EMR) e o Índice de Acerto (*IA*), ambos definidos no capítulo 5.

Com o objetivo de facilitar a abordagem e visualização da pesquisa, a Figura 6.1 apresenta um organograma dos estudos propostos neste trabalho.



FIGURA 6.1 – Organograma dos estudos realizados.

6.2 – Programas Computacionais

Foram desenvolvidos dois programas principais para a aplicação do método MTI-AG. O primeiro programa refere-se ao modelo hidráulico para o cálculo das cargas hidráulicas transientes por meio do Método das Características. O segundo programa foi construído para o procedimento de otimização via Algoritmo Genético. Para o cálculo das condições iniciais de estado permanente da rede em cada problema-tipo estabelecido na metodologia, foi utilizado o modelo transiente até a obtenção do estado de equilíbrio. Os dois programas trabalham de maneira conjugada, permitindo em cada avaliação da função objetivo o cálculo dos transientes na rede e uma auto-correção das condições de estado permanente. Todos os cálculos foram realizados em micro computador Pentium 3 de 600 MHz.

6.3 – Rede Exemplo

A rede hidráulica proposta por LIGGETT e CHEN (1994) é selecionada para a aplicação do procedimento apresentado neste trabalho. A rede é simples, mas segundo os autores ela representa uma situação real. A aplicação do procedimento MTI-AG não impõe restrição no tamanho do sistema. Como estabelecido na estratégia de solução do problema inverso, as cargas hidráulicas transientes “observadas” e as condições iniciais de regime permanente foram obtidas a partir de condições transientes usando o Método das Características.

A Figura 6.2 mostra a rede exemplo adotada. A rede contém 11 tubos, 1 reservatório de carga constante (nó 1), 1 nó de demanda constante (nó 7), 4 nós comuns e uma válvula de controle (nó 4).

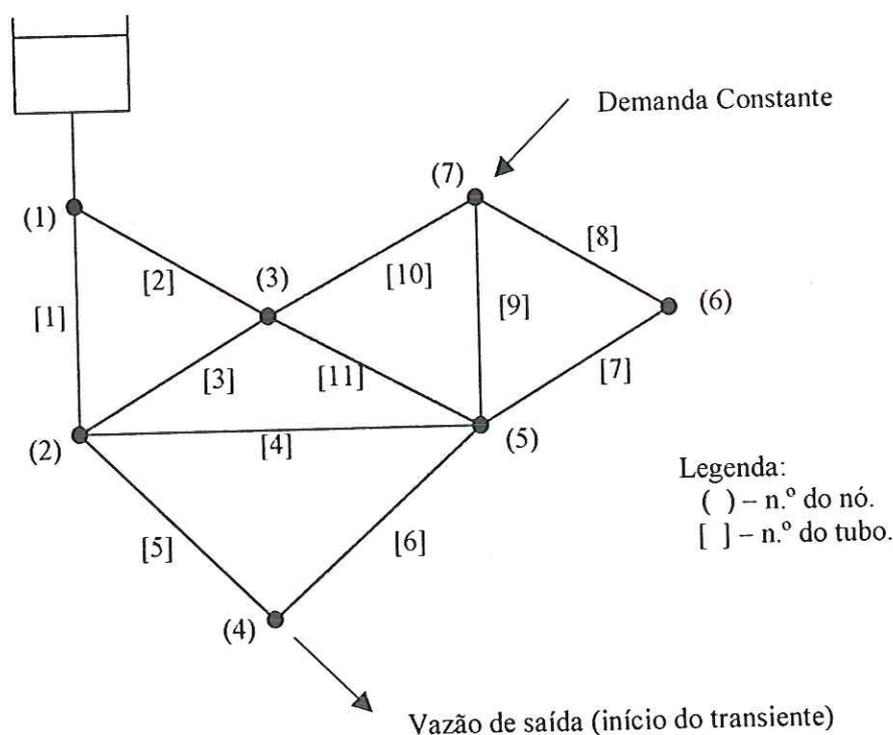


FIGURA 6.2 – Rede exemplo.

A tabela 6.1 apresenta as características físicas da rede hidráulica.

TABELA 6.1 – Características físicas dos tubos.

Tubo (1)	L (m) (2)	D (m) (3)	a (m/s) (4)	a_j (m/s) (5)
1	1300,0	0,250	1251,7	1251,7
2	650,0	0,250	1251,7	1251,7
3	650,0	0,200	1289,0	1251,7
4	1300,0	0,200	1289,0	1251,7
5	650,0	0,250	1251,7	1251,7
6	650,0	0,250	1251,7	1251,7
7	650,0	0,200	1289,0	1251,7
8	1250,0	0,150	1329,9	1203,6
9	1250,0	0,250	1251,7	1203,6
10	650,0	0,150	1329,9	1251,7
11	650,0	0,250	1251,7	1251,7

A coluna (4) da tabela 6.1 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 ($\Delta x > a\Delta t$). Entretanto, para evitar interpolação, Δt deve ser escolhido de maneira a satisfazer a seguinte equação (CHAUDHRY, 1987).

$$\Delta t = \frac{L_i}{a_i n_i} \quad (1 \text{ até } N) \quad (6.1)$$

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 (5) apresenta os valores da celeridade ajustados.

O evento transiente do sistema causado pela manobra da válvula de controle no nó 4 foi simulado durante 10s. O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,5s. Com este intervalo de tempo selecionado, os tubos foram discretizados em 15 trechos, cada um com cerca de 650m de comprimento.

6.4 – Parâmetros do Algoritmo Genético

Os parâmetros do AG aplicado para o processo de calibração foram:

➤ Representação dos parâmetros:	Real
➤ População de soluções, NC :	100
➤ Tipo de cruzamento:	aritmético
➤ Probabilidade de cruzamento, p_c :	100 %
➤ Tipo de mutação:	uniforme
➤ Probabilidade de mutação, p_m :	0,5 %
➤ Taxa de elitismo, p_e :	50 %
➤ Taxa de sucessão, p_s :	50 %
➤ Número de gerações, NG :	100

Em todas as identificações realizadas, as estimativas dos parâmetros consistiram de uma média de 10 processamentos do AG usando diferentes conjuntos de números gerados a partir de sementes diversas.

6.5 – Problema-tipo 1: identificação dos fatores de atrito

O procedimento de identificação dos fatores de atrito segue o indicado pelo capítulo 5 sobre as estratégias de resolução do problema inverso e compreende duas situações distintas, fatores de atrito constante e variados.

A colocação do problema inverso pode ser enfocado da seguinte forma:

- A carga no nó 1 é constante, conhecida e igual a 30,00 m. A demanda no nó 7 é constante e conhecida (= 12 l/s);
- O nó 4 é o local de medida da carga hidráulica transiente;
- A carga hidráulica no nó 4 é conhecida. As cargas nos demais nós e as vazões nos diversos tubos em regime permanente são desconhecidas;
- Os fatores de atrito são desconhecidos.

Aplicando o procedimento para estabelecer as condições de estado permanente, discutido no capítulo 5, as tabelas 6.2 e 6.3 mostram as vazões e as cargas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

TABELA 6.2 – Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação dos fatores de atrito.

Tubo	Q (m ³ /s)	
	$f_{\text{constante}}$	f_{variado}
1	0,02222	0,02402
2	0,02378	0,02198
3	0,01036	0,00548
4	0,00154	0,00430
5	0,03413	0,02521
6	0,02387	0,03280
7	0,00312	0,00322
8	0,00312	0,00322
9	0,00819	0,01257
10	0,00070	0,00379
11	0,01411	0,01271

TABELA 6.3 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação dos fatores de atrito.

Nó	H (m)	
	$f_{\text{constante}}$	f_{variado}
1	30,00	30,00
2	29,37	28,47
3	29,60	28,68
4	28,12	27,04
5	29,38	28,23
6	29,45	28,27
7	29,61	28,42

As cargas hidráulicas transientes “observadas” obtidas com as manobras das válvulas para as duas situações de fatores de atrito reais podem ser vistas na Figura 6.3.

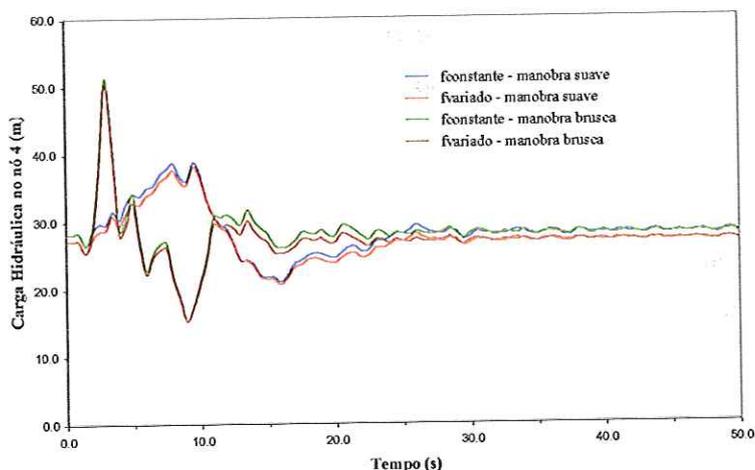


FIGURA 6.3 – Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 referentes à identificação dos fatores de atrito.

As tabelas 6.4 e 6.5 mostram os fatores de atrito estimados pela calibração via MTI-AG referentes às duas manobras de válvulas adotadas para as duas situações de fatores de atrito reais. Os valores estimados referentes à situação 2 (fatores de atrito reais variados) em ambas as manobras, apresentaram EMR's maiores do que os obtidos na situação 1 (fatores de atrito reais constantes). Estes resultados demonstram que o método encontra mais dificuldade quando o conjunto de fatores de atrito reais são variados. Nota-se, entretanto, que a diferença entre os EMR's obtidos com a manobra brusca é quase inexistente. Os resultados revelam, também, que a estimação dos fatores de atrito obtida com a manobra brusca é superior a obtida com a manobra suave. A Figura 6.4 apresenta uma comparação entre os fatores de atrito estimados na situação 2 com o uso das duas manobras.

TABELA 6.4 - Estimativas dos fatores de atrito segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra suave referentes às duas situações (fatores de atrito reais constantes e variados).

Tubo	$f_{\text{constante}}$		f_{variado}	
	f_{real}	f_{estimado}	f_{real}	f_{estimado}
1	0,020	0,023	0,040	0,029
2	0,020	0,017	0,040	0,020
3	0,020	0,029	0,040	0,031
4	0,020	0,018	0,025	0,032
5	0,020	0,020	0,025	0,030
6	0,020	0,020	0,025	0,045
7	0,020	0,020	0,030	0,031
8	0,020	0,025	0,030	0,026
9	0,020	0,021	0,030	0,037
10	0,020	0,027	0,020	0,025
11	0,020	0,022	0,020	0,027
EMR (%)	-	15,2	-	29,6

TABELA 6.5 - Estimativas dos fatores de atrito segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra brusca referentes às duas situações (fatores de atrito reais constantes e variados).

Tubo	$f_{\text{constante}}$		f_{variado}	
	f_{real}	f_{estimado}	f_{real}	f_{estimado}
1	0,020	0,020	0,040	0,039
2	0,020	0,022	0,040	0,035
3	0,020	0,024	0,040	0,032
4	0,020	0,028	0,025	0,030
5	0,020	0,022	0,025	0,026
6	0,020	0,020	0,025	0,031
7	0,020	0,022	0,030	0,030
8	0,020	0,023	0,030	0,028
9	0,020	0,022	0,030	0,029
10	0,020	0,017	0,020	0,025
11	0,020	0,026	0,020	0,028
EMR (%)	-	14,4	-	14,9

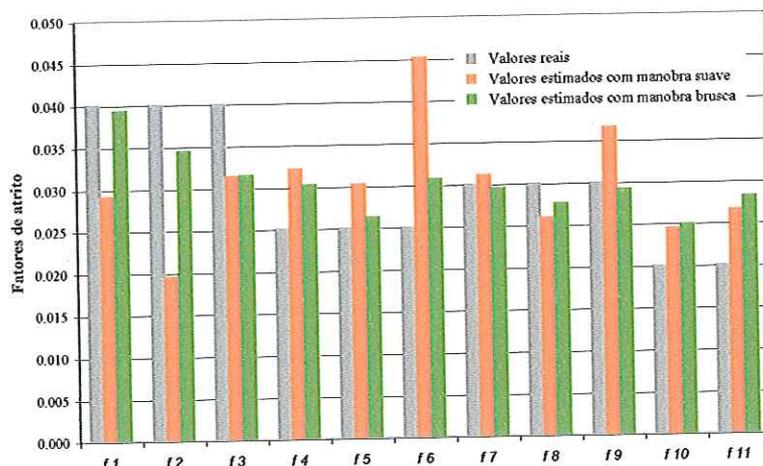


FIGURA 6.4 – Fatores de atrito reais (variados) e estimados referentes às manobras suave e brusca da válvula.

6.6 – Problema-tipo 2: identificação das rugosidades absolutas

O procedimento de identificação das rugosidades absolutas segue o indicado no capítulo 5 sobre as estratégias de resolução do problema inverso e compreende duas situações de rugosidades reais (constantes e variadas) com três casos distintos representando o grau de conhecimento a respeito dos tubos.

A colocação do problema inverso pode ser enfocado da seguinte forma:

- A carga no nó 1 é constante, conhecida e igual a 30,00 m. A demanda no nó 7 é constante e conhecida (= 12 l/s);
- O nó 4 é o local de medida da carga hidráulica transiente;
- A carga hidráulica no nó 4 é conhecida. As cargas nos demais nós e as vazões nos diversos tubos em regime permanente são desconhecidas;
- As rugosidades absolutas são desconhecidas.

Aplicando o procedimento para estabelecer as condições de estado permanente, discutido no capítulo 5, as tabelas 6.6 e 6.7 mostram as vazões e as cargas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

TABELA 6.6 – Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação da rugosidade.

Tubo	Q (m ³ /s)	
	$\epsilon_{\text{constante}}$	$\epsilon_{\text{variado}}$
1	0,02005	0,02445
2	0,02595	0,02155
3	0,00585	0,00830
4	0,00349	0,00337
5	0,02241	0,02938
6	0,03559	0,02862
7	0,00256	0,00293
8	0,00256	0,00293
9	0,01108	0,01032
10	0,00164	0,00126
11	0,01846	0,01200

TABELA 6.7 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação da rugosidade.

Nó	H (m)	
	$\epsilon_{\text{constante}}$	$\epsilon_{\text{variado}}$
1	30,00	30,00
2	29,21	28,85
3	29,36	29,14
4	27,87	27,65
5	29,02	28,74
6	29,05	28,81
7	29,29	29,10

As cargas hidráulicas transientes “observadas” obtidas com as manobras das válvulas para as duas situações de rugosidades reais podem ser vistas na Figura 6.5.

Os resultados sobre a identificação das rugosidades das tubulações que compõem a rede-exemplo serão apresentados de formas variadas para constatar as diferenças entre os métodos de calibração, enfocando a rugosidade absoluta e fator de atrito.

As tabelas 6.8 a 6.11 apresentam as estimativas da rugosidade absoluta obtidas a partir das manobras suave e brusca da válvula para os três casos de estudo e aos distintos conjuntos de rugosidades reais. Verifica-se que o grau de erro reduz na medida em que se incluem conhecimentos prévios a respeito da composição da rede (material e homogeneidade das rugosidades). Quando se conhece o material e seu emprego único, que é o caso 3, a estimação da rugosidade é muito boa apresentando um EMR de até 0,0% para a situação de manobra suave e rugosidades reais constantes. No caso 2 em que a rugosidade fica na faixa de ferro fundido, a determinação das rugosidades absolutas ainda é realizada com razoável eficiência, apresentando um EMR de 26,9% situação de manobra suave e rugosidades reais

constantes – tabela 6.8; 66,6% situação de manobra suave e rugosidades reais diversas – tabela 6.9; 39,8% situação de manobra brusca e rugosidades reais constantes – tabela 6.10 e 39,0% situação de manobra brusca e rugosidades reais diversas – tabela 6.11. O caso 1 que corresponde ao total desconhecimento a respeito das tubulações da rede, a estimativa das rugosidades é menos precisa com EMR de até 143,5% (para manobra suave e rugosidades reais constantes – tabela 6.8) que, a primeira vista, parece ser um erro demasiado grande.

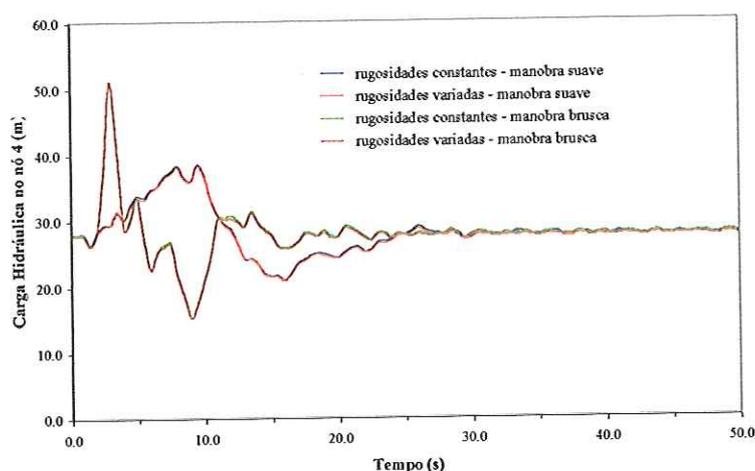


FIGURA 6.5 – Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4, para as duas situações de rugosidades reais constantes e variadas, referente à identificação da rugosidade absoluta.

TABELA 6.8 - Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra suave referentes aos três casos e rugosidades reais constantes.

Tubo	ϵ_{real} (mm)	f_{real}	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
			ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$
1	0,30	0,0208	0,92	0,0278	0,25	0,0199	0,30	0,0208
2	0,30	0,0207	0,37	0,0219	0,28	0,0204	0,30	0,0207
3	0,30	0,0221	0,88	0,0294	0,23	0,0207	0,30	0,0221
4	0,30	0,0260	1,40	0,0358	0,31	0,0245	0,30	0,0267
5	0,30	0,0207	0,33	0,0211	0,31	0,0209	0,30	0,0207
6	0,30	0,0207	0,15	0,0176	0,32	0,0210	0,30	0,0207
7	0,30	0,0228	0,69	0,0279	0,36	0,0237	0,30	0,0229
8	0,30	0,0241	0,40	0,0259	0,20	0,0220	0,30	0,0242
9	0,30	0,0210	1,04	0,0289	0,51	0,0239	0,30	0,0210
10	0,30	0,0248	0,95	0,0334	0,31	0,0252	0,30	0,0251
11	0,30	0,0209	0,61	0,0249	0,64	0,0252	0,30	0,0209
EMR (%)	-	-	143,5	22,2	26,9	6,4	0,0	0,0

TABELA 6.9 - Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra suave referentes aos três casos e rugosidades reais variadas.

Tubo	ϵ_{real} (mm)	f_{real}	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
			ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$
1	0,30	0,0208	2,19	0,0363	0,93	0,0280	0,28	0,0204
2	0,30	0,0207	0,19	0,0187	0,46	0,0230	0,28	0,0204
3	0,30	0,0221	0,52	0,0254	0,68	0,0273	0,40	0,0236
4	0,30	0,0251	1,11	0,0320	0,53	0,0266	0,17	0,0220
5	0,30	0,0207	0,39	0,0220	0,32	0,0210	0,28	0,0204
6	1,25	0,0304	0,77	0,0264	0,89	0,0275	1,53	0,0324
7	1,25	0,0331	0,67	0,0277	0,77	0,0288	1,25	0,0331
8	1,25	0,0360	0,76	0,0309	0,60	0,0289	1,53	0,0384
9	1,25	0,0306	1,11	0,0295	0,76	0,0266	1,33	0,0311
10	1,25	0,0368	0,94	0,0335	0,67	0,0304	1,13	0,0357
11	1,25	0,0305	0,26	0,0201	0,55	0,0242	1,53	0,0324
EMR (%)	-	-	115,9	20,3	66,6	15,5	16,1	4,4

TABELA 6.10 - Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra brusca referentes aos três casos e rugosidades reais constantes.

Tubo	ϵ_{real} (mm)	f_{real}	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
			ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$
1	0,30	0,0208	0,36	0,0217	0,51	0,0237	0,29	0,0206
2	0,30	0,0207	0,35	0,0216	0,21	0,0191	0,29	0,0205
3	0,30	0,0221	0,50	0,0251	0,17	0,0194	0,29	0,0219
4	0,30	0,0260	0,82	0,0337	0,59	0,0418	0,29	0,0265
5	0,30	0,0207	0,26	0,0200	0,30	0,0208	0,29	0,0205
6	0,30	0,0207	0,39	0,0221	0,31	0,0209	0,29	0,0205
7	0,30	0,0228	0,25	0,0220	0,49	0,0256	0,29	0,0227
8	0,30	0,0241	0,40	0,0260	0,16	0,0211	0,29	0,0239
9	0,30	0,0210	0,28	0,0206	0,22	0,0196	0,29	0,0208
10	0,30	0,0248	0,53	0,0283	0,45	0,0274	0,29	0,0248
11	0,30	0,0209	0,95	0,0281	0,27	0,0203	0,29	0,0206
EMR (%)	-	-	61,0	12,8	39,8	14,2	4,2	2,9

TABELA 6.11 - Estimativas das rugosidades absolutas e fatores de atrito equivalentes segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra brusca referentes aos três casos e rugosidades reais variadas.

Tubo	ϵ_{real} (mm)	f_{real}	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
			ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$	ϵ_{est} (mm)	$f_{equivalente}$
1	0,30	0,0208	0,31	0,0210	0,49	0,0234	0,28	0,0204
2	0,30	0,0207	0,22	0,0193	0,35	0,0216	0,37	0,0219
3	0,30	0,0221	1,20	0,0323	0,58	0,0262	0,83	0,0289
4	0,30	0,0251	0,14	0,0199	0,34	0,0239	0,23	0,0226
5	0,30	0,0207	0,29	0,0205	0,32	0,0210	0,26	0,0201
6	1,25	0,0304	2,17	0,0362	1,25	0,0304	1,40	0,0315
7	1,25	0,0331	0,70	0,0280	0,66	0,0276	1,05	0,0314
8	1,25	0,0360	0,56	0,0284	0,30	0,0241	1,33	0,0367
9	1,25	0,0306	1,43	0,0319	0,98	0,0285	1,32	0,0310
10	1,25	0,0368	1,05	0,0346	0,99	0,0344	0,98	0,0341
11	1,25	0,0305	1,29	0,0308	0,37	0,0219	1,24	0,0304
EMR (%)	-	-	54,1	13,0	39,0	12,1	27,9	6,5

Para se ter uma maior sensibilidade a respeito do verdadeiro significado do erro de estimação da rugosidade absoluta, as tabelas 6.8 a 6.11 também apresentam os fatores de atrito equivalentes às rugosidades estimadas em todas as situações, calculados com base nas vazões nos tubos em estado permanente. Observa-se que:

- O EMR no fator de atrito de 143,5%, 26,9% e 0,0% cai para 22,2%, 6,4% e 0,0% referente aos casos 1, 2 e 3, respectivamente (para manobra suave e rugosidades reais constantes – tabela 6.8);
- O EMR no fator de atrito de 115,9%, 66,6% e 16,1% cai para 20,3%, 15,5% e 4,4% referente aos casos 1, 2 e 3, respectivamente (para manobra suave e rugosidades reais variadas – tabela 6.9);
- O EMR no fator de atrito de 61,0%, 39,8% e 4,2% cai para 12,8%, 14,2% e 2,9% referente aos casos 1, 2 e 3, respectivamente (para manobra brusca e rugosidades reais constantes – tabela 6.10);
- O EMR no fator de atrito de 54,1%, 39,0% e 27,9% cai para 13,0%, 12,1% e 6,5% referente aos casos 1, 2 e 3, respectivamente (para manobra brusca e rugosidades reais variadas – tabela 6.11).

Comparando os dois métodos de estimação dos fatores de atrito quais sejam, fatores de atrito equivalente às estimativas de rugosidades (real e caso 2) e fatores de atrito estimados diretamente, as tabelas 6.12 e 6.13 apresentam tais estimativas para os dois conjuntos de rugosidades reais e as duas manobras de válvula. Observa-se que:

- Os EMR's nos fatores de atrito de 6,4% e 14,2% para as manobras suave e brusca, respectivamente, são menores que os erros de 14,8% e 16,3% no caso de calibração em termos de fatores de atrito (tabela 6.12 – situação de rugosidades reais constantes);
- Os EMR's nos fatores de atrito de 15,5% e 12,1% para as manobras suave e brusca, respectivamente, tornam-se 10,8% e 17,8% no caso de calibração em termos de fatores de atrito (tabela 6.13 – situação de rugosidades reais variáveis).

A estimação via rugosidade absoluta, supondo-se rugosidades reais constantes, é superior nos casos 2 e 3 com manobra suave e caso 3 com manobra brusca em comparação à estimação supondo-se rugosidades reais variáveis que possui EMR's inferiores nos casos 1 em ambas as manobras e praticamente inalterável no caso 2.

De maneira geral, a estimação via rugosidade absoluta é superior pelo fato da mesma admitir a influência da variabilidade temporal das vazões nos tubos durante o evento transiente. Além disso, é fisicamente mais apropriado supor tubulações de mesmo material do que simular tubulações com os mesmos fatores de atrito. Ressalta-se, ainda, a importância da calibração com base na rugosidade absoluta no caso 3 que, conforme apresentado acima, estimou os fatores de atrito com erros pequenos.

TABELA 6.12 – Fatores de atrito equivalentes e estimados diretamente referentes à situação de rugosidades reais constantes e grau de conhecimento mediano do material dos tubos (ferro fundido).

Tubo	f_{real}	$f_{equivalente}$ - Caso 2		$f_{estimado}$	
		Manobra suave	Manobra brusca	Manobra suave	Manobra brusca
1	0,021	0,0199	0,0237	0,0243	0,0231
2	0,021	0,0204	0,0191	0,0184	0,0186
3	0,022	0,0207	0,0194	0,0252	0,0301
4	0,027	0,0245	0,0418	0,0205	0,0207
5	0,021	0,0209	0,0208	0,0216	0,0199
6	0,021	0,0210	0,0209	0,0206	0,0220
7	0,023	0,0237	0,0256	0,0210	0,0225
8	0,024	0,0220	0,0211	0,0287	0,0283
9	0,021	0,0239	0,0196	0,0186	0,0270
10	0,025	0,0252	0,0274	0,0321	0,0278
11	0,021	0,0252	0,0203	0,0265	0,0276
EMR (%)	-	6,4	14,2	14,8	16,3

TABELA 6.13 – Fatores de atrito equivalentes e estimados diretamente referentes à situação de rugosidades reais variadas e grau de conhecimento mediano do material dos tubos (ferro fundido).

Tubo	f_{real}	$f_{equivalente}$ - Caso 2		$f_{estimado}$	
		Manobra suave	Manobra brusca	Manobra suave	Manobra brusca
1	0,021	0,0280	0,0234	0,0208	0,0251
2	0,021	0,0230	0,0216	0,0169	0,0189
3	0,022	0,0273	0,0262	0,0302	0,0275
4	0,025	0,0266	0,0239	0,0283	0,0267
5	0,021	0,0210	0,0210	0,0242	0,0191
6	0,030	0,0275	0,0304	0,0308	0,0339
7	0,033	0,0288	0,0276	0,0347	0,0190
8	0,036	0,0289	0,0241	0,0329	0,0330
9	0,031	0,0266	0,0285	0,0303	0,0365
10	0,037	0,0304	0,0344	0,0345	0,0257
11	0,031	0,0242	0,0219	0,0268	0,0257
EMR (%)	-	15,5	12,1	10,8	17,8

Com o intuito de realçar a importância da consideração da variação das vazões sobre os fatores de atrito durante o evento transiente, calcularam-se fatores de atrito equivalentes à rugosidade absoluta (casos 1, 2 e 3 para manobra suave e rugosidades reais constantes) em função do tempo, os quais são apresentados graficamente nas Figuras 6.6 e 6.7 para os tubos 4 e 5, respectivamente. Estão apresentados nestas figuras também os valores dos fatores de atrito determinados diretamente. Observa-se uma variabilidade muito grande nos valores dos fatores de atrito no tubo 4 para os casos 1, 2 e 3 devido ao fato desse tubo transportar baixas vazões que por sua vez passam por ciclos altos e baixos. Por outro lado a oscilação do fator de atrito durante o evento transiente no tubo 5 é bem suave. Nota-se que a vazão neste tubo em regime permanente apresenta um valor elevado.

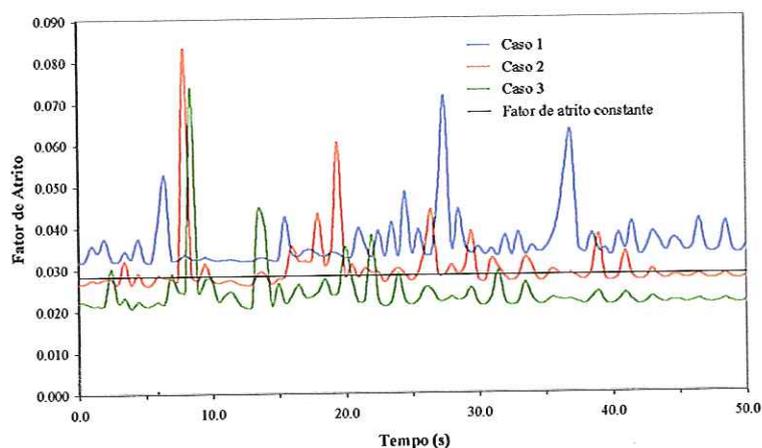


FIGURA 6.6 – Variação temporal do fator de atrito para os 3 casos de estudo no tubo 4 considerando rugosidades reais constantes.

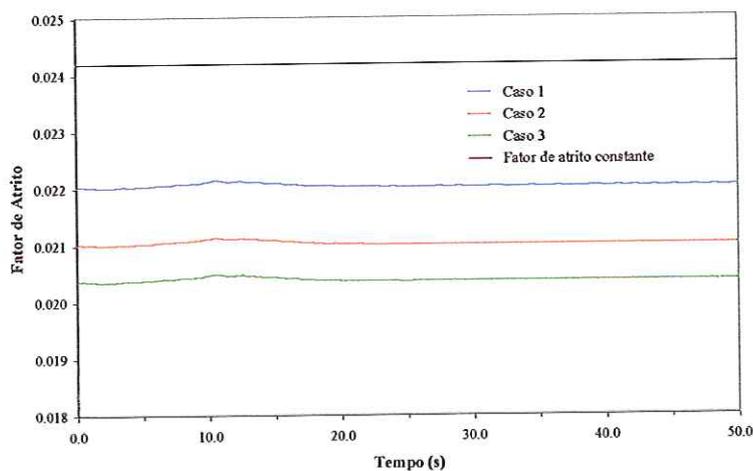


FIGURA 6.7 - Variação temporal do fator de atrito para os 3 casos de estudo no tubo 5 considerando rugosidades reais constantes.

Os resultados revelam, ainda, que a estimação das rugosidades absolutas obtida com a manobra brusca, de maneira geral, é melhor que a obtida com a manobra suave (fato este também observado na estimação dos fatores de atrito). A Figura 6.8 apresenta uma comparação entre as rugosidades absolutas estimadas no caso 2 com o uso das duas manobras e para rugosidades reais variáveis.

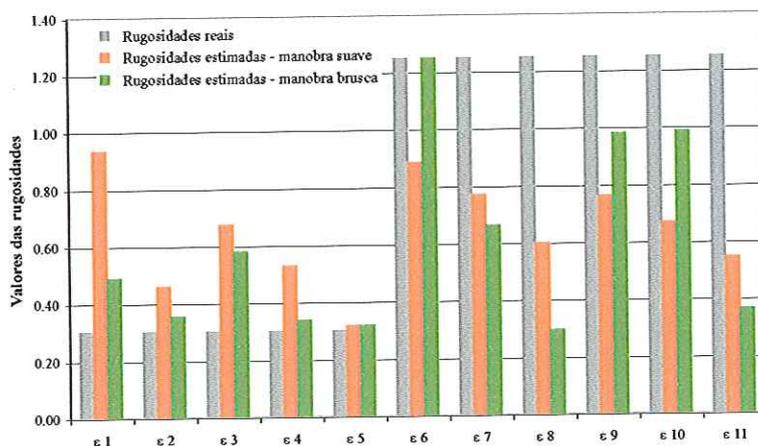


FIGURA 6.8 – Rugosidades reais (variadas) e estimadas para as duas manobras de válvula correspondente ao caso 2 (grau de conhecimento mediano do material dos tubos – ferro fundido).

6.7 – Problema-tipo 3: identificação dos diâmetros

O procedimento de identificação dos diâmetros segue o indicado pelo capítulo 5 sobre as estratégias de resolução do problema inverso e compreende duas situações de diâmetros reais, constantes e variados.

A colocação do problema inverso pode ser enfocado da seguinte forma:

- A carga no nó 1 é constante, conhecida e igual a 30,00 m. A demanda no nó 7 é constante e conhecida (= 12 l/s);
- O nó 4 é o local de medida da carga hidráulica transiente;
- A carga hidráulica transiente no nó 4 é conhecida. As cargas nos demais nós e as vazões nos diversos tubos em regime permanente são desconhecidas;
- Os diâmetros para as duas situações de estudo são desconhecidos.

Aplicando o procedimento para estabelecer as condições de estado permanente, discutido no capítulo 5, as tabelas 6.14 e 6.15 mostram as vazões e as cargas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

TABELA 6.14 – Vazões iniciais em estado permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação dos diâmetros.

Tubo	Q (m ³ /s)	
	<i>D</i> _{constante}	<i>D</i> _{variado}
1	0,00408	0,04218
2	0,04178	0,00384
3	0,01923	0,00785
4	0,01073	0,00424
5	0,01266	0,04578
6	0,04534	0,00494
7	0,00249	0,00047
8	0,00051	0,00000
9	0,01254	0,00290
10	0,00001	0,01091
11	0,02372	0,00014

TABELA 6.15 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação dos diâmetros.

Nó	H (m)	
	<i>D</i> _{constante}	<i>D</i> _{variado}
1	30,00	30,00
2	29,71	26,76
3	29,81	26,65
4	27,11	27,04
5	30,01	26,83
6	30,12	27,13
7	29,96	27,33

As cargas hidráulicas transientes “observadas” obtidas com as manobras das válvulas para as duas situações podem ser vistas na Figura 6.9.

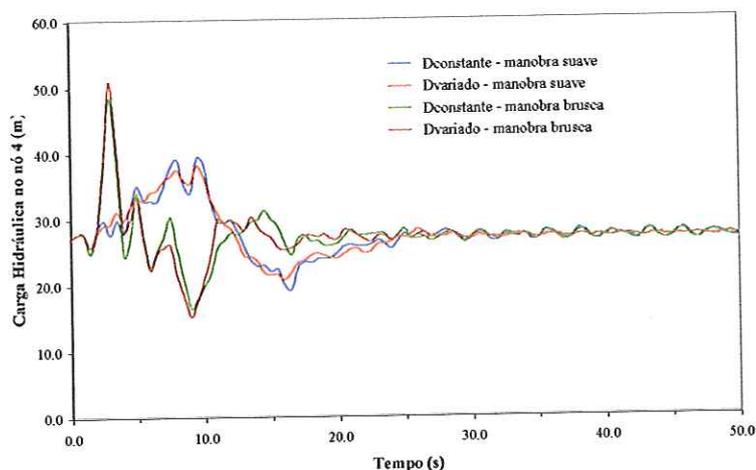


FIGURA 6.9 - Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 referente às duas situações de identificação dos diâmetros (constantes e variados).

As tabelas 6.16 a 6.19 apresentam as estimativas dos diâmetros obtidas a partir das manobras suave e brusca da válvula considerando os três casos de estudo (graus de conhecimento) e os dois conjuntos de diâmetros reais. Como era de se esperar, o grau de erro reduz na medida em que se diminui a faixa de conhecimentos dos diâmetros mínimo e máximo. O caso 1 que corresponde ao menor conhecimento dos diâmetros ($100 \text{ mm} \leq D_i \leq 2000 \text{ mm}$), a estimativa dos diâmetros apresenta os resultados menos precisos com EMR de até 58,0% (para manobra brusca e diâmetros reais diversos). No caso 2 em que os diâmetros são considerados estar numa faixa menor ($100 \text{ mm} - 1000 \text{ mm}$), a estimativa é obtida com razoável eficiência apresentando um EMR de até 19,5% (para manobra brusca e diâmetros reais constantes). No caso 3 em que a faixa de diâmetros é ainda menor, as estimativas alcançam bons resultados apresentando EMR que variam de 8,2 a 29,2%.

Os resultados mostram, ainda, que a estimativa dos diâmetros obtida com a manobra brusca é relativamente superior à obtida com a manobra suave. Este fato fica mais evidente nos casos 1 e 2 considerando as duas situações de diâmetros reais. A Figura 6.10 apresenta uma comparação entre os diâmetros estimados no caso 2 com o uso das duas manobras e para diâmetros reais variáveis.

TABELA 6.16 - Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra suave referentes aos três casos com diâmetros reais constantes.

Tubo	D_{real} (mm)	D_{est} (mm)		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	0,250	0,680	0,413	0,275
2	0,250	0,465	0,400	0,250
3	0,250	0,575	0,450	0,213
4	0,250	0,315	0,370	0,255
5	0,250	0,170	0,175	0,260
6	0,250	0,310	0,285	0,245
7	0,250	0,580	0,445	0,225
8	0,250	0,605	0,415	0,250
9	0,250	0,550	0,450	0,193
10	0,250	0,605	0,405	0,223
11	0,250	0,515	0,370	0,218
EMR (%)	-	101,1	57,4	8,2

TABELA 6.17 - Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra suave referentes aos três casos com diâmetros reais variados.

Tubo	D_{real} (mm)	D_{est} (mm)		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	0,250	0,310	0,335	0,310
2	0,250	0,645	0,325	0,300
3	0,200	0,438	0,308	0,203
4	0,200	0,525	0,438	0,308
5	0,250	0,205	0,275	0,270
6	0,250	0,310	0,365	0,235
7	0,200	0,605	0,420	0,250
8	0,150	0,510	0,268	0,315
9	0,250	0,500	0,333	0,193
10	0,150	0,490	0,270	0,220
11	0,250	0,410	0,338	0,240
EMR (%)	-	121,7	57,2	29,2

TABELA 6.18 - Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra brusca referentes aos três casos com diâmetros reais constantes.

Tubo	D_{real} (mm)	D_{est} (mm)		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	0,250	0,325	0,255	0,260
2	0,250	0,610	0,415	0,290
3	0,250	0,363	0,265	0,248
4	0,250	0,388	0,350	0,258
5	0,250	0,340	0,280	0,265
6	0,250	0,300	0,285	0,255
7	0,250	0,480	0,340	0,300
8	0,250	0,423	0,285	0,270
9	0,250	0,225	0,218	0,195
10	0,250	0,450	0,263	0,258
11	0,250	0,425	0,268	0,235
EMR (%)	-	59,2	19,5	8,3

TABELA 6.19 - Estimativas dos diâmetros segundo a solução ótima via MTI-AG obtidas da manobra brusca referentes aos três casos com diâmetros reais variados.

Tubo	D_{real} (mm)	D_{est} (mm)		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
1	0,250	0,297	0,264	0,245
2	0,250	0,522	0,422	0,265
3	0,200	0,239	0,275	0,185
4	0,200	0,306	0,356	0,215
5	0,250	0,328	0,278	0,260
6	0,250	0,317	0,267	0,240
7	0,200	0,383	0,289	0,228
8	0,150	0,311	0,261	0,163
9	0,250	0,206	0,175	0,230
10	0,150	0,328	0,214	0,215
11	0,250	0,361	0,231	0,255
EMR (%)	-	58,0	36,9	9,7

Finalmente, o processo de estimação dos diâmetros revelou-se muito mais instável em comparação à identificação dos fatores de atrito e rugosidades absolutas. Isto pode ser devido ao fato de que os valores dos diâmetros serem elevados a quinta potência na equação da energia provocando grandes alterações nas pressões para pequenas mudanças nos valores dos diâmetros. Por outro lado, quanto maior o conhecimento em termos dos prováveis diâmetros na rede, melhor a estimação.

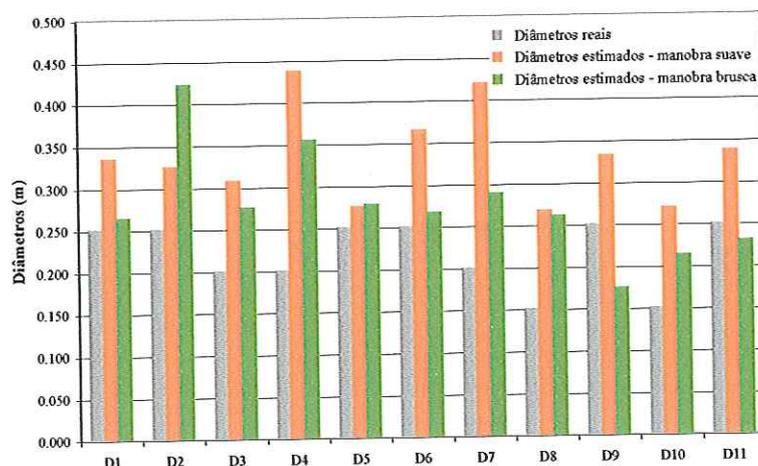


FIGURA 6.10 – Diâmetros reais e estimados para as duas manobras referentes ao caso 2.

6.8 – Problema-tipo 4: localização e quantificação de vazamentos

Nesta fase do trabalho, estuda-se o procedimento de localização e quantificação de vazamentos considerando que todos os nós, com exceção dos nós 1 e 4, são pontos possíveis para a ocorrência de vazamentos. O método MTI-AG deverá identificar as seguintes situações (PUDAR e LIGGETT, 1992):

- Caso 1: Ocorre um vazamento no nó 2 com uma área de $A_V = 0,000432\text{m}^2$.
- Caso 2: Ocorrem dois vazamentos: nós 2 e 6, com $A_V = 0,000445\text{m}^2$ e $A_V = 0,000674\text{m}^2$, respectivamente.

O problema inverso pode ser colocado da seguinte forma:

- A carga no nó 1 é constante, conhecida e igual a 30,00 m. A demanda no nó 7 é constante e conhecida (= 12 l/s);
- O nó 4 é o local de medida da carga hidráulica transiente;
- A carga hidráulica no nó 4 é conhecida. As cargas nos demais nós e as vazões nos diversos tubos em regime permanente são desconhecidas;
- Os diâmetros e fatores de atrito são conhecidos;
- Os locais e as áreas de vazamentos são desconhecidas.

Aplicando o procedimento para estabelecer as condições de estado permanente, discutido no capítulo 5, as tabelas 6.20 e 6.21 mostram as vazões e as cargas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

TABELA 6.20 – Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação de vazamentos.

Tubo	Q (m ³ /s)	
	Caso 1	Caso 2
1	0,02450	0,03117
2	0,03157	0,04123
3	0,00818	0,00892
4	0,00169	0,00356
5	0,02915	0,02833
6	0,02885	0,02967
7	0,00445	0,00272
8	0,00345	0,00290
9	0,01103	0,01094
10	0,00248	0,00184
11	0,02073	0,01971

TABELA 6.21 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação de vazamentos.

Nó	H (m)	
	Caso 1	Caso 2
1	30,00	30,00
2	27,36	25,72
3	27,81	26,26
4	26,19	24,62
5	27,33	25,83
6	27,23	25,87
7	27,72	26,21

As cargas hidráulicas transientes “observadas” obtidas com as manobras das válvulas para os dois casos de estudo podem ser vistas na Figura 6.11.



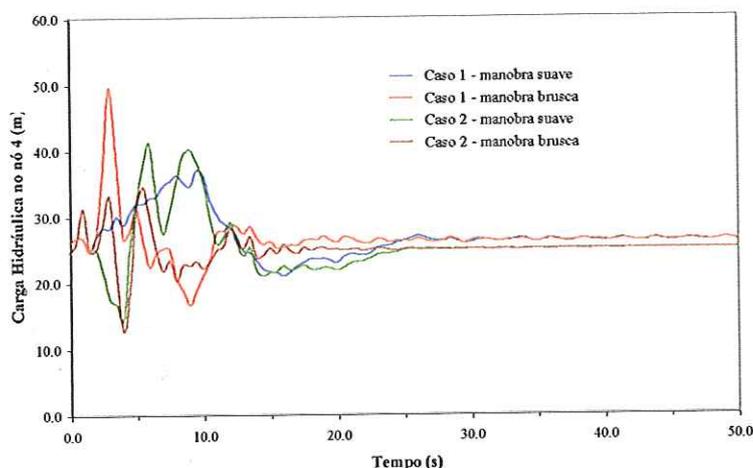


FIGURA 6.11 – Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 referente aos dois casos de identificação de vazamentos.

Como definido no capítulo 5, a identificação do(s) nó(s) de vazamento (casos 1 e 2) e de sua magnitude será desenvolvida em dois passos. No primeiro passo (estimação preliminar) realizaram-se identificações com a finalidade de apontar os locais mais promissores para a ocorrência do(s) vazamento(s) descartando aqueles com vazamento desprezível. Um vazamento é considerado desprezível se o Índice de Aceitação do Local de Vazamento, *I_{ALV}* (%), for menor que 20%. Vale ressaltar que, neste passo preliminar, somente o *I_{ALV}* é investigado pois não se sabe o local exato do vazamento e sua magnitude. O segundo passo (estimação final) mantém os vazamentos em locais promissores como os desconhecidos ainda a serem identificados. Nesta segunda estimação deve-se ressaltar o percentual de acerto obtido com a identificação final.

Os resultados da aplicação do MTI-AG para identificação de vazamentos referente ao caso 1 são apresentados nas tabelas 6.22 e 6.23 utilizando-se a manobra suave da válvula. Verifica-se destas tabelas que, no caso da existência de um único vazamento na rede (nó 2) o método de identificação em dois passos mostrou-se bastante eficiente na localização do vazamento real com índice de acerto de 99,9%. Na estimação preliminar (tabela 6.22) que trata todos os nós da rede (exceto os nós 1 e 4) como possíveis locais de vazamento, os nós 3, 5, 6 e 7 indicaram vazamentos desprezíveis (*I_{ALV}*'s menores que 20%) enquanto que o nó 2 desponta como o provável nó do vazamento. A tabela 6.23 referente à estimação final confirma o nó 2 como o real local de vazamento com altíssimo índice de acerto.

TABELA 6.22 – Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra suave. Estimação preliminar
(Passo 1 – nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)	Q_V (l/s)	
	Estimado	Estimado	IALV (%)
2	0,000369	8,54	87,2
3	0,000018	0,42	4,3
5	0,000032	0,74	7,6
6	0,000002	0,05	0,5
7	0,000002	0,05	0,5
ΣQ_V	-	9,79	-

TABELA 6.23 – Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra suave. Estimação final.
(Passo 2 – nó 2 como suspeito).

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)	
2	0,000432	0,000432	10,0	9,99	100,0	99,9
3	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	-	-	10,0	9,99	-	-

Os resultados da repetição do procedimento de identificação do local e magnitude do vazamento com o uso da manobra brusca são apresentados nas tabelas 6.24 e 6.25. Constatase que o método transiente inverso foi igualmente eficiente na identificação do vazamento revelando que a manobra brusca também obteve excelente estimação final apresentando um índice de acerto de 99,9%.

TABELA 6.24 – Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra brusca. Estimação preliminar.
(Passo 1 – nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)	Q_V (l/s)	
	Estimado	Estimado	IALV (%)
2	0,000394	9,13	94,5
3	0,000005	0,12	1,2
5	0,000007	0,16	1,7
6	0,000010	0,23	2,4
7	0,000001	0,02	0,2
ΣQ_V	-	9,66	-

TABELA 6.25 – Estimativas de vazamentos. Caso 1. Manobra brusca. Estimação final. (Passo 2 – nó 2 como suspeito).

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)	
2	0,000432	0,000432	10,0	9,99	100,0	99,9
3	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	-	-	10,0	9,99	-	-

O último teste de validação do MTI-AG considerou “observações” referentes à ocorrência de vazamentos em dois nós da rede com o uso das duas manobras da válvula. As tabelas 6.26 e 6.27 apresentam os diversos resultados de vazamentos considerando o uso da manobra suave. O procedimento de identificação proposto, mais uma vez, mostra-se eficiente em localizar e atribuir magnitudes dos dois vazamentos existentes na rede. As tabelas 6.28 e 6.29 apresentam os resultados para a manobra brusca. Para as duas manobras, a estimativa preliminar (tabelas 6.26 e 6.28) já aponta os nós 2 e 6 como candidatos em potencial a possuir vazamentos. Na estimativa final (tabelas 6.27 e 6.29) a confirmação dos vazamentos ocorre com altos índices de acerto.

Por fim, a manobra brusca da válvula apresentou um desempenho superior na identificação e quantificação de vazamentos para os dois casos de estudo.

TABELA 6.26 – Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra suave. Estimativa preliminar (Passo 1 – nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)	Q_V (l/s)	
	Estimado	Estimado	IALV (%)
2	0,000408	9,18	36,2
3	0,000005	0,11	0,4
5	0,000037	0,83	3,3
6	0,000653	14,53	57,3
7	0,000031	0,70	2,8
ΣQ_V	-	25,35	-

TABELA 6.27 – Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra suave. Estimação final.
(Passo 2 – nós 2 e 6 como suspeitos).

Nó	A_r (m ²)		Q_r (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)	
2	0,000445	0,000366	10,0	8,23	37,2	82,3
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000674	0,000625	15,0	13,91	62,8	92,7
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_r	-	-	25,0	22,14	-	-

TABELA 6.28 – Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra brusca. Estimação preliminar
(Passo 1 – nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_r (m ²)	Q_r (l/s)	
	Estimado	Estimado	IALV (%)
2	0,000354	7,96	30,1
3	0,000077	1,75	6,6
5	0,000079	1,78	6,7
6	0,000656	14,60	55,2
7	0,000015	0,34	1,3
ΣQ_r	-	26,43	-

TABELA 6.29 – Estimativas de vazamentos. Caso 2. Manobra brusca. Estimação final.
(Passo 2 – nós 2 e 6 como suspeitos).

Nó	A_r (m ²)		Q_r (l/s)			IA (%)
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)	
2	0,000445	0,000445	10,0	10,00	39,7	100,0
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
6	0,000674	0,000674	15,0	15,18	60,3	98,8
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-
ΣQ_r	-	-	25,0	25,18	-	-

6.9 – Problema-tipo 5: localização e quantificação de vazamentos simultaneamente com a identificação dos fatores de atrito

Considera-se, agora, a identificação simultânea de vazamentos e fatores de atrito. Os mesmos casos (ocorrência de um e dois vazamentos) da seção anterior são estudados aqui, porém os fatores de atrito são desconhecidos. Aplicando o procedimento para estabelecer as

condições de estado permanente, discutido no capítulo 5, as tabelas 6.30 e 6.31 mostram as vazões e as cargas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

TABELA 6.30 – Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes à identificação simultânea de vazamentos e fatores de atrito.

Tubo	Q (m ³ /s)	
	Caso 1	Caso 2
1	0,02539	0,02708
2	0,03551	0,04538
3	0,01158	0,01091
4	0,00209	0,00744
5	0,03558	0,02978
6	0,02242	0,02822
7	0,00308	0,00171
8	0,00319	0,00268
9	0,01349	0,01466
10	0,00467	0,00534
11	0,01423	0,02161

TABELA 6.31 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes à identificação simultânea de vazamentos e fatores de atrito.

Nó	H (m)	
	Caso 1	Caso 2
1	30,00	30,00
2	26,99	26,47
3	27,57	26,69
4	26,19	24,61
5	27,03	26,05
6	27,05	26,02
7	27,33	26,35

As cargas hidráulicas transientes “observadas” obtidas com a utilização das duas manobras da válvula para os dois casos são as mesmas da seção anterior e podem ser vistas na figura 6.10.

A estratégia de aplicação do método é a mesma da seção anterior, todavia após a confirmação dos vazamentos, no processo em dois passos, haverá um processamento visando melhorar a calibração dos fatores de atrito.

Os resultados da aplicação do MTI-AG para esta identificação simultânea referente ao caso 1 são apresentados nas tabelas 6.32 e 6.33 utilizando-se a manobra suave. Verifica-se destas tabelas que, no caso da existência de um único vazamento na rede (nó 2) e do desconhecimento dos fatores de atrito, o método de identificação mostrou-se eficiente tanto na identificação do vazamento real, com índice de acerto de 95,9%, quanto na calibração do

fator de atrito apresentando um EMR de 15,5%. Na estimação preliminar (tabela 6.32) os nós 3,5,6 e 7 indicaram vazamentos desprezíveis (*IALV*'s menores que 20%) enquanto que o nó 2 desponta como o provável nó de vazamento. O EMR no fator de atrito neste primeiro passo foi de 24,3% enquanto que no segundo chegou a 15,5%.

TABELA 6.32 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra suave.

Estimação preliminar (Passo 1 - nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_r (m ²)		Q_r (l/s)		Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Estimado	Estimado	Estimado	IALV (%)			
					1	0,040	0,035
2	0,000494	11,43	97,8		2	0,040	0,032
3	0,000006	0,14	1,2		3	0,040	0,026
5	0,000001	0,02	0,2		4	0,025	0,020
6	0,000001	0,02	0,2		5	0,025	0,027
7	0,000003	0,07	0,6		6	0,025	0,033
ΣQ_v	-	11,69	-		7	0,030	0,027
					8	0,030	0,033
					9	0,030	0,035
					10	0,020	0,027
					11	0,020	0,033
					EMR (%)	-	24,3

TABELA 6.33 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra suave.

Estimação final (Passo 2 - nó 2 como suspeito).

Nó	A_r (m ²)		Q_r (l/s)			IA (%)	Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)				
							1	0,040	0,035
2	0,000432	0,000450	10,0	11,41	100,0	95,9	2	0,040	0,037
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	3	0,040	0,030
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	4	0,025	0,030
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	5	0,025	0,030
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	6	0,025	0,032
ΣQ_v	-	-	10,0	11,41	-	-	7	0,030	0,032
							8	0,030	0,030
							9	0,030	0,031
							10	0,020	0,026
							11	0,020	0,023
							EMR (%)	-	15,5

Os resultados da repetição do procedimento de identificação simultânea com o uso da manobra brusca são apresentados nas tabelas 6.34 e 6.35. Constata-se que o método foi igualmente eficiente na identificação simultânea revelando que a manobra brusca foi um pouco inferior, apesar do índice de acerto no nó 2 ter sido de 92,2% na estimação preliminar.

Na estimação final, a confirmação do nó 2 como local de vazamento obteve um acerto de 81,1% enquanto que a calibração dos fatores de atrito obteve um EMR de 18,5%.

TABELA 6.34 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra brusca. Estimação preliminar (Passo 1 - nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)		Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Estimado	Estimado	Estimado	IALV (%)			
					1	0,040	0,032
2	0,000466	10,78	86,8		2	0,040	0,030
3	0,000065	1,52	12,2		3	0,040	0,024
5	0,000001	0,02	0,2		4	0,025	0,017
6	0,000001	0,02	0,2		5	0,025	0,028
7	0,000003	0,07	0,6		6	0,025	0,038
ΣQ_V	-	12,42	-		7	0,030	0,017
					8	0,030	0,025
					9	0,030	0,023
					10	0,020	0,016
					11	0,020	0,031
					EMR (%)	-	31,2

TABELA 6.35 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 1. Manobra brusca. Estimação final (Passo 2 - nó 2 como suspeito).

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)	Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)				
							1	0,040	0,037
2	0,000432	0,000514	10,0	11,89	100,0	81,1	2	0,040	0,038
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	3	0,040	0,028
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	4	0,025	0,033
6	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	5	0,025	0,028
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	6	0,025	0,028
ΣQ_V	-	-	10,0	11,89	-	-	7	0,030	0,034
							8	0,030	0,027
							9	0,030	0,030
							10	0,020	0,029
							11	0,020	0,027
							EMR (%)	-	18,5

Os resultados da aplicação do método na identificação simultânea referente ao caso 2 (ocorrência de vazamentos nos nós 2 e 6) com o uso das duas manobras são mostrados nas tabelas 6.36 a 6.40. Para a manobra suave, a estimação preliminar (passo 1 – nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos – tabela 6.36) mostrou que os nós 3, 5 e 7 indicaram vazamentos desprezíveis ($IALV$'s < 20%). A estimação final confirmou a existência de vazamentos nos nós 2 e 6 com índices de acerto de 66,6% e 99,0%. A estimação dos fatores de atrito apresentou uma redução nos EMR 's de 26,1% para 13,5% mostrando uma sensível melhora

na identificação. O procedimento de identificação, para a manobra suave, ocorreu em dois passos.

Com relação a manobra brusca, o processo de estimação ocorreu em três passos. O primeiro passo considerou todos os nós como suspeitos e os resultados (tabela 6.38) mostraram que os nós 3 e 7 tiveram vazamentos desprezíveis. No segundo passo, os nós 2, 5 e 6 que apresentaram IALV's maiores que 20% foram considerados como suspeitos e os resultados da estimação (tabela 6.39) já apontavam os nós 2 e 6 como os nós com vazamentos. A estimação final (tabela 6.40) concluiu, enfim, que realmente os nós 2 e 6 são locais de fuga de água revelando índices de acerto perto de 100%. A identificação dos fatores de atrito apresentou uma pequena oscilação neste procedimento de três passos. Os valores dos EMR's ficaram na faixa de 18% a 23%.

Por fim, destaca-se que a utilização da manobra brusca mostrou-se mais eficiente na identificação simultânea de vazamentos e fatores de atrito em relação à manobra suave.

TABELA 6.36 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra suave. Estimação preliminar (Passo 1 - nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_r (m ²)	Q_r (l/s)		Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Estimado	Estimado	IALV (%)			
				1	0,040	0,029
2	0,000445	5,38	22,1	2	0,040	0,032
3	0,000000	3,12	12,8	3	0,040	0,027
5	0,000000	0,54	2,2	4	0,025	0,028
6	0,000674	14,66	60,3	5	0,025	0,021
7	0,000000	0,63	2,6	6	0,025	0,031
ΣQ_v	-	11,69	-	7	0,030	0,023
				8	0,030	0,022
				9	0,030	0,019
				10	0,020	0,022
				11	0,020	0,032
				EMR (%)	-	26,1

TABELA 6.37 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra suave.
Estimação final (Passo2- nós 2 e 6 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			LA (%)	Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)				
2	0,000445	0,000593	10,0	13,34	46,8	66,6	1	0,040	0,041
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	2	0,040	0,037
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	3	0,040	0,029
6	0,000674	0,000681	15,0	15,15	53,2	99,0	4	0,025	0,026
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	5	0,025	0,027
ΣQ_V	-	-	25,0	28,49	-	-	6	0,025	0,028
							7	0,030	0,027
							8	0,030	0,024
							9	0,030	0,031
							10	0,020	0,023
							11	0,020	0,028
							EMR (%)	-	13,5

TABELA 6.38 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra brusca.
Estimação preliminar (Passo 1 - nós 2, 3, 5, 6 e 7 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)	Q_V (l/s)		Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Estimado	Estimado	IALV (%)			
2	0,000417	9,38	24,0	1	0,040	0,034
3	0,000100	2,28	5,8	2	0,040	0,029
5	0,000538	12,09	30,9	3	0,040	0,029
6	0,000675	15,02	38,4	4	0,025	0,024
7	0,000015	0,34	0,9	5	0,025	0,028
ΣQ_V	-	39,11	-	6	0,025	0,022
				7	0,030	0,028
				8	0,030	0,033
				9	0,030	0,020
				10	0,020	0,018
				11	0,020	0,029
				EMR (%)	-	18,2

TABELA 6.39 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra brusca. Estimação preliminar (Passo 2 - nós 2, 5 e 6 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)	Q_V (l/s)		Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Estimado	Estimado	IALV (%)			
2	0,000545	12,26	42,7	1	0,040	0,029
3	0,000000	0,00	0,0	2	0,040	0,032
5	0,000538	1,66	5,8	3	0,040	0,026
6	0,000675	14,82	51,6	4	0,025	0,028
7	0,000000	0,00	0,0	5	0,025	0,033
ΣQ_V	-	28,74	-	6	0,025	0,024
				7	0,030	0,023
				8	0,030	0,031
				9	0,030	0,021
				10	0,020	0,020
				11	0,020	0,025
				EMR (%)	-	19,4

TABELA 6.40 – Estimativas de vazamentos e fatores de atrito. Caso 2. Manobra brusca.
Estimação final (Passo 3 - nós 2 e 6 como suspeitos).

Nó	A_V (m ²)		Q_V (l/s)			IA (%)	Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$
	Real	Estimado	Real	Estimado	IALV (%)				
							1	0,040	0,040
2	0,000445	0,000433	10,0	9,74	40,0	97,4	2	0,040	0,040
3	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	3	0,040	0,026
5	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	4	0,025	0,033
6	0,000674	0,000657	15,0	14,62	60,0	97,5	5	0,025	0,031
7	0,000000	0,000000	0,0	0,00	0,0	-	6	0,025	0,017
ΣQ_V	-	-	25,0	24,36	-	-	7	0,030	0,034
							8	0,030	0,015
							9	0,030	0,023
							10	0,020	0,018
							11	0,020	0,025
							EMR (%)	-	22,8

6.10 – Análise de Incertezas

No processo de calibração é importante que os dados observados sejam de boa qualidade. O cenário ideal seria aquele onde não houvesse nenhum tipo de erro nas medidas. Na prática, a observação é cheia de dificuldades e erros oriundos de desajuste dos aparelhos, leituras erradas, etc. Nesta fase do trabalho propõe-se analisar a influência dos erros de medida no processo de calibração dos fatores de atrito dos tubos.

O objetivo é determinar a melhor combinação de fatores de atrito usando dados observados de forma precisa ($\sigma = 0$) e com erros de medida ($\sigma \neq 0$), onde σ é o desvio padrão das medidas.

A análise de incertezas considerou que o evento transiente foi provocado pela manobra brusca da válvula e simulado durante 10 segundos.

Para analisar a influência dos erros de medida nas cargas foram gerados ruídos de 0,5%, 1,0%, 5,0% e 10,0% na seqüência de dados sem erros. Esses ruídos foram obtidos de números aleatoriamente gerados através de uma distribuição normal padrão (média 0 e desvio padrão 1). Este procedimento tem o intuito de reproduzir os erros que ocorrem na prática. A figura 6.12 ilustra a variação temporal deste procedimento para o nó 4 sem e com os respectivos erros.

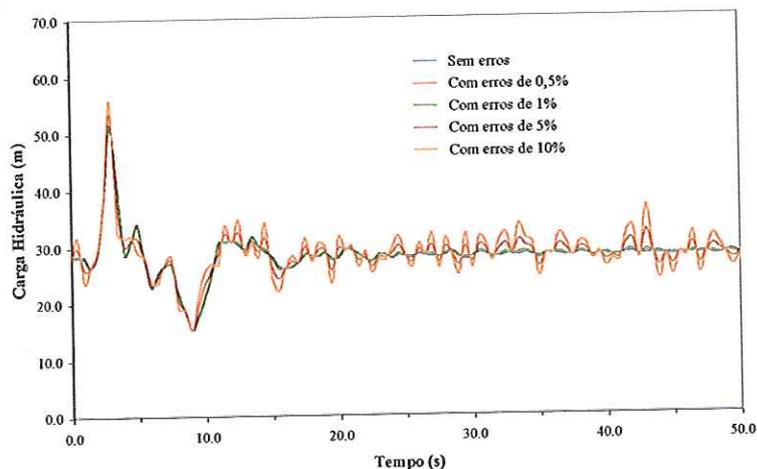


FIGURA 6.12 – Carga hidráulica transiente “observada” no nó 4 sem e com erros de medida referente à identificação dos fatores de atrito.

A calibração foi conduzida levando em consideração um local (nó 4), três (nós 2, 5 e 7) e seis (nós 2, 3, 4, 5, 6 e 7) locais de observação. A análise da influência dos erros nas medidas foi feita pelo Erro Médio Relativo (EMR), definido no capítulo 5.

Aplicando o procedimento para estabelecer as condições de estado permanente, as tabelas 6.41 e 6.42 mostram as vazões e cargas hidráulicas iniciais obtidas com o auxílio do MOC-Permanente.

TABELA 6.41 – Vazões iniciais em regime permanente arbitradas nos tubos referentes aos três casos de registros de observação.

Tubo	Q (m ³ /s)		
	1 local	3 locais	6 locais
1	0,02222	0,02440	0,02080
2	0,02378	0,02160	0,02520
3	0,01036	0,00678	0,00870
4	0,00154	0,00038	0,00049
5	0,03413	0,03080	0,02901
6	0,02387	0,02720	0,02899
7	0,00312	0,00309	0,00276
8	0,00312	0,00309	0,00276
9	0,00819	0,00730	0,01050
10	0,00070	0,00161	0,00126
11	0,01411	0,01644	0,01524

TABELA 6.42 – Cargas hidráulicas iniciais em regime permanente arbitradas nos nós referentes aos três casos de registros de observação.

Nó	H (m)		
	1 local	3 locais	6 locais
1	30,00	30,00	30,00
2	29,37	29,04	29,05
3	29,60	29,20	29,30
4	28,12	27,45	28,12
5	29,38	29,04	29,05
6	29,45	29,08	29,07
7	29,61	29,27	29,28

As tabelas 6.43, 6.44 e 6.45 mostram os fatores de atrito estimados pela calibração via MTI-AG com base nas informações sobre cargas hidráulicas consideradas observadas com e sem erros, respectivamente, no nó 4, nos nós 2, 5 e 7, e nos nós 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

O EMR dos valores estimados de fatores de atrito em todas as tubulações apresentou-se de forma decrescente, nos três casos de disponibilidade de observações sem erros, sendo 14,4%, 10,5% e 4,4% na mesma ordem. Tais resultados demonstram claramente a importância da quantidade de informações para a estimação mais acertada dos parâmetros desconhecidos, no caso presente os fatores de atrito. Verifica-se, ainda, que o acréscimo de número de pontos de observações de 1 para 3 e de 3 para 6 resultou em redução do EMR da ordem de 27,1% e 58,1%, respectivamente.

TABELA 6.43 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 com vários graus de imprecisão nas observações.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$				
		Erros de Observação				
		0,0%	0,5%	1,0%	5,0%	10,0%
1	0,020	0,020	0,023	0,024	0,024	0,031
2	0,020	0,022	0,020	0,023	0,038	0,042
3	0,020	0,024	0,029	0,028	0,029	0,017
4	0,020	0,028	0,031	0,033	0,035	0,030
5	0,020	0,022	0,020	0,018	0,014	0,015
6	0,020	0,020	0,019	0,018	0,013	0,012
7	0,020	0,022	0,025	0,029	0,033	0,034
8	0,020	0,023	0,029	0,023	0,028	0,030
9	0,020	0,022	0,031	0,033	0,040	0,038
10	0,020	0,017	0,034	0,040	0,044	0,039
11	0,020	0,026	0,030	0,030	0,034	0,036
EMR (%)	-	14,4	32,6	39,0	62,2	61,6

TABELA 6.44 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 5 e 7 com vários graus de imprecisão nas observações.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$				
		Erros de Observação				
		0,0%	0,5%	1,0%	5,0%	10,0%
1	0,020	0,026	0,026	0,024	0,024	0,016
2	0,020	0,016	0,016	0,018	0,021	0,031
3	0,020	0,020	0,018	0,020	0,014	0,015
4	0,020	0,021	0,025	0,023	0,017	0,018
5	0,020	0,023	0,021	0,024	0,034	0,034
6	0,020	0,020	0,020	0,021	0,026	0,036
7	0,020	0,022	0,025	0,021	0,022	0,017
8	0,020	0,019	0,020	0,020	0,018	0,016
9	0,020	0,018	0,017	0,018	0,017	0,013
10	0,020	0,021	0,026	0,019	0,022	0,018
11	0,020	0,023	0,024	0,019	0,014	0,013
EMR (%)	-	10,5	16,8	8,8	22,7	34,5

TABELA 6.45 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com vários graus de imprecisão nas observações.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$				
		Erros de Observação				
		0,0%	0,5%	1,0%	5,0%	10,0%
1	0,020	0,020	0,021	0,021	0,023	0,023
2	0,020	0,019	0,019	0,020	0,020	0,021
3	0,020	0,021	0,017	0,016	0,011	0,011
4	0,020	0,022	0,015	0,015	0,014	0,015
5	0,020	0,020	0,022	0,022	0,028	0,036
6	0,020	0,020	0,020	0,021	0,023	0,025
7	0,020	0,020	0,012	0,011	0,012	0,012
8	0,020	0,021	0,020	0,019	0,011	0,011
9	0,020	0,020	0,017	0,014	0,011	0,011
10	0,020	0,022	0,024	0,020	0,012	0,012
11	0,020	0,022	0,016	0,013	0,011	0,011
EMR (%)	-	4,4	14,3	17,0	33,1	38,1

No caso de observações munidas de erros em termos de coeficientes de variação de diversas ordens (0,5%, 1,0%, 5,0% e 10,0%), os erros de estimação ampliam-se com o acréscimo dos erros de observações, independentemente do número de locais de observação. Especificamente, vê-se que os EMR's que eram 14,4%, 10,5% e 4,4% nos três casos de registros de observações sem erros passaram para 32,6%, 16,8% e 14,3%, respectivamente, com a presença de erros de apenas 0,5% do coeficiente de variação. Desta forma, houve uma ampliação nos erros de estimação dos parâmetros de atrito em estudo, por um fator

multiplicador de 2,3, 1,6 e 3,2 devido ao erro de observação de 0,5%. Quando as observações carregam imprecisões grandes, da ordem de 10%, os erros médios relativos de estimação dos fatores de atrito são de 60%, 35% e 40% para os três casos de registros de observações, respectivamente.

Para estabelecer o grau de influência na estimação de fatores de atrito nas tubulações da rede-exemplo, devido à avariação de um determinado instrumento de medida, estudaram-se os erros médios relativos provocando erro de observação de 1% em nós individuais nos casos de registro de observações de carga obtidas em 3 e 6 locais de medida. As tabelas 6.46 e 6.47 apresentam as estimativas de fatores de atrito em todos os tubos e os EMR's devido às avariações individuais de instrumentos. No caso de observações em 3 locais (tabela 6.46), o EMR que era de 8,8% resultante de todos os instrumentos avariados torna-se 12,3%, 18,1% e 15,4% quando se consideram individualmente avariados os nós 2, 5 e 7 respectivamente. Percebe-se uma peculiaridade, pois os erros individuais são maiores do que o obtido conjuntamente. A despeito disso, o nó 5 desponta como o nó mais sensível em propagação do erro de observação de carga para a estimação dos fatores de atrito enquanto que o nó 2 contribui em grau menor na respectiva estimação. No caso de observações em 6 locais (tabela 6.47), o nó 6 é o mais sensível causando EMR de 21,8% enquanto o nó 4 apresenta maior robustez nesta propagação. Nota-se que este nó é exatamente onde se encontra a válvula de controle que provoca o evento transiente. Assim, do ponto de vista de dimensionamento de um projeto de calibração de uma rede hidráulica via transiente, parece recomendável eleger como locais de observação, os nós próximos ao local de ocorrência de transientes (no caso presente provocado pela manobra da válvula) para assegurar boa qualidade das estimativas de parâmetros da rede frente à ocorrência eventual de erros de observação.

TABELA 6.46 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 5 e 7 com imprecisão de 1% numa observação apenas.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$			
		Todos	nó 2	nó 5	Nó 7
1	0,020	0,024	0,022	0,025	0,023
2	0,020	0,018	0,018	0,017	0,018
3	0,020	0,020	0,020	0,017	0,026
4	0,020	0,023	0,024	0,030	0,023
5	0,020	0,024	0,019	0,023	0,024
6	0,020	0,021	0,020	0,020	0,020
7	0,020	0,021	0,024	0,026	0,030
8	0,020	0,020	0,022	0,022	0,022
9	0,020	0,018	0,020	0,017	0,022
10	0,020	0,019	0,027	0,019	0,021
11	0,020	0,019	0,024	0,023	0,021
EMR (%)	-	8,8	12,3	18,1	15,4

TABELA 6.47 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s nos nós 2, 3, 4, 5, 6 e 7 com imprecisão de 1% numa observação apenas.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$						
		Todos	nó 2	nó 3	nó 4	nó 5	nó 6	nó 7
1	0,020	0,021	0,019	0,021	0,021	0,020	0,022	0,021
2	0,020	0,020	0,021	0,019	0,019	0,020	0,019	0,019
3	0,020	0,016	0,017	0,018	0,021	0,022	0,023	0,016
4	0,020	0,015	0,012	0,016	0,022	0,031	0,037	0,011
5	0,020	0,022	0,020	0,020	0,021	0,021	0,022	0,021
6	0,020	0,021	0,021	0,020	0,019	0,019	0,020	0,020
7	0,020	0,011	0,024	0,019	0,018	0,024	0,011	0,017
8	0,020	0,019	0,017	0,022	0,021	0,021	0,020	0,021
9	0,020	0,014	0,019	0,019	0,020	0,019	0,016	0,020
10	0,020	0,020	0,028	0,022	0,026	0,019	0,016	0,019
11	0,020	0,013	0,021	0,022	0,021	0,019	0,015	0,019
EMR (%)	-	17,0	14,2	7,6	7,4	11,3	21,8	9,8

6.11 – Influência do tamanho do registro transiente

Para estudar o efeito do tempo do registro transiente na calibração da rede-exemplo, optou-se por identificar os fatores de atrito levando em consideração as seguintes situações:

- Os fatores de atrito reais são constantes e iguais a 0,020.
- Identificações com manobra suave e brusca.

- Identificações com registros de 10s, 20s, 30s, 40s e 50s.
- Dados de carga hidráulica transiente “observada” no nó 4.

As tabelas 6.48 e 6.49 apresentam os resultados da identificação dos fatores de atrito efetuada com base nos registros de 10s, 20s, 30s, 40s e 50s para as duas manobras da válvula. Observa-se que o acréscimo não influi significativamente na identificação sobretudo quando se utiliza a manobra brusca. Por isso, torna-se prudente e vantajoso utilizar-se um menor tempo de registro transiente.

TABELA 6.48 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 com vários tempos de registro transiente nas observações com o uso da manobra suave.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$				
		Tempo de Registro Transiente				
		10s	20s	30s	40s	50s
1	0,020	0,023	0,023	0,025	0,023	0,025
2	0,020	0,017	0,017	0,017	0,015	0,017
3	0,020	0,029	0,023	0,024	0,022	0,024
4	0,020	0,018	0,023	0,024	0,022	0,020
5	0,020	0,020	0,019	0,021	0,021	0,018
6	0,020	0,020	0,020	0,018	0,022	0,021
7	0,020	0,020	0,022	0,025	0,020	0,023
8	0,020	0,025	0,027	0,025	0,024	0,022
9	0,020	0,021	0,026	0,024	0,027	0,024
10	0,020	0,027	0,023	0,025	0,029	0,023
11	0,020	0,022	0,026	0,022	0,023	0,024
EMR (%)	-	15,2	16,3	18,6	17,0	14,0

TABELA 6.49 – Estimativas dos fatores de atrito obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 com vários tempos de registro transiente nas observações com o uso da manobra brusca.

Tubo	f_{real}	$f_{estimado}$				
		Tempo de Registro Transiente				
		10s	20s	30s	40s	50s
1	0,020	0,020	0,021	0,023	0,023	0,024
2	0,020	0,022	0,018	0,017	0,017	0,017
3	0,020	0,024	0,025	0,027	0,026	0,028
4	0,020	0,028	0,023	0,026	0,014	0,019
5	0,020	0,022	0,021	0,021	0,020	0,020
6	0,020	0,020	0,019	0,019	0,020	0,020
7	0,020	0,022	0,022	0,020	0,018	0,017
8	0,020	0,023	0,028	0,024	0,025	0,027
9	0,020	0,022	0,023	0,022	0,022	0,020
10	0,020	0,017	0,019	0,020	0,021	0,024
11	0,020	0,026	0,023	0,023	0,024	0,021
EMR (%)	-	14,4	13,9	14,4	14,8	14,5

6.12 – Identificação das rugosidades com AG real e binário

Nesta seção, pretende-se analisar o desempenho do algoritmo genético utilizando o código binário como representação dos parâmetros no processo de busca da solução ótima e comparando-o com o algoritmo genético real. A comparação entre as duas representações será feita mediante a calibração das rugosidades absolutas dos tubos da rede-exemplo. Todos os tubos da rede são de ferro fundido com leve oxidação ($\varepsilon = 0,30\text{mm}$), porém as informações disponíveis no problema inverso dizem respeito somente às cargas hidráulicas transientes “observadas” no nó 4 e ao intervalo de rugosidades, $0,01\text{mm} \leq \varepsilon \leq 0,50\text{mm}$.

O evento transiente será provocado pela manobra suave da válvula localizada no nó 4. O intervalo de tempo, Δt , para a simulação computacional foi de 0,5s. O transiente foi simulado para um tempo de registro de 10s.

• Codificação Binária

Para a representação das variáveis de decisão (no caso, o conjunto das rugosidades absolutas), um formato de cadeia foi preparado. A Figura 6.13 ilustra o formato da cadeia

binária que será usada nesta identificação, onde o grupo de rugosidades dos onze tubos da rede-exemplo será representado por um vetor de 66 posições.

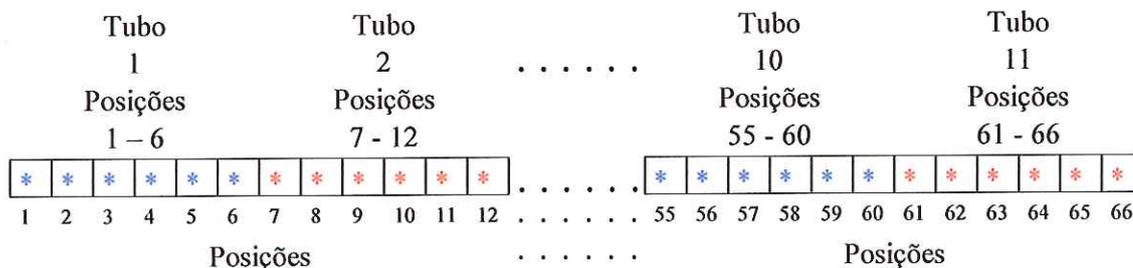


FIGURA 6.13 – Formato da cadeia binária na representação das rugosidades.

A rugosidade absoluta de cada tubo é codificada por um número binário de 6 dígitos, permitindo a codificação de números decimais no intervalo de 1 a 50 (codificação discreta) correspondendo ao intervalo disponibilizado. A tabela 6.50 mostra a correspondência entre o número binário e o respectivo decimal.

TABELA 6.50 – Representação binária dos valores decimais das rugosidades.

Número Decimal	Número Binário	Rugosidade Absoluta (mm)
1	0 0 0 0 0 1	0,01
2	0 0 0 0 1 0	0,02
3	0 0 0 0 1 1	0,03
4	0 0 0 1 0 0	0,04
5	0 0 0 1 0 1	0,05
6	0 0 0 1 1 0	0,06
7	0 0 0 1 1 1	0,07
8	0 0 1 0 0 0	0,08
9	0 0 1 0 0 1	0,09
•	• • • • • •	•
•	• • • • • •	•
•	• • • • • •	•
48	1 1 0 0 0 0	0,48
49	1 1 0 0 0 1	0,49
50	1 1 0 0 1 0	0,50

As condições iniciais para a estimação foram:

- População de soluções, NC : 100
- Tipo de cruzamento: um ponto
- Probabilidade de cruzamento, p_c : 100%

- Tipo de mutação: simples
- Probabilidade de mutação, p_m : 0,5%
- Taxa de elitismo, p_e : 50%
- Taxa de sucessão, p_s : 50%
- Número de gerações, NG : 100
- Tempo de simulação transiente: 10s
- Intervalo de tempo computacional, Δt : 0,5s
- Nós monitorados: um (nó 4)

A tabela 6.51 mostra as rugosidades absolutas estimadas pela calibração via MTI, usando AG com representações real e binária, com base nas informações sobre carga hidráulica transiente no nó 4. Observa-se que a representação real produz um menor erro na estimação das rugosidades, apresentando um EMR de 19,8% enquanto a representação binária contribui com 27,2% na estimação. Os valores dos erros na função objetivo também foram menores na representação real. A figura 6.14 ilustra as estimativas das rugosidades para as duas representações. A figura 6.15 apresenta o desempenho da função objetivo para as duas representações em um dos 10 processamentos efetuados na estimação. O tempo médio de CPU, para um único processamento, usando representação real foi de 201,3 segundos enquanto que na representação binária este tempo foi de 223,9 segundos.

TABELA 6.51 – Estimativas das rugosidades absolutas obtidas do registro de carga hidráulica de 10s no nó 4 usando AG com representações real e binária.

Tubo	e_{real} (mm)	$e_{estimado}$ (mm)					
		AG Real	EA*	ER (%)**	AG Binário	EA*	ER (%)**
1	0,30	0,32	0,02	6,3	0,32	0,02	6,3
2	0,30	0,24	0,06	21,0	0,25	0,06	18,3
3	0,30	0,23	0,07	23,0	0,19	0,11	36,0
4	0,30	0,18	0,12	40,7	0,17	0,13	42,7
5	0,30	0,35	0,05	16,7	0,35	0,05	17,3
6	0,30	0,34	0,04	11,7	0,34	0,04	13,0
7	0,30	0,18	0,12	40,7	0,22	0,08	27,3
8	0,30	0,29	0,01	2,7	0,23	0,07	23,0
9	0,30	0,17	0,13	42,3	0,20	0,10	33,7
10	0,30	0,32	0,02	7,3	0,14	0,16	54,0
11	0,30	0,29	0,02	5,0	0,22	0,08	27,0
EMR (%)	-	-	-	19,8	-	-	27,2

* EA = erro absoluto; ** ER = erro relativo

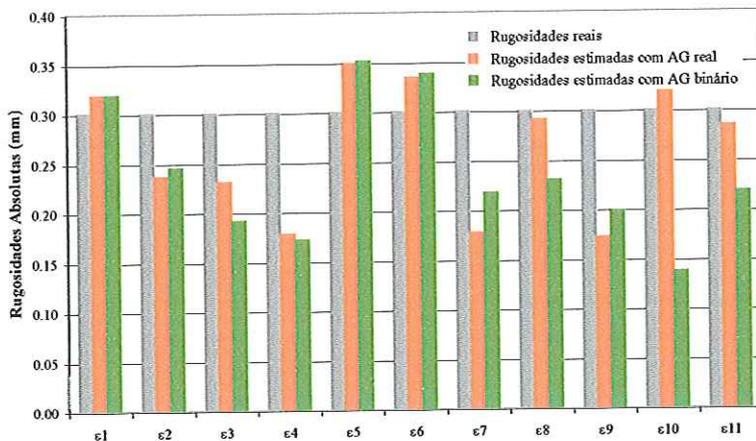


FIGURA 6.14 – Rugosidades reais e estimadas usando AG com representações real e binária.

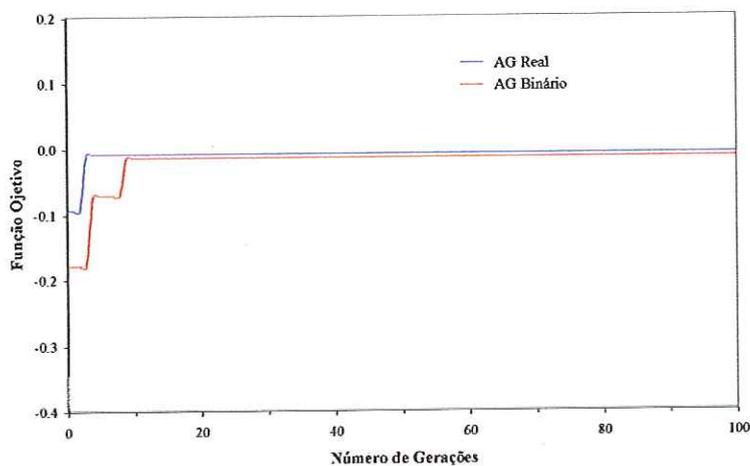


FIGURA 6.15 – Desempenho da função objetivo usando AG com representações real e binária.

7 – CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a estudar a calibração de redes de distribuição de água a partir de dados observados de cargas hidráulicas transientes. Elaborou-se um procedimento para resolução do problema inverso em redes hidráulicas e o mesmo é resolvido utilizando uma abordagem indireta que compara respostas transientes disponíveis de carga hidráulica com dados semelhantes calculados através de um método matemático, o Método das Características. O Método Transiente Inverso (MTI) com um Algoritmo Genético (AG) emprega o Método das Características (MOC) na solução das equações do movimento para escoamento transiente em uma rede hidráulica.

Na resolução do problema inverso aqui proposto, foram consideradas cinco situações específicas de calibração ou identificação de parâmetros: a) fatores de atrito; b) rugosidades absolutas; c) diâmetros; d) vazamentos; e) fatores de atrito e vazamentos, simultaneamente. Foi investigada, também, a influência dos erros de leitura nas cargas hidráulicas, o tempo de registro transiente e a utilização das codificações binária e real na representação dos parâmetros desconhecidos. O comportamento transiente foi imposto individualmente por duas manobras de válvula, uma suave e outra brusca. As condições iniciais de regime permanente foram calculadas por um programa computacional para todas as situações específicas.

Uma rede hidráulica simples com uma válvula de controle foi usada para o projeto, síntese e demonstração da eficácia do MTI-AG. Embora uma rede simples tenha sido considerada neste trabalho para demonstrar em detalhe um procedimento para a formulação de um algoritmo de solução do problema inverso, presume-se que o mesmo procedimento possa ser usado para a calibração de redes mais complexas.

Na identificação dos fatores de atrito, o procedimento de identificação encontrou mais dificuldade na estimação quando os valores reais são variados. A estimação dos fatores de atrito apresentou maior acerto quando um evento transiente mais brusco foi introduzido tanto com o conjunto de fatores de atrito reais constantes como variados.

Na identificação das rugosidades absolutas dos tubos da rede, três casos baseados no grau de conhecimento sobre o tipo e homogeneidade do material dos tubos foram estudados. Os resultados obtidos permite concluir que:

- Quanto maior o grau de conhecimento a respeito do material dos tubos, mais eficiente é a calibração das rugosidades absolutas dos tubos;
- Um erro elevado na estimação das rugosidades absolutas não corresponde necessariamente a um alto erro nos valores dos fatores de atrito equivalentes às estimativas destas rugosidades. Na situação de completo desconhecimento a respeito do material (caso 1) com manobra brusca da válvula e utilizando-se rugosidades reais variadas, o EMR na estimação das rugosidades foi de 54,1% enquanto que nos fatores de atrito este erro foi de 13,0%;
- O processo de calibração via estimativa das rugosidades absolutas aponta como um procedimento mais adequado em relação à estimativa direta dos fatores de atrito. Este fato pode ser atribuído à consideração da variabilidade temporal da vazão durante o evento transiente;
- A influência do uso das duas manobras da válvula depende diretamente do grau de conhecimento que se tem do tipo de material e homogeneidade dos tubos. Em virtude disso, afirmar que uma manobra é mais eficaz que outra parece ser precipitado.

A estimação dos diâmetros, como no caso das estimativas das rugosidades, é mais eficiente na medida em que se diminui a faixa de diâmetros mínimo e máximo, ou seja, amplia-se o conhecimento em torno da rede. A manobra brusca da válvula sempre obteve uma melhor estimação. O processo de estimação dos diâmetros revelou-se muito mais instável em comparação à identificação dos fatores de atrito e rugosidades absolutas. A posição dos diâmetros na equação da energia (elevados a quinta potência) parece ser responsável por esta instabilidade pois pequenas mudanças nos valores dos diâmetros resultariam em grandes alterações no cálculo da carga hidráulica transiente.

Este trabalho se propôs, também, a estudar a viabilidade da identificação e quantificação de vazamentos em uma rede hidráulica. O método mostrou-se eficiente na identificação e quantificação tanto para o caso da ocorrência de um quanto de dois vazamentos na rede hidráulica apresentando elevados índices de acerto. O método MTI-AG foi mais eficaz na identificação de vazamentos quando a rede foi submetida a um evento transiente mais brusco. O método também foi eficaz quando o problema inverso continha como desconhecidos os vazamentos e os fatores de atrito. A calibração foi realizada simultaneamente e mostrou bons resultados. Novamente, a manobra brusca da válvula produziu melhores estimativas.

Estudou-se a qualidade da estimação dos fatores de atrito aplicando desvios variados nos registros de carga hidráulica. Erros seguindo distribuição Gaussiana foram introduzidos

nestes registros com diversos coeficientes de variação para representar defeitos nos instrumentos de medida. Nesta fase de análise de incertezas optou-se pela calibração com o uso de mais de um local de observação de carga. Os resultados revelam que:

- Quanto mais amplo o programa de observações de cargas na rede, menor o erro de estimação dos fatores de atrito, haja ou não erros nas medidas;
- Alguns locais de observação da rede apresentam maior robustez em termos de propagação de erros de observação para os erros médios de estimação;
- Os nós próximos ao local de ocorrência do transiente fornecem registros de dados que conduzem às estimativas de maior qualidade dos parâmetros sob calibração.

Ao analisar-se a influência do tempo de registro transiente na calibração dos fatores de atrito da rede, observou-se que o acréscimo no tamanho do registro não influenciou significativamente na identificação, sobretudo quando a rede é submetida a uma evento transiente brusco.

• Sobre o método de busca

O estudo dos Algoritmos Genéticos é especialmente motivante, pois aguça o espírito investigativo e criativo do aplicador, que se depara com possibilidades ilimitadas e simples de aplicações. O AG aplicado neste estudo mostrou-se compatível para a calibração de redes hidráulicas, auxiliando sobremaneira o método inverso na busca da solução ótima. Como dito anteriormente, os AG's apresentam vantagens e desvantagens. Dentre as vantagens, ressalta-se que os mesmos não exigem conhecimentos matemáticos muito complexos para a sua aplicação, tratando-se de técnica conceitualmente simples, prescindindo de fórmulas matemáticas complexas para utilização de seus operadores. O método é bastante flexível, permitindo várias formas de aplicação de seus operadores como seleção (roleta, elitismo), codificação (real, binária), cruzamento (de um ponto, aritmético) e mutação (simples, uniforme), assim como da Função Objetivo, possibilitando ao usuário sua aplicação da melhor forma ao problema estudado. Uma desvantagem reside no fato de sua menor velocidade de convergência, quando comparada aos demais métodos de otimização.

O AG utilizado neste trabalho foi adequado ao problema proposto, proporcionando resultados satisfatórios. A codificação e os operadores seleção com elitismo, cruzamento, mutação e sucessão foram aplicados com sucesso. Verificou-se que a codificação real apresentou melhores resultados além de consumir menos tempo de processamento. Com

relação à mutação observou-se que foi aplicada com probabilidade pequena, uma vez que contribuiu pouco para alterar a população de soluções no decorrer das gerações.

• Conclusão Geral

O processo de calibração via Método Transiente Inverso (MTI) utilizando-se Algoritmo Genético aponta como um procedimento promissor na identificação dos diversos parâmetros da rede, na identificação de vazamentos e na avaliação do estado das redes hidráulicas em uso.

O método mostrou-se viável e aplicável à solução de problema inverso em redes hidráulicas, sobretudo recorrendo-se a poucos dados observados e ao desconhecimento das condições iniciais de estado permanente.

Finalmente, salvo melhor juízo e a despeito de sempre se ter o tempo como maior adversário, tem-se que o trabalho cumpriu os objetivos propostos, não havendo avaliação que possa mensurar o aprendizado e a satisfação pessoal que a conclusão do presente estudo proporcionou para o autor.

• Proposições

Neste trabalho, mostrou-se que o Método Transiente Inverso com Algoritmo Genético pode ser usado na calibração de diversos parâmetros de redes de distribuição de água. No entanto, os estudos realizados representam apenas um passo preliminar para uma aplicação prática do MTI-AG. Há ainda algumas questões a serem investigadas:

- Aplicação da metodologia a um caso real.
- O efeito de outros tipos de eventos transientes na identificação dos parâmetros tais como partida e parada de bombas e variação temporal da demanda;
- A identificação de vazamentos que ocorrem no interior das tubulações de formas e dimensões variadas;
- Aplicação da técnica do algoritmo genético conjuntamente com outra técnica de otimização convencional com o objetivo de aumentar a velocidade de convergência e refinar os resultados.

ANEXO A

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES DA CONTINUIDADE E DO MOVIMENTO

A.1 – Teorema de Transporte de Reynolds

Esse teorema relaciona a variação de fluxo de uma quantidade de massa de fluido, chamada de *sistema*, através de uma região chamada de *volume de controle*. A parte externa do sistema é chamada de *vizinhança do sistema*, e o contorno do sistema separa o sistema da vizinhança. O contorno do volume de controle é chamado de *superfície de controle*. Em escoamentos de fluidos, o sistema geralmente muda de forma quando se desloca. Um volume de controle geralmente permanece fixo.

Todas as leis da mecânica (conservação da massa, conservação do momento, etc) aplicam-se ao sistema. Essas leis descrevem a interação entre o sistema e a vizinhança do sistema e geralmente especifica a taxa de variação de alguma propriedade do sistema. Por exemplo, a segunda lei de Newton do movimento relaciona a taxa de variação do momento de um sistema e as forças exercidas pela vizinhança. Usando o conceito de volume de controle, os contornos do sistema e o volume de controle são os mesmos em um determinado instante. Em outras palavras, toda a massa do sistema está contida no volume de controle.

Seja B uma propriedade extensiva (momento, energia) de um fluido, e seja β a correspondente propriedade intensiva. Uma propriedade intensiva é definida como a quantidade de B por unidade de massa de um sistema:

$$\beta = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta m}$$

a.1

A quantidade total de B no volume de controle, B_{VC} , é:

$$B_{VC} = \int_C \beta \rho dV \quad \text{a.2}$$

onde: m = massa; ρ = massa específica; dV = volume diferencial do fluido.

Seja um volume de controle fixo no espaço e sem variação de forma em relação ao tempo. Considere o sistema nos tempos t e $t + \Delta t$, como mostrado na figura a.1. A superfície de controle é mostrada em linhas tracejadas, e os contornos do sistema são representados pelas linhas cheias. Para o tempo t , parte do sistema está dentro do volume de controle e outra parte move-se em direção ao volume de controle. No tempo $t + \Delta t$, parte do sistema está dentro do volume de controle e outra parte moveu-se para fora do mesmo. A propriedade B do sistema para os tempos t e $t + \Delta t$ podem ser escritos como:

$$B_{SIST}(t) = B_{VC}(t) + \Delta B_{ENT} \quad \text{a.3}$$

e

$$B_{SIST}(t + \Delta t) = B_{VC}(t + \Delta t) + \Delta B_{SAI} \quad \text{a.4}$$

onde: $SIST$ e VC referem-se ao sistema e volume de controle, respectivamente; ENT e SAI referem-se a fluxo de entrada e fluxo de saída do volume de controle, respectivamente; ΔB_{ENT} e ΔB_{SAI} são o fluxo de entrada e fluxo de saída da propriedade B entrando e saindo do volume de controle durante o intervalo de tempo Δt .

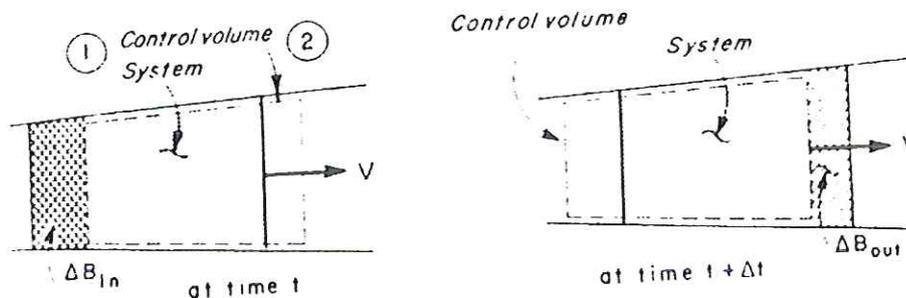


FIGURA a.1 – Sistema e volume de controle

A taxa de variação da propriedade B do sistema pode ser escrita como:

$$\frac{dB_{SIST}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{B_{SIST}(t + \Delta t) - B_{SIST}(t)}{\Delta t} \quad a.5$$

Substituindo as equações (a.3) e (a.4) na equação (a.5), vem:

$$\frac{dB_{SIST}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{B_{vc}(t + \Delta t) - B_{vc}(t)}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{SU}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{ENT}}{\Delta t} \quad a.6$$

O primeiro termo no lado direito da equação (a.6) representa a taxa de variação da propriedade B no volume de controle, isto é:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{B_{vc}(t + \Delta t) - B_{vc}(t)}{\Delta t} = \frac{dB_{vc}}{dt} \quad a.7$$

Substituindo a equação (a.2) na equação (a.7) fica:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{B_{vc}(t + \Delta t) - B_{vc}(t)}{\Delta t} = \frac{d}{dt} \int_{vc} \beta \rho dV \quad a.8$$

O segundo termo no lado direito da equação (a.6) é a taxa com que a propriedade B está deixando o volume de controle. De maneira análoga, o termo terceiro termo dessa equação representa a taxa com que a propriedade B está entrando no volume de controle. Para escoamento unidimensional, pode-se escrever:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{SU}}{\Delta t} = (\beta \rho A V_{SC})_{SU} \quad a.9$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta B_{ENT}}{\Delta t} = (\beta \rho A V_{SC})_{ENT} \quad a.10$$

onde: A = área da seção transversal do conduto; e V_{SC} = velocidade média relativa à superfície de controle.

Utilizando as equações (a.8), (a.9) e (a.10), a equação (a.6) pode ser escrita como:

$$\frac{dB_{SIST}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_C \beta \rho dV + (\beta \rho A V_{SC})_{SA} - (\beta \rho A V_{SC})_{ENT} \quad \text{a.11}$$

Para um volume de controle fixo, $V_{SC} =$ velocidade do fluido, V . Entretanto, se o volume de controle expande-se ou contrai-se em relação ao tempo, então a superfície de controle não é fixa e V_{SC} na equação (a.11) é velocidade relativa: $V_{SC} = (V - W)$, onde W é a velocidade da superfície de controle na seção 1 para fluxo de entrada e na seção 2 para fluxo de saída. V e W são medidas em relação ao eixo das abcissas. Portanto, uma forma geral da equação (a.11) para um volume de controle expandindo-se ou contraindo-se em um escoamento unidimensional pode ser escrita como:

$$\frac{dB_{SIST}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_C \beta \rho dV + [\beta \rho A (V - W)]_{SA} - [\beta \rho A (V - W)]_{ENT} \quad \text{a.12}$$

Esse é o teorema de transporte de Reynolds que relaciona as propriedades do sistema no volume de controle.

A.2 - Equação da Continuidade

Para a dedução da equação da continuidade, será aplicado a lei da conservação da massa. Considere o escoamento de um fluido compressível em um conduto de paredes elásticas. A superfície de controle compreende as seções 1 e 2 e a superfície interna das paredes do conduto (figura a.2). Devido à variação de pressão, o volume de controle pode contrair-se ou expandir-se. Seja W_1 e W_2 as velocidades devido à expansão e contração, respectivamente. Considere que o escoamento é unidimensional e a pressão é uniforme nas seções do volume de controle. A velocidade radial devido à expansão e contração radiais são pequenas e não estão incluídas na análise. Entretanto, os efeitos da expansão e contração radiais são importantes e são levadas em consideração. A distância x , a velocidade V , e a vazão Q são consideradas positivas na direção de jusante.

Para aplicar o teorema de transporte de Reynolds para a conservação da massa, a propriedade intensiva do fluido é massa/unidade de massa, ou:

$$\beta = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta m} = 1 \quad \text{a.13}$$

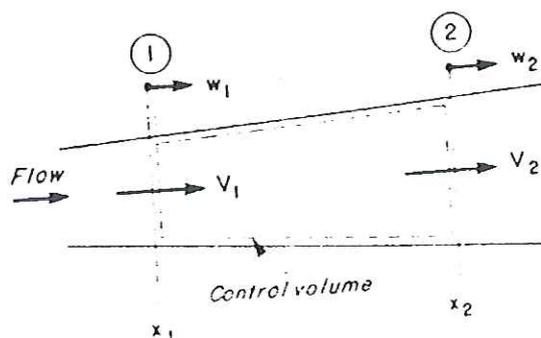


FIGURA a.2 – Volume de controle para a equação da continuidade

sabendo que a taxa de variação da massa no sistema permanece constante ($dM_{SIST}/dt = 0$), aplica-se a equação (a.12) ao volume de controle mostrado na figura a.2 com $\beta = 1$, obtêm-se:

$$\frac{d}{dt} \int_{x_1}^{x_2} \rho A dx + \rho_2 A_2 (V_2 - W_2) - \rho_1 A_1 (V_1 - W_1) = 0 \quad \text{a.14}$$

Aplicando a regra de Leibnitz ao primeiro termo no lado esquerdo, obtêm-se:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho A) dx + \rho_2 A_2 \frac{dx_2}{dt} - \rho_1 A_1 \frac{dx_1}{dt} + \rho_2 A_2 (V_2 - W_2) - \rho_1 A_1 (V_1 - W_1) = 0 \quad \text{a.15}$$

Notando que $dx_2/dt = W_2$ e $dx_1/dt = W_1$, a equação (a.15) torna-se:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho A) dx + (\rho AV)_2 - (\rho AV)_1 = 0 \quad \text{a.16}$$

De acordo com o teorema do valor principal, essa equação torna-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A)\Delta x + (\rho AV)_2 - (\rho AV)_1 = 0 \quad \text{a.17}$$

onde: $\Delta x = x_2 - x_1$. Dividindo a equação (a.17) por Δx e fazendo Δx tender a zero, vem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho AV) = 0 \quad \text{a.18}$$

Expandindo os termos nos parênteses:

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial x} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad \text{a.19}$$

Rearrumando termos, usando expressões para a derivada total, e dividindo por ρA , vem:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dx} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{a.20}$$

Para escrever essa equação em função das variáveis de interesse: pressão, p ; e velocidade, V ; as derivadas de ρ e A são expressas em função de p e V .

Define-se o módulo de elasticidade, K , de um fluido por:

$$K = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad \text{a.21}$$

Essa equação pode ser escrita como:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{K} \frac{dp}{dt} \quad \text{a.22}$$

Para um conduto circular de raio R :

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R \frac{dR}{dt} \quad \text{a.23}$$

Em termos da tensão, ε , pode-se escrever essa equação como:

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi R^2 \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad \text{a.24}$$

ou

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = 2 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{a.25}$$

Assumir que as paredes do conduto são linearmente elásticas (tensão é proporcional ao cisalhamento). Isso é verdade para a maioria dos materiais usados para as paredes do conduto (metal, madeira, concreto). Então:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2 - \mu\sigma_1}{E} \quad \text{a.26}$$

onde: σ_2 = tensão radial; σ_1 = tensão axial; e μ = raio de Poisson. Para simplificar a derivação, assume-se que o conduto tem expansão longitudinal, $\sigma_1 = 0$. Então, a equação (a.26) torna-se:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2}{E} \quad \text{a.27}$$

A tensão radial em um conduto com paredes de pequena espessura tendo pressão interna p é:

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2e} \quad \text{a.28}$$

onde: e = espessura das paredes do conduto; e D = diâmetro do conduto.

Derivando a equação (a.28) em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{d\sigma_2}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad \text{a.29}$$

Usando a equação (a.27), a equação (a.29) torna-se:

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{p}{2e} \frac{dD}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad \text{a.30}$$

Usando as equações (a.23) e (a.25), a equação (a.29) torna-se:

$$E \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{pD}{2e} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad \text{a.31}$$

a qual pode ser simplificada para:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\frac{D}{2e} \frac{dp}{dt}}{E - \frac{pD}{2e}} \quad \text{a.32}$$

Das equações (a.25) e (a.32):

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{\frac{D}{e} \frac{dp}{dt}}{E - \frac{pD}{2e}} \quad \text{a.33}$$

Substituindo as equações (a.22) e (a.33) na equação (a.20), vem:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\frac{eE}{D} - \frac{p}{2}} \right) \frac{dp}{dt} \quad \text{a.34}$$

Como $p/2 \ll eE/D$ na maioria das aplicações, essa equação pode ser escrita como:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{\frac{eE}{DK}} \right) \frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{a.35}$$

A velocidade da onda ou celeridade é definida como:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{DK}{eE}}} \quad \text{a.36}$$

Substituindo a equação (a.36) e a expressão para a derivada total na equação (a.35) resulta:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{a.37}$$

Essa é a equação da continuidade.

A.3 - Equação do Movimento

Para a conservação do momento, a propriedade extensiva B é o momento = mV . Entretanto, a propriedade intensiva correspondente é:

$$\beta = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} V(\Delta m / \Delta m) = V \quad \text{a.38}$$

De acordo com a segunda lei de Newton do movimento, a taxa de variação do momento de um sistema é igual a soma das forças exercidas no sistema pela vizinhança:

$$\frac{dM_{SIST}}{dt} = \sum F \quad \text{a.39}$$

Então, substituindo $\beta = V$ na equação (a.12) e usando a equação (a.39), obtém-se:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial}{\partial t} (\rho AV) dx + (\rho AV)_2 W_2 - (\rho AV)_1 W_1 + [\rho A(V - W)V]_1 - [\rho A(V - W)V]_2 = \sum F \quad \text{a.40}$$

Simplificando esta equação, aplicando o teorema do valor principal ao primeiro termo, e dividindo por Δx :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho AV) + \frac{(\rho AV^2)_2 - (\rho AV^2)_1}{\Delta x} = \frac{\sum F}{\Delta x} \quad \text{a.41}$$

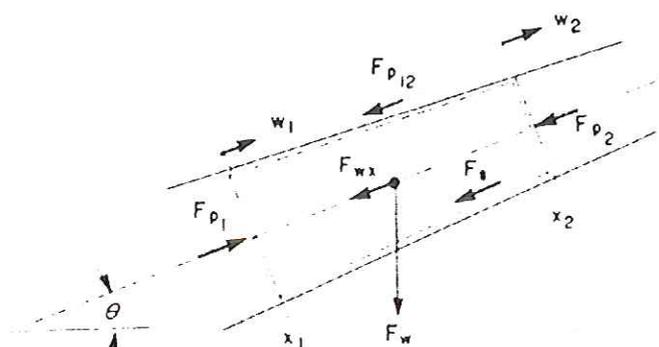


FIGURA a.3 – Volume de controle para a equação do momento.

As forças que estão agindo no volume de controle (figura a.3) são:

- Força de pressão na seção 1:

$$F_{p1} = p_1 A_1 \quad \text{a.42}$$

onde: p_1 = pressão na seção 1.

- Força de pressão na seção 2:

$$F_{p2} = p_2 A_2 \quad \text{a.43}$$

- Força de pressão na zona intermediária:

$$F_{p12} = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(A_1 - A_2) \quad \text{a.44}$$

- Componente do peso do fluido ao longo do eixo central do conduto:

$$F_{wx} = \rho g A (x_2 - x_1) \text{sen } \theta \quad \text{a.45}$$

onde: θ = ângulo que o conduto faz com a horizontal; é considerado positivo se a cota do conduto cresce na direção a jusante.

- Força de cisalhamento:

$$F_s = \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad \text{a.46}$$

onde: τ_0 = tensão de cisalhamento entre o fluido e as paredes do conduto.

Considere como escoamento positivo a direção a jusante. O somatório das forças será:

$$\sum F = \frac{1}{2}(p_1 - p_2)(A_1 + A_2) - \rho g A (x_2 - x_1) \text{sen } \theta - \tau_0 \pi D (x_2 - x_1) \quad \text{a.47}$$

Dividindo a equação (a.47) por $\Delta x = x_2 - x_1$ fornece:

$$\frac{\sum F}{\Delta x} = \frac{(p_1 - p_2)(A_1 + A_2)}{2\Delta x} - \rho g A \text{sen } \theta - \tau_0 \pi D \quad \text{a.48}$$

Substituindo a equação (a.48) na equação (a.41) e tendendo Δx a zero no limite, vem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho A V) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A V^2) + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \text{sen } \theta + \tau_0 \pi D = 0 \quad \text{a.49}$$

É aceitável, em aplicações práticas, assumir que a perda de carga durante o transitório ser a mesma no estado permanente. Experimentos de Darcy-Weisbach indicam a seguinte equação para o termo do atrito:

$$\tau_o = \frac{1}{8} \rho f V |V| \quad \text{a.50}$$

onde: f = fator de atrito de Darcy-Weisbach. O uso de $V/|V|$ no lugar de V^2 deve-se pelo fato da ocorrência do fluxo reverso. Substituindo esta expressão na equação (a.49) e expandindo os termos nos parênteses, vem:

$$\begin{aligned} V \frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \rho A \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial x}(\rho A V) + \rho A V \frac{\partial V}{\partial x} \\ + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \text{sen } \theta + \frac{\rho A f V |V|}{2D} = 0 \end{aligned} \quad \text{a.51}$$

Rearrmando os termos:

$$\begin{aligned} V \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho A) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A V) \right] + \rho A \frac{\partial V}{\partial t} + \rho A V \frac{\partial V}{\partial x} \\ + A \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g A \text{sen } \theta + \frac{\rho A f V |V|}{2D} = 0 \end{aligned} \quad \text{a.52}$$

De acordo com a equação da continuidade (equação a.18), a soma dos dois primeiros termos no colchetes é zero. Dividindo a equação resultante por ρA , obtém-se:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \text{sen } \theta + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad \text{a.53}$$

Essa equação é conhecida como equação do momento.

ANEXO B

TESTES PILOTOS DO ALGORITMO GENÉTICO

Este anexo contém os passos da construção do algoritmo genético utilizado na pesquisa. Apresenta os conceitos, estrutura, aplicações e o desenvolvimento do AG nas representações binária e real. Os testes contemplam comparações entre os diversos parâmetros do AG.

B.1 – Estrutura do primeiro AG (extraído de GEN e CHENG, 1997)

População inicial: gera-se uma população inicial aleatoriamente. O tamanho da população é designado por NC .

Avaliação: calcula-se o valor da função objetivo que é igual ao valor da aptidão. Após feita a avaliação da população inicial, as variáveis são convertidas para o sistema binário.

Seleção: adota-se o procedimento “roda da roleta”. Esse procedimento faz parte de uma seleção proporcional à aptidão e pode selecionar uma nova população em função da probabilidade. O esquema é mostrado a seguir:

1. Calcula-se a aptidão para cada cromossomo v_k :

$$\text{aptidão}(v_k) = FO(x), \quad k = 1, 2, \dots, NC \quad \text{b.1}$$

onde: $FO(x)$ é o valor da função objetivo

2. Calcula-se a aptidão total:

$$F = \sum_{k=1}^{NC} \text{aptidão}(v_k) \quad \text{b.2}$$

3. Calcula-se a probabilidade de seleção p_k para cada cromossomo v_k :

$$p_k = \frac{\text{aptidão}(v_k)}{F} \quad \text{b.3}$$

4. Calcula-se a probabilidade cumulativa q_k para cada cromossomo v_k :

$$q_k = \sum_{j=1}^k p_j, \quad k = 1, 2, \dots, NC \quad \text{b.4}$$

5. Gera-se um número aleatório r do intervalo $[0,1]$.

6. Se $r \leq q_1$, então seleciona-se o primeiro cromossomo v_1 , senão seleciona-se o k -ésimo cromossomo v_k ($2 \leq k \leq NC$) tal que $q_{k-1} < r \leq q_k$.

Cruzamento: O cruzamento usado é de um ponto, escolhido aleatoriamente. A probabilidade de cruzamento é designada por p_c . O procedimento é o seguinte:

início

$k \leftarrow 0$

enquanto ($k \leq NC$) faça

$r_k \leftarrow$ número aleatório entre $[0,1]$

se ($r_k < p_c$) então

selecionar v_k para cruzamento

fim do se

$k \leftarrow k+1$

fim do enquanto

fim

Mutação: a mutação altera um ou mais genes com uma probabilidade igual a taxa de mutação, p_m . Cada bit tem uma chance igual de ser mudado. É necessário, então, gerar um número aleatório r_k ($k = 1, \dots, NPOP$), onde $NPOP$ é o número total de genes ($NPOP = NC \times NB$). Portanto, o número de genes a serem mudados pode ser calculado como:

$$NGENE = p_m \times NC \quad \text{b.5}$$

Reavaliação: após sofrer mutação, a população é transformada em número decimal e substituída na aptidão. Os valores da aptidão são arquivados e obtém-se o valor máximo para esta geração.

Critério de parada: estudos apontam que após 1000 gerações, o AG produz resultados satisfatórios.

B.2 - Aplicação

Exemplo 1 (extraído de GALVÃO et al., 1999):

$$\begin{aligned} \max f(x) &= x \operatorname{sen}(10\pi x) + 1 \\ \text{sujeito a: } &-1 \leq x \leq 2 \end{aligned}$$

Solução:

- | | |
|--|----------|
| ➤ Representação dos parâmetros: | binária |
| ➤ População de soluções, NC : | 30 |
| ➤ Tipo de cruzamento: | um ponto |
| ➤ Probabilidade de cruzamento, p_c : | 100 % |
| ➤ Tipo de mutação: | simples |
| ➤ Probabilidade de mutação, p_m : | 5,0 % |
| ➤ Comprimento do cromossomo, NB : | 15 |
| ➤ Número de gerações, NG : | 1000 |

TABELA b.1 – Valores ótimos referentes ao exemplo 1.

	AG _{livro}	AG _{programa}	ER (%)
x	1,8506	1,8515	0,049
$f(x)$	2,8503	2,8512	0,032

onde ER é o erro relativo.

Exemplo 2 (extraído de GEN e CHENG, 1997):

$$\max f(x_1, x_2) = 21,5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(20\pi x_2)$$

sujeito a: $-3,0 \leq x_1 \leq 12,1$

$$4,1 \leq x_2 \leq 5,8$$

Solução:

- Representação dos parâmetros: binária
- População de soluções, NC : 30
- Tipo de cruzamento: um ponto
- Probabilidade de cruzamento, p_c : 100 %
- Tipo de mutação: simples
- Probabilidade de mutação, p_m : 5,0 %
- Comprimento do cromossomo, NB : 33
- Número de gerações, NG : 1000

TABELA b.2 – Valores ótimos referentes ao exemplo 2

	AG _{livro}	AG _{programa}	ER (%)
x_1	11,6314	11,6251	0,054
x_2	5,7248	5,7272	0,042
$f(x)$	38,8182	38,8155	0,007

Exemplo 3: idêntico ao exemplo 2, mas com $NC=10$

Resultados:

TABELA b.3 – Valores ótimos referentes ao exemplo 3.

	AG_{livro}	$AG_{programa}$	ER (%)
x_1	11,6314	11,6273	0,035
x_2	5,7248	5,6270	1,708
$f(x)$	38,8182	38,7340	0,217

Exemplo 4: idêntico ao exemplo 2, mas com cruzamento de dois pontos.

Cruzamento: dois pontos de corte. O comprimento do *string* ($COMP$) intermediário foi testado para diversos valores: $2 \leq COMP \leq 15$.

Resultados:

TABELA b.4 – Valores ótimos referentes ao exemplo 4.

	COMP													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
x_1	11,6198	11,6237	11,6239	11,6246	11,6278	11,6245	11,6270	11,6323	11,6195	11,6212	11,6395	11,6275	11,6267	11,6244
x_2	5,6325	5,7269	5,7306	5,7261	5,7313	5,7304	7,7274	5,7305	5,7266	5,7323	5,7276	5,7248	5,6272	5,7277
$f(x)$	38,4046	38,7916	38,7259	38,7779	38,7196	38,7484	38,8376	38,7832	38,7074	38,5499	38,8337	38,7349	38,7334	38,8136

Observa-se que houve uma melhora nos valores ótimos quando se utiliza um cruzamento de dois pontos de *string* intermediário de 8 e 12. Não podemos estabelecer um número padrão de $COMP$ para outros problemas pois é necessário testá-lo. Nota-se, ainda, que os valores de $COMP$ igual a 8 foram os melhores, inclusive com os da referência.

Exemplo 5: idêntico ao exemplo 2, mas com representação real.

Cruzamento: o cruzamento utilizado foi o aritmético (MICHALEWICZ, 1994). Dado dois cromossomos pais p_1 e p_2 , os cromossomos filhos c_1 e c_2 são produzidos da seguinte forma:

$$c_i = \beta p_i + (1 - \beta) p_2 \quad (\text{b.6})$$

$$c_2 = (1 - \beta) p_1 + \beta p_2 \quad (\text{b.7})$$

onde β é um número aleatório entre $[0,1]$.

Mutação: foi utilizada a mutação limite (MICHALEWICZ, 1994). É a substituição do gene por um dos limites do intervalo permitido das variáveis $[a_i, b_i]$. Dado um cromossomo p com o j -ésimo gene selecionado para mutação. O cromossomo c é produzido da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} a_i & \text{se } r < 0,5 \text{ e } i = j \\ b_i & \text{se } r \geq 0,5 \text{ e } i = j \\ p_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{b.8})$$

onde r é um número aleatório no intervalo $[0,1]$.

Resultados:

TABELA b.5 – Valores ótimos referentes ao exemplo 5.

	AG _{livro}	Caso 1	ER (%)	Caso 2	ER (%)	Caso 3	ER (%)	Caso 4	ER (%)
x_1	11,6314	12,1000	4,029	12,1000	4,029	11,1654	4,006	11,6348	0,029
x_2	5,7248	5,6303	1,651	5,4255	5,228	5,5188	3,598	5,7314	0,115
$f(x)$	38,8182	38,2481	1,469	38,0556	1,964	38,1233	1,790	38,7173	0,260

onde: caso 1 $\rightarrow p_m = 5\%$;

caso 2 $\rightarrow p_m = 1\%$;

caso 3 $\rightarrow p_m = 5\%$ e usando uma seleção dos melhores cromossomos de pais e filhos pela aptidão;

caso 4 $\rightarrow p_m = 1\%$ e usando uma seleção dos melhores cromossomos de pais e filhos pela aptidão.

Exemplo 6 (extraído de GEN e CHENG, 1997): minimizar a função de Ackley.

$$\min f(x_1, x_2) = -c_1 \exp\left(-c_2 \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 x_j^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \cos(c_3 x_j)\right) + c_1 + e$$

sujeito a: $-5 \leq x_j \leq 5$, $j = 1, 2$

onde: $c_1 = 20$; $c_2 = 0,2$; $c_3 = 2\pi$; $e = 2,71282$

Solução:

- | | |
|--|--------------|
| ➤ Representação dos parâmetros: | real |
| ➤ População de soluções, NC : | 10 |
| ➤ Tipo de cruzamento: | aritmético |
| ➤ Probabilidade de cruzamento, p_c : | 100 % |
| ➤ Tipo de mutação: | não-uniforme |
| ➤ Probabilidade de mutação, p_m : | 1,0 % |
| ➤ Número de gerações, NG : | 1000 |

Mutação Não-Uniforme (MICHALEWICZ, 1994): É a simples substituição de um gene por um número extraído de uma distribuição não-uniforme. Dado um cromossomo p com o j -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo c da seguinte forma:

$$c_i = \begin{cases} p_i + (b_i - p_i)f(G) & \text{se } r_1 < 0,5 \text{ e } i = j \\ p_i - (p_i - a_i)f(G) & \text{se } r_1 \geq 0,5 \text{ e } i = j \\ p_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{b.9})$$

$$f(G) = \left[r_2 \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \right]^b \quad (\text{b.10})$$

onde r_1 e $r_2 \in [0,1]$, G é o número da geração corrente, G_{\max} é o número máximo de gerações; b é um parâmetro do sistema que determina a forma da função (o autor usou $b = 6$); a_i e b_i são os limites inferior e superior da variável, respectivamente.

Seleção: Para produzir a próxima geração, seleciona-se os melhores cromossomos dos pais e filhos. Para isto, pode-se usar os valores da aptidão e classificar os cromossomos conforme esses valores.

Resultados:

TABELA b.6 – Valores ótimos referentes ao exemplo 6.

	AG _{livro}	AG _{programa}	ER (%)
x_1	0,0000	0,0004	0,035
x_2	0,0000	0,0037	1,708
$f(x)$	0,0000	0,0056	0,217

Exemplo 7: idêntico ao exemplo 2, mas com representação real e seleção melhorada.

Solução:

- Representação dos parâmetros: real
- Tipo de cruzamento: aritmético
- Probabilidade de cruzamento, p_c : 100 %
- Tipo de mutação: não-uniforme
- Tipo de seleção: melhorada
- Número de gerações, NG : 1000

Resultados:

TABELA b.7 – Valores ótimos referentes ao exemplo 7.

	Caso 1	Caso 2
x_1	10,6317	10,6350
x_2	5,5279	5,3277
$f(x)$	37,6581	37,4447

onde: caso 1 $\rightarrow p_m = 5\%$;

caso 2 $\rightarrow p_m = 1\%$.

Exemplo 8: idêntico ao exemplo 2. Testar a variação de NC , p_c e p_m .

Solução:

- Representação dos parâmetros: binária
- Comprimento do cromossomo, NB : 33
- Tipo de cruzamento: um ponto
- Tipo de mutação: simples
- Tipo de seleção: roda da roleta
- Número de gerações, NG : 1000

Resultados:

TABELA b.8 – Valores ótimos referentes ao exemplo 8.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
x_1	11,6277	11,6212	11,1253	11,6273	11,6261	11,6379
x_2	5,5253	5,7273	5,7286	5,6270	5,7290	5,7269
$f(x)$	38,5779	38,7580	38,3228	38,7350	38,8199	38,8082

onde: caso 1 → $NC=10$, $p_c = 25\%$, $p_m = 1\%$;

caso 2 → $NC=30$, $p_c = 25\%$, $p_m = 1\%$;

caso 3 → $NC=10$, $p_c = 25\%$, $p_m = 5\%$;

caso 4 → $NC=30$, $p_c = 25\%$, $p_m = 5\%$;

caso 5 → $NC=10$, $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

caso 6 → $NC=30$, $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$.

Conclusão: quanto maior o tamanho da população e a probabilidade de cruzamento melhor a estimação.

Exemplo 9: idêntico ao exemplo 2. Comparações quanto ao efeito dos diversos parâmetros do AG.

Solução:

- Representação dos parâmetros: binária
- Comprimento do cromossomo, NB : 33
- Tipo de cruzamento: um ponto
- Tipo de mutação: simples
- Tipo de seleção: roda da roleta
- Número de gerações, NG : 1000

Oito casos são considerados na análise:

caso 1 → $NC=10, p_c = 100\%, p_m = 5\%$;

caso 2 → $NC=30, p_c = 100\%, p_m = 5\%$;

caso 3 → $NC=10, p_c = 25\%, p_m = 5\%$;

caso 4 → $NC=30, p_c = 25\%, p_m = 5\%$;

caso 5 → $NC=10, p_c = 100\%, p_m = 1\%$;

caso 6 → $NC=30, p_c = 100\%, p_m = 1\%$.

caso 7 → $NC=10, p_c = 25\%, p_m = 1\%$;

caso 8 → $NC=30, p_c = 25\%, p_m = 1\%$.

Resultados:

1. Influência do tamanho da população:

Conforme a tabela b.9 observa-se que: com o crescimento da população melhora o valor da função, exceção nos casos 5 e 6.

TABELA b.9 – Valores ótimos para comparação do tamanho da população referentes ao exemplo 9.

	$p_c=100\%; p_m=5\%$		$p_c=25\%; p_m=5\%$		$p_c=100\%; p_m=1\%$		$p_c=25\%; p_m=1\%$	
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
x_1	11,6273	11,6251	11,1253	11,6273	11,6261	11,6379	11,6277	11,6212
x_2	5,6270	5,7272	5,7286	5,6270	5,7290	5,7269	5,5253	5,7273
$f(x_1, x_2)$	38,7340	38,8155	38,3228	38,7350	38,8199	38,8082	38,5779	38,7580

2. Influência da taxa de cruzamento:

Nota-se que em todos os casos, sem exceção, a diminuição de p_c de 100% para 25% resultou em queda da função. Os resultados podem ser vistos na tabela b.10.

TABELA b.10 – Influência da taxa de cruzamento referente ao exemplo 9.

	$NC=10; p_m=5\%$		$NC=30; p_m=5\%$		$NC=10; p_m=1\%$		$NC=30; p_m=1\%$	
	Caso 1	Caso 3	Caso 2	Caso 4	Caso 5	Caso 7	Caso 6	Caso 8
x_1	11,6273	11,1253	11,6251	11,6273	11,6261	11,6277	11,6379	11,6212
x_2	5,6270	5,7286	5,7272	5,6270	5,7290	5,5253	5,7269	5,7273
$f(x_1, x_2)$	38,7340	38,3228	38,8155	38,7350	38,8199	38,5779	38,8082	38,7580

3. Influência da taxa de mutação:

Observa-se que a diminuição de p_m de 5% para 1% provoca um aumento na função, exceção na comparação entre os casos 2 e 6. A tabela b.11 mostra os resultados da simulação.

TABELA b.11 – Influência da taxa de mutação referente ao exemplo 9.

	$NC=10; p_c=100\%$		$NC=30; p_c=100\%$		$NC=10; p_c=25\%$		$NC=30; p_c=25\%$	
	Caso 1	Caso 5	Caso 2	Caso 6	Caso 3	Caso 7	Caso 4	Caso 8
x_1	11,6273	11,6261	11,6251	11,6379	11,1253	11,6277	11,6273	11,6212
x_2	5,6270	5,7290	5,7272	5,7269	5,7286	5,5253	5,6270	5,7273
$f(x_1, x_2)$	38,7340	38,8199	38,8155	38,8082	38,3228	38,5779	38,7350	38,7580

4. Conclusão

Para este AG, constatou-se que uma população de 10 cromossomos, com uma probabilidade de cruzamento de 100% e uma probabilidade de mutação de 1% (caso 5) obteve os melhores resultados.

Exemplo 10: idêntico ao exemplo 9, mas testando o cruzamento de dois pontos.

Solução:

- Representação dos parâmetros: binária
- Comprimento do cromossomo, NB : 33
- Tipo de cruzamento: dois pontos
- Tipo de mutação: simples
- Tipo de seleção: roda da roleta

➤ Número de gerações, NG : 1000

Os mesmos oito casos do exemplo 9 são considerados aqui.

Resultados:

1. Influência do tamanho da população:

Nota-se da tabela b.12 observa-se que uma maior população ($NC=30$) melhora o desempenho do AG, exceção para os casos 7 e 8.

TABELA b.12 – Influência do tamanho da população referente ao exemplo 10.

	$p_c=100\%; p_m=5\%$		$p_c=25\%; p_m=5\%$		$p_c=100\%; p_m=1\%$		$p_c=25\%; p_m=1\%$	
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
x_1	11,6222	11,6270	11,1285	11,6260	11,6477	11,6280	11,6196	11,6281
x_2	5,7307	5,7274	5,7292	5,7322	4,9301	5,7276	5,6272	5,3247
$f(x_1, x_2)$	38,6939	38,8376	38,3339	38,6302	37,7549	38,8467	38,6258	38,3521

2. Influência da taxa de cruzamento:

Conforme a tabela b.13 vê-se que em todos os casos, a diminuição de p_c resultou em uma redução no valor da função.

TABELA b.13 – Influência da taxa de cruzamento referente ao exemplo 10.

	$NC=10; p_m=5\%$		$NC=30; p_m=5\%$		$NC=10; p_m=1\%$		$NC=30; p_m=1\%$	
	Caso 1	Caso 3	Caso 2	Caso 4	Caso 5	Caso 7	Caso 6	Caso 8
x_1	11,6222	11,1285	11,6270	11,6260	11,6477	11,6196	11,6280	11,6281
x_2	5,7307	5,7292	5,7274	5,7322	4,9301	5,6272	5,7276	5,3247
$f(x_1, x_2)$	38,6939	38,3339	38,8376	38,6302	37,7549	38,6258	38,8467	38,3521

3. Influência da taxa de mutação:

Com a diminuição de p_m (de 5% para 1%) ocorreu uma melhora no valor da função. A tabela b.14 mostra os resultados da simulação.

TABELA b.14 – Influência da taxa de mutação referente ao exemplo 10.

	$NC=10; p_c=100\%$		$NC=30; p_c=100\%$		$NC=10; p_c=25\%$		$NC=30; p_c=25\%$	
	Caso 1	Caso 5	Caso 2	Caso 6	Caso 3	Caso 7	Caso 4	Caso 8
x_1	11,6222	11,6477	11,6270	11,6280	11,1285	11,6196	11,6260	11,6281
x_2	5,7307	4,9301	5,7274	5,7276	5,7292	5,6272	5,7322	5,3247
$f(x_1, x_2)$	38,6939	37,7549	38,8376	38,8467	38,3339	38,6258	38,6302	38,3521

4. Conclusão

Para este AG, a melhor performance foi atingida quando $NC=30$, $p_c=100\%$ e $p_m=1\%$, ou seja, o caso 6.

Exemplo 11: Comparação dos melhores resultados dos exemplos 9 e 10.

TABELA b.15 – Comparação entre os tipos de cruzamento referente ao exemplo 11.

	Cruzamento	
	Caso 1	Caso 2
x_1	11,6261	11,6280
x_2	5,7290	5,7276
$f(x_1, x_2)$	38,8199	38,3467

onde: caso 1 → Cruzamento de 1 ponto com $NC=10$, $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

caso 2 → Cruzamento de 2 pontos com $NC=30$, $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

Conclusões:

1. Um cruzamento de 2 pontos de corte mostrou-se mais eficiente quanto à maximização da função;
2. Uma população de 30 cromossomos é recomendável;
3. Todos os cromossomos devem participar do cruzamento, ou seja, $p_c = 100\%$.

Exemplo 12:

$$\min f(x) = x^2 + 2x$$

$$\text{sujeito a: } -3 \leq x \leq 5$$

Solução:

- Representação dos parâmetros: binária
- Comprimento do cromossomo, NB : 17
- Tipo de cruzamento: um ponto

- Tipo de mutação: simples
- Tipo de seleção: roda da roleta
- Número de gerações, NG : 1000

Resultados:

TABELA b.16 – Comparação entre os tipos de cruzamento referente ao exemplo 12.

	Cruzamento	
	Caso 1	Caso 2
x	-1,0044	-1,0044
$f(x)$	1,0000	-1,0000

onde: caso 1 → Cruzamento de 1 ponto com $NC=30$, $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

caso 2 → Cruzamento de 2 pontos ($COMP=4$) com $NC=30$, $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

Os resultados conferem com os valores ótimos da referência.

Exemplo 13:

$$\min f(x_1, x_2) = (x_1 - 2)^4 + (x_1 - 2x_2)^2$$

$$\text{sujeito a: } 1,0 \leq x_1 \leq 3,0$$

$$0,5 \leq x_2 \leq 1,5$$

Solução:

- Representação dos parâmetros: binária
- Comprimento do cromossomo, NB : 30
- Tamanho da população, NC : 30
- Tipo de cruzamento: dois pontos
- Probabilidade de cruzamento, p_c : 100%
- Tipo de mutação: simples
- Probabilidade de mutação, p_m : 1%
- Tipo de seleção: roda da roleta
- Número de gerações, NG : 1000

Resultados:

TABELA b.17 – Valores ótimos referentes ao exemplo 13.

	Referência	AG	ER(%)
x_1	2,0000	2,0132	0,66
x_2	1,0000	0,9920	0,80
$f(x_1, x_2)$	0,0000	0,0009	-

Exemplo 14: idêntico ao exemplo 2. Comparar tipos de mutação na representação real.

Solução:

- Representação dos parâmetros: real
- Tamanho da população, NC : 30
- Tipo de cruzamento: aritmético
- Tipo de seleção: melhorada
- Número de gerações, NG : 1000

TABELA b.18 – Influência do tipo de mutação na representação real referente ao exemplo 14.

	Mutação Uniforme		Mutação não-Uniforme		Mutação Limite	
	$p_m=5\%$	$p_m=1\%$	$p_m=5\%$	$p_m=1\%$	$p_m=5\%$	$p_m=1\%$
x_1	11,6366	11,6308	10,6317	10,6350	11,1654	11,6348
x_2	5,7276	5,7279	5,7279	5,3277	5,5188	5,7314
$f(x_1, x_2)$	38,8336	38,8586	37,6581	37,4447	38,1233	38,7173

A mutação uniforme obteve os melhores resultados.

Exemplo 15: idêntico ao exemplo 2. Comparação entre as representações binária e real.

Representação binária:

- Comprimento do cromossomo, NB : 33
- Tamanho da população, NC : 30

- Tipo de cruzamento: dois pontos
- Probabilidade de cruzamento, p_c : 100%
- Tipo de mutação: simples
- Probabilidade de mutação, p_m : 1%
- Tipo de seleção: roda da roleta
- Número de gerações, NG : 1000

Representação real:

- Tamanho da população, NC : 30
- Tipo de cruzamento: aritmético
- Probabilidade de cruzamento, p_c : 100%
- Tipo de mutação: uniforme
- Probabilidade de mutação, p_m : 1%
- Tipo de seleção: Melhorada
- Número de gerações, NG : 1000

Resultados:

TABELA b.19 – Comparação entre as representações binária e real referente ao exemplo 15.

	Codificação	
	Binária	Real
x_1	11,6280	11,6308
x_2	5,7276	5,7279
$f(x_1, x_2)$	38,8467	38,8586
$t(s)$	1,10	0,90

A representação real obteve melhores resultados tanto do ponto de vista de maximização da função quanto ao tempo de processamento.

Exemplo 16 (extraído de GEN E CHENG, 1997): Comparar as codificações binária e real.

$$\min f = (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 1)^2$$

s.a:

$$g_1 = x_1 - 2x_2 + 1 = 0$$

$$g_2 = \frac{x_1^2}{4} - x_2^2 + 1 \geq 0$$

Representação binária:

- Comprimento do cromossomo, NB : 19
- Tamanho da população, NC : 30
- Tipo de cruzamento: um ponto
- Tipo de mutação: simples
- Tipo de seleção: melhorada

Representação real:

- Tamanho da população, NC : 30
- Tipo de cruzamento: aritmético
- Tipo de mutação: uniforme
- Tipo de seleção: Melhorada
- Número de gerações, NG : 1000

Quatro casos são considerados na análise:

caso 1 → Binária com $p_c = 85\%$, $p_m = 2\%$;

caso 2 → Binária com $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

caso 3 → Real com $p_c = 85\%$, $p_m = 2\%$;

caso 4 → Real com $p_c = 100\%$, $p_m = 1\%$;

Resultados: As simulações são mostradas nas tabelas b.20, b.21 e b.22 para 100, 1000 e 10000 gerações, respectivamente. Os resultados mostram que as duas restrições são satisfeitas. O AG proposto apresentou bons resultados para as duas codificações. A codificação real obteve as melhores simulações tanto no erro relativo na função f como no tempo de processamento.

TABELA b.20 – Valores ótimos referentes ao exemplo 16 para 100 gerações.

	Referência	AG _{livro}	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
x_1	0,8230	0,8080	0,8367	0,8284	0,8174	0,8276
x_2	0,9110	0,8854	0,9203	0,9128	0,9136	0,9131
f	1,3930	1,4339	1,3596	1,3803	1,4059	1,3822
g_1	0,0010	0,0370	-0,0038	0,0028	-0,0098	0,0013
g_2	0,0007	0,0520	0,3282	0,3383	0,3324	0,3374
$ER_f(\%)$	-	-	2,40	0,92	0,93	0,77
$t(s)$	-	-	0,16	0,17	0,16	0,17

TABELA b.21 – Valores ótimos referentes ao exemplo 16 para 1000 gerações.

	Referência	AG _{livro}	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
x_1	0,8230	0,8080	0,8434	0,8367	0,8311	0,8362
x_2	0,9110	0,8854	0,9184	0,9203	0,9162	0,9137
f	1,3930	1,4339	1,3445	1,3596	1,3734	1,3619
g_1	0,0010	0,0370	0,0066	-0,0038	-0,0014	0,0087
g_2	0,0007	0,0520	0,33344	0,3282	0,3332	0,3399
$ER_f(\%)$	-	-	3,48	2,40	1,41	2,23
$t(s)$	-	-	1,65	1,48	1,32	1,37

TABELA b.22 – Valores ótimos referentes ao exemplo 16 para 10000 gerações.

	Referência	AG _{livro}	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
x_1	0,8230	0,8080	0,8462	0,8467	0,8370	0,8367
x_2	0,9110	0,8854	0,9203	0,9203	0,9200	0,9134
f	1,3930	1,4339	1,3308	1,3365	1,3589	1,3608
g_1	0,0010	0,0370	0,0087	0,0062	-0,0030	0,0098
g_2	0,0007	0,0520	0,3334	0,3323	0,3287	0,3407
$ER_f(\%)$	-	-	4,47	4,06	2,45	2,31
$t(s)$	-	-	16,48	15,32	14,33	14,01

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, I., LANCEY, K., ARAÚJO, J. - Data collection for water distribution network calibration. **Water Engineering and Management Series. Research Studies Press Ltd. Water Industry Systems: modelling and optimization applications**, England, v. 1, p. 271-278, 1999.
- ALMEIDA A. B., KOELLE E. - **Fluid transients in pipe networks**. Elsevier Appl. Science, Mech. Publ., 1993. 564p.
- ALPEROVITS, E., SHAMIR, U. - Design of optimal water distribution systems. **Water Resources Research**, v. 13, n. 6, p. 885-900, 1977.
- ANDERSON, E. J., AL-JAMAL, K. H. - Hydraulic-network simplification. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 121, n. 3, p. 235-240, 1995.
- AYALA, G., LIGGETT, J. A. - Flow in damaged pipe networks. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 117, n. 2, p. 230-239, 1991.
- BASCIÀ, A., TERMINI, D., TUCCIARELLI, T. - A clustering technique for parameter estimation in pipe flow network models. **Water Engineering and Management Series. Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, England, v. 1, p. 279-286, 1999.
- BOULOS, P. F., WOOD, D. J. - Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.
- BHAVE, P. R. - Calibrating water distribution network models. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 114, n. 1, p. 120-136, 1988.

- CARRERA, J., NEUMAN, S. P. – Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. maximum likelihood method incorporating prior information. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 199-210, 1986a.
- CHANDRASHEKAR, M., STEWART, K. H. - Sparsity oriented analysis of large pipe networks. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 101, n. HY4, p. 341-355, 1974.
- CHAUDHRY, M. H. - **Applied hydraulic transients**. New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1987. 521p.
- CIENIAWSKI, S. E., EHEART, J. W., RANJITHAN, S. – Using genetic algorithms to solve a multiobjective groundwater monitoring problem. **Water Resources Research**, v. 31, n. 2, p. 399-409, 1995.
- CLEARY, R. – **Águas subterrâneas**. In. **Engenharia Hidrológica**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 2, 1ª ed., Rio de Janeiro, Editora da UFRJ, cap. 5, p. 293-404, 1989.
- COLLINS, A. G., JOHNSON, R. L. - Finite-element method for water-distribution networks. **Journal American Water Works Association**, p. 385-389, 1975.
- COVAS, D., RAMOS, H., ALMEIDA, A. BETÂNIO DE. – Leak location in pipe systems using pressure surges. **8th International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems**. BHR Groups. Publications n. 39, p. 169-179, 2000.
- CROSS, HARDY. - Analysis of flow in networks of conduits or conductors. engineering experimental station, **University of Illinois, Urbana, Bulletin**, n. 386, Nov., 1936.
- CULLINANE, M. J., LANSEY, K. E., MAYS, L., W. – Optimization-availability-based design of water-distribution networks. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 118, n. 3, p. 420-441, 1992.

- DATTA, R. S. N., SRIDHARAN, K. - Parameter estimation in water-distribution systems by least squares. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 4, p. 405-422, 1994.
- DEJONG, K. - **The analysis and behaviour of a class of genetic adaptive systems**. University of Michigan, 1975 (PhD thesis).
- DIBA, A. , LOUIE, P. W. F., MAHJOUN, M., YEH, W. W-G. - Planned operation of large-scale water-distribution system. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 121, n. 3, p. 260-269, 1995.
- DODGE, E. R., HOELLEIN, H. R., TETMATER, L. - The analysis of large complex water networks with small computer systems. **Journal American Water Works Association**, p. 366-370, 1978.
- DONACHIE, R. P. - Digital program for water network analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 100, n. HY3, p. 393-403, 1974.
- DRIELS, M. - Design of pressure transient control system. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 101, n. HY5, p. 437-448, 1975.
- DUAN, N., MAYS, L. W., LANSEY, K. E. - Optimal reliability-based design of pumping and distribution systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 116, n. 2, p. 249-268, 1990.
- EIGER, G., SHAMIR, U., BEM-TAL, A. - Optimal design of water distribution networks. **Water Resources Research**, v. 30, n. 9, p. 2637-2646, 1994.
- ELANSARY, A. S., SILVA, W., CHAUDHRY, M. F. - Numerical and experimental investigation of transient pipe flow. **Journal of the Hydraulic Research**, v. 32, n. 5, p. 689-706, 1994.
- EPP, R., FOWLER, A. G. - Efficient code for steady-state flows in networks. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 96, n. HY1, p. 43-56, 1970.

- FUJIWARA, O., GANESHARAJAH, T. Reliability assessment of water supply systems with storage and distribution networks. **Water Resources Research**, v. 29, n. 8, p. 2917-2924, 1993.
- GALVÃO, C. O. et al. – **Sistemas inteligentes – aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. ABRH, 1999.
- GAMBALE, S. R. – **Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água**. São Paulo. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
- GEN, M., CHENG, R. – **Genetic algorithms and engineering design**. John Wiley & Sons, INC, 1997.
- GUEVARA, Y., CARMONA, R. - Unsteady and steady flow control on pumping systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 26, n. 5, p. 954-960, 1990.
- GOFMAN, E., RODEH, M. - Loop equations with unknown pipe characteristics. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 107, n. HY9, p. 1047-1060, 1981.
- GOLDBERG, D. E. – **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. 412 pp., Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.
- GOULTER, I. C., BOUCHART, F. – Reliability-constrained pipe network model. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 116, n. 2, p. 211-229, 1990.
- GOULTER, I. C., LUSSIER, B. M., MORGAN, D. R. – Implications of head loss path choice in the optimization of water distribution networks. **Water Resources Research**, v. 22, n. 5, p. 819-822, 1986.
- GUERCIO, R., XU, Z. – Linearized optimization model for reliability-based design of water systems. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 123, n. 11, p. 1020-1026, 1997.
- GUEVARA, Y., CARMONA, R. – Unsteady and steady flow control on pumping systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 26, n. 5, p. 954-960, 1990.

- HOAG, L. N., WEINBERG, G. - Pipeline network analysis by electronic digital computer. **Journal American Water Works Association**, p. 517-524, 1957.
- HOLLAND, J. H. – **Adaptation in natural and artificial systems**. MIT Press, 1975.
- ISAACS, L. T., MILLS, K. G. - Linear theory methods for pipe network analysis. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 106, n. HY7, p. 1191-1201, 1980.
- JEPPSON, R. W., DAVIS, A. L. - Pressure reducing valves in pipe networks analysis. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 102, n. HY7, p. 987-1001, 1976.
- JEPPSON, R. W., TAVALLALE, A. - Pumps and reservoirs in networks by linear theory. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 101, n. HY3, p. 576-580, 1975.
- JOWITT, P. W., GERMANOPOULOS, G. – Optimal pump scheduling in water-supply networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management, ASCE**, v. 118, n. 4, p. 406-422, 1992.
- JOWITT, P. W., XU, C. – Optimal valve control in water-distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management, ASCE**, v. 116, n. 4, p. 455-472, 1990.
- KARNEY, B. W. – Energy relations in transient closed-conduit flow. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 116, n. 10, p. 1180-1196, 1990.
- 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.
- KARNEY, B. W., MCINNIS, D. - Efficient calculation of transient flow in simple pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering, ASCE**, v. 118, n. 7, p. 1014-1030, 1992.
- KARNEY, B. W., BRUNONE, B. - Water hammer in pipe network: two case studies. **Water Engineering and Management Series. Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, England, v. 1, p. 363-376, 1999.

- KIM, J. H., MAYS, L. W. – Optimal rehabilitation model for water-distribution systems. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 5, p. 674-692, 1994.
- KLEINER, Y., ADAMS, B. J., ROGERS, J. S. – Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. **Water Resources Research**, v. 34, n. 8, p. 2039-2051, 1998.
- LAM, C. F., WOLLA, M. L. - Computer analysis of water distribution systems: part II – numerical solution. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 98, n. HY3, p. 447-460, 1972.
- LANCEY, K. E., AWUMAH, K. Optimal pump operations considering pump switches. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 1, p. 17-35, 1994.
- LANCEY, K. E., BASNET, C. – Parameter estimation for water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 117, n. 1, p. 126-144, 1991.
- LANCEY, K. E., DUAN, N., MAYS, L. W., TUNG, Y. – Water distribution system design under uncertainties. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 115, n. 5, p. 630-645, 1989.
- LEMIEUX, P. F. - Efficient algorithm for distribution networks. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 98, n. HY11, p. 1911-1920, 1972.
- LIGGETT, J. A., CHEN, L-C. – Inverse transient analysis in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934-955, 1994.
- LOGANATHAN, G. V., GREENE, J. J., AHN, T. J. – Design heuristic for globally minimum cost water-distribution systems. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 121, n. 2, p. 182-192, 1995.

- McILROY, M. S. - Direct-reading electric analyzer for pipeline networks. **Journal American Water Works Association**, p. 347-365, 1950.
- MCINNIS, D., KARNEY, B. W. - Transients in distribution networks: field tests and demand models. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 121, n. 3, p. 218-231, 1995.
- McPHERSON, M. B., RADZIUL, J. V. - Water distribution design and the mclroy network analyser. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 84, n. HY2, Proc. Paper 1588, p. 1-9, 1958.
- MICHALEWICZ, Z. - **Genetic algorithms + data structures = evolution programs**, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1994.
- MITCHELL, M. - **Introduction to genetic algorithms**. Cambridge: Mit, 1996.
- MONTESINOS, P., GARCIA-GUSMAN, A., AYUSO, J. L. - Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm. **Water Resources Research**, v. 35, n. 11, p. 3467-3473, 1999.
- MORGAN, D. R., GOULTER, I. C. - Optimal urban water distribution design. **Water Resources Research**, v. 21, n. 5, p. 642-652, 1985.
- 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.
- NIELSEN, H. B. - Methods for analyzing pipe networks. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 115, n. 2, p. 139-157, 1989.
- NOGUEIRA, A. C. - Steady-state fluid network analysis. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 119, n. 3, p. 431-436, 1993.
- ONIZUKA, K. - System dynamics approach to pipe network analysis. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 112, n. 8, p. 728-749, 1986.

- ORMSBEE, L. E. - Implicit network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.
- ORMSBEE, L., KESSLER, A. - Optimal upgrading of hydraulic-network reliability. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 116, n. 6, p. 784-802, 1990.
- ORMSBEE, L. E., REDDY, S. L. - Nonlinear heuristic for pump operations. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 121, n. 4, p. 302-309, 1995.
- ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J. - Explicit pipe network calibration. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 112, n. 2, p. 166-182, 1986a.
- ORMSBEE, L. E., WOOD, D. J. - Implicit pipe network calibration. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 112, n. 12, p. 1195-1207, 1986b.
- OSTFELD, A., SHAMIR, U. - Optimal operation of multiquality networks. I: steady-state conditions. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 119, n. 6, p. 645-661, 1993.
- PARK, H., LIEBMAN, J. C. - Redundancy-constrained minimum-cost design of water-distribution nets. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 119, n. 1, p. 83-98, 1993.
- PEZESHK, S., HELWEG, O. J. - Adaptive search optimization in reducing pump operating costs. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 122, n. 1, p. 57-63, 1996.
- PEZESHK, S., HELWEG, O. J., OLIVER, K. E. - Optimal operation of ground-water supply distribution systems. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 5, p. 573-586, 1994.
- PORTO, R. M. - **Hidráulica básica**. EESC-São Carlos-SP. 1998. 540p.
- PUDAR, R. S., LIGGETT, J. A. - Leaks in pipe networks. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 118, n. 7, p. 1031-1046, 1992.

- REDDY, P. V. N., SRIDHARAN, K., RAO, P. V. – WLS method for parameter estimation in water distribution networks. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 122, n. 3, p. 157-164, 1996.
- REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H. – Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 6, p. 317-326, 1997.
- RIGHETTO, A. M. – **Desenvolvimento de modelos de simulação para o desenvolvimento de redes de distribuição de água**. São Carlos. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1977.
- RIGHETTO, A. M. - **Cálculo hidráulico de rede de distribuição de água a partir de condições transitórias: adequação e estudo de casos**. São Carlos. Tese de Livre Docência - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.
- RITZEL, B. J., EHEART, J. W., RANJITHAN, S. – Using genetic algorithms to solve a multibjective groundwater pollution containment problem. **Water Resources Research**, v. 30, n. 5, p. 1589-1603, 1994.
- SAVIC, D. A., WALTERS, G. A. – Integration of a model for hydraulic analysis of water distribution networks with an evolution program for pressure regulation. **Microcomputers in Civil Engineering**, v. 10, n. 3, p. 219-229, 1995a.
- SAVIC, D. A., WALTERS, G. A. – An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks. **Engineering Optimization**, v. 24, n. 3, p. 197-219, 1995b.
- SAVIC, D. A., WALTERS, G. A. – Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
- SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D. - Water distribution systems analysis. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 94, n. HY1, p. 219-234, 1968.

- SHAMIR, U., HOWARD, C. D. D. – Engineering analysis of water-distribution systems. **Journal American Water Works Association**, v. 69, n° 9, p. 510-514, 1977.
- SHERALI, H. D., TOTLANI, R., LOGANATHAN, G. V. – Enhanced lower bounds for the global optimization of water distribution networks. **Water Resources Research**, v. 34, n. 7, p. 1831-1841, 1998.
- SHIMADA, M., OKUSHIMA, S. - New numerical model and technique for waterhammer. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 110, n. 6, p. 736-748, 1984.
- SHIMADA, M. - Time-marching approach for pipe steady flows. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 114, n. 11, p. 1301-1320, 1988.
- SHIMADA, M. – Graph-theoretical model for slow transients analysis of pipe networks. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 115, n. 9, p. 1165-1183, 1989.
- SIBETHEROS, I. A., HOLLEY, E. R., BRANSKI, J. M. - Spline interpolations for water hammer analysis. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 117, n. 10, p. 1332-1351, 1991.
- SIMPSON, A. R., DANDY, G. C., MURPHY, L. J. – Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 120, n. 4, p. 423-443, 1994.
- SIMPSON, A., VÍTKOVSKY, J., LAMBERT, M. – Transients for calibration of pipe roughnesses using genetic algorithms. **8th International Conference on Pressure Surges: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems**. BHR Groups. Publications n. 39, p. 587-597, 2000.
- SIMPSON, A. R., WYLIE, E. B. - Large water-hammer pressures for column separation in pipelines. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 117, n. 10, p. 1310-1316, 1991.
- SOUZA, R. S. de – **Controle operacional otimizado de redes de distribuição de água usando a teoria do regulador quadrático linear**. São Carlos. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

- SUN, N. Z. – **Inverse problems in groundwater modeling**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- SURYAPRAKASAM, M. V., REID, G. W., GEYER, J. C. - Use of alternating current network calculator in distribution systems design. **Journal American Water Works Association**, p. 1164-1164, 1950.
- SWAMEE, P. K. – Design of a submarine pipeline. **J. Transp Eng., ASCE**, v. 119, n. 1, p. 159-170, 1993.
- TONG, A L., O'CONNOR, F., STEARNS, D. E., LYNCH, W. O. - Analysis of distribution networks by balancing equivalent pipe lengths. **Journal American Water Works Association**, p. 192-210, 1961.
- VOYLES, C. F., WILKE, H. R. - Selection of circuit arrangements for distribution networks analysis by the hardy-cross method. **Journal American Water Works Association**, p. 285-290, 1962.
- WALSKI, T. M. - Technique for calibrating network models. **Journal of the Water Resources Planning and Management, ASCE**, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.
- WALSKI, T. M. - Case study: pipe network model calibration issues. **Journal of the Water Resources Planning and Management, ASCE**, v. 112, n. 2, p. 238-249, 1986.
- WILLIAMS, G. N. - Enhancement of convergence of pipe network solution. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 99, n. HY7, p. 1057-1067, 1973.
- WOOD, D. J., CHARLES, C. A. - Hydraulic network analysis using linear theory. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 98, n. HY7, p. 1157-1170, 1972.
- WOOD, D. J., RAYES, A. G.. - Reliability of algorithms for pipe network analysis. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, v. 107, n. HY10, p. 1145-1161, 1981.
- WYLIE, E. B., STREETER, V. L. - **Fluid transients**. New York, McGraw-Hill, 1978, 384p.

WYLIE, E. B. - The microcomputer and pipeline transients. **Journal of Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 109, n. 12, p. 1723-1739, 1983.

YEH, W. W-G. - Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: the inverse problem. **Water Resources Research**, v. 22, n. 2, p. 95-108, 1986.

ZESSLER, U., SHAMIR, U. - Optimal operation of water distribution systems. **Journal of the Water Resources Planning and Management**, ASCE, v. 115, n. 6, p. 735-752, 1989.