Alexandre Kepler Soares

**CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO
CONSIDERANDO VAZAMENTOS E DEMANDAS
DIRIGIDAS PELA PRESSÃO**

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

ORIENTADORA: Prof^ª Dra. Luisa Fernanda Ribeiro Reis

São Carlos
2003

*A meus pais, Nelson e Maria Nair,
realizadores de todo esforço por mim.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

A Nossa Senhora Aparecida, pela proteção.

À Professora Luisa Fernanda Ribeiro Reis, orientadora e amiga, pelo idealismo, competência e dedicação a este trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

À FINEP (Financiadora Nacional de Estudos e Projetos), na qualidade de agência financiadora do projeto integrado intitulado “Controle Operacional e Avaliação de Perdas em um Sub-Sistema Urbano de Distribuição de Água (sub-projeto da sub-rede 2 da REHIDRO)”, referência FINEP 3131/96, cuja infraestrutura deu suporte ao desenvolvimento do presente trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido ao Projeto Temático (CT-HIDRO 01/2001) “Instrumentos do Uso Racional e Otimizado da Água em Meio Urbano”, do qual este trabalho é parte integrante.

Aos meus pais, Nelson e Maria Nair, pelo apoio irrestrito e amor.

Aos meus avós, Ivone, Boaventura e Deolice (*in memorian*), pelo incentivo constante à minha formação.

À Ingrid, pela amizade e autenticidade.

À Érica, grande companheira, pelo amor, dedicação e carinho, e que me proporcionou felicidade e determinação na minha vida espiritual e profissional.

À Léia, Luciano e respectivas famílias, pela hospitalidade.

Aos colegas Andrés, Johannes, Paulo César, Peter, Klebber, Fernando, Andréia, Adelenia, Luciane, Tinil, Tosta, Daniel e Zé Eduardo.

A todos os professores, colegas e funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP, pela excelente receptividade, conhecimento fornecido e colaboração.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

SOARES, A. K. (2003). *Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demandas Dirigidas pela Pressão*. São Carlos, 2003. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

No Brasil, são comuns sistemas de distribuição de água para abastecimento com elevados índices de perdas, nos quais parcela significativa das denominadas perdas físicas é devida às perdas por vazamento. Dessa maneira, o controle efetivo das perdas por vazamento e do comportamento do sistema sob as mais diversas condições operacionais é de fundamental importância, não só do ponto de vista financeiro, no que diz respeito ao desperdício da água bombeada e quimicamente tratada, mas principalmente da preservação deste recurso natural.

Com o objetivo de se ter um maior conhecimento do comportamento real de uma rede de distribuição de água, técnicas de calibração, incluindo modelos para avaliação de perdas por vazamentos, vêm sendo propostas. Tais modelos devem considerar a relação pressão x vazamento, bem como a dependência pressão x demanda, face aos diferentes níveis de pressão atuantes em um sistema de distribuição de água.

O presente estudo visa o desenvolvimento de uma rotina computacional que considere as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão, acoplada ao simulador hidráulico EPANET (ROSSMAN, 2000), utilizando dados de rede hipotética com vistas à calibração em termos das rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas e parâmetros do modelo de vazamentos, bem como a localização de componentes hidráulicos na rede. Para tanto, utilizam-se modelos inversos resolvidos com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex – NELDER & MEAD, 1965).

Palavras-chave: calibração, redes de distribuição de água, vazamentos, demandas dirigidas pela pressão.

ABSTRACT

SOARES, A. K. (2003). *Water Distribution Network Calibration Model Considering Leakage and Head-Driven Demands*. São Carlos, 2003. 153 p. Master's Dissertation – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo.

Brazil's water distribution systems usually present a high percentage of so-called physical losses, of which a significant portion is caused by leakage. Therefore, it is of fundamental importance, not only from the financial standpoint – in terms of the pumped and chemically treated water – but also particularly from that of the preservation of this natural resource, to effectively control leakage and the systems' behavior under several operational conditions.

In order to gain a better understanding of the real behavior of a water distribution network, several calibration techniques, including models to evaluate leakage, have been proposed. Those models normally consider the correlation between pressure and leakage, as well as the interdependence of pressure and demand in response to the varying levels of pressure in a water distribution system.

The present study seeks to extend these models through the development of a computational routine based on leakage and on pressure-dependent demand, in conjunction with the hydraulic simulator EPANET (ROSSMAN, 2000), using the data from a hypothetical network to calibrate the absolute roughness and diameter of pipes, demands and elevations of nodes and the parameters of the leakage model, as well as the location of hydraulic components in the network. To this end, inverse models are used based on the technology of Genetic Algorithms (GA) and the hybrid procedure (GA and Simplex Method - NELDER & MEAD, 1965).

Key words: calibration, water distribution network, leakage, head-driven demands.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Variação do fator ρ_i para os modelos pressão x demanda.....	28
FIGURA 3.1 – Recombinação de um ponto – simples troca.....	33
FIGURA 3.2 – Recombinação de dois pontos – simples troca.....	33
FIGURA 3.3 – Vértices de uma <i>Simplex Geral</i>	40
FIGURA 3.4 – Fluxograma do Método Simplex – SUBRAHMANYAM (1989)..	42
FIGURA 4.1 – Fluxograma do processo iterativo proposto para avaliação hidráulica e determinação do fator de consumo.....	51
FIGURA 4.2 – Fluxograma do processo de calibração com os AGs.....	54
FIGURA 4.3 – Fluxograma do processo de calibração com o modelo híbrido.....	55
FIGURA 4.4 – Rede hipotética utilizada para a verificação do algoritmo.....	57
FIGURA 5.1 – Organograma das simulações realizadas.....	60
FIGURA 5.2 – Convergência do fator de consumo (FT) para as cinco situações...	62
FIGURA 5.3 – Convergência do balanço de massa para as cinco situações.....	62
FIGURA 5.4 – Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação I.....	64
FIGURA 5.5 – Convergência quanto ao balanço de massa para situação I.....	64
FIGURA 5.6 – Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação II.....	64
FIGURA 5.7 – Convergência quanto ao balanço de massa para situação II.....	64
FIGURA 5.8 – Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação III.....	65
FIGURA 5.9 – Convergência quanto ao balanço de massa para situação III.....	65
FIGURA 5.10 – Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação IV.....	65
FIGURA 5.11 – Convergência quanto ao balanço de massa para situação IV.....	65
FIGURA 5.12 – Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação V.....	65
FIGURA 5.13 – Convergência quanto ao balanço de massa para situação V.....	65
FIGURA 5.14 – Convergência do fator multiplicador para diferentes estimativas iniciais.....	68
FIGURA 5.15 – Convergência no <i>loop</i> interno para <i>FT</i> menor que 1.....	68
FIGURA 5.16 – Convergência no <i>loop</i> interno para <i>FT</i> maior que 1.....	68
FIGURA 5.17 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de seleção – AG geracional elitista.....	71

FIGURA 5.18 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de seleção – AG <i>Steady State</i>	72
FIGURA 5.19 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de recombinação – AG geracional elitista.....	74
FIGURA 5.20 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de recombinação – AG <i>Steady State</i>	74
FIGURA 5.21 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	77
FIGURA 5.22 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	77
FIGURA 5.23 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	77
FIGURA 5.24 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	77
FIGURA 5.25 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	82
FIGURA 5.26 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	82
FIGURA 5.27 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	82
FIGURA 5.28 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	82
FIGURA 5.29 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	89
FIGURA 5.30 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	89
FIGURA 5.31 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	89
FIGURA 5.32 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	89
FIGURA 5.33 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	94
FIGURA 5.34 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	94
FIGURA 5.35 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	94
FIGURA 5.36 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	94
FIGURA 5.37 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	99
FIGURA 5.38 – Função de aptidão (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	99
FIGURA 5.39 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	100
FIGURA 5.40 – Função de aptidão (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	100
FIGURA 5.41 – Sistema exemplo para a determinação da demanda.....	108
FIGURA 5.42 – Desvios apresentados entre valores simulados e observados de pressão e vazão para cada conjunto de pesos.....	112
FIGURA 5.43 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o comprimento equivalente como variável de decisão (AG geracional	

elitista).....	116
FIGURA 5.44 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o comprimento equivalente como variável de decisão (AG <i>Steady-State</i>).....	116
FIGURA 5.45 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão (AG geracional elitista).....	117
FIGURA 5.46 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão (AG <i>Steady-State</i>).....	117

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Quadro resumo dos modelos pressão x demanda.....	28
TABELA 4.1 – Parâmetros dos AGs adotados nas simulações.....	56
TABELA 4.2 – Dados das tubulações e diferentes zonas homogêneas em termos dos vazamentos.....	58
TABELA 4.3 – Cotas dos nós.....	58
TABELA 5.1 – Dados das cinco situações.....	61
TABELA 5.2 – Valores de pressões e vazões obtidos para as cinco situações.....	61
TABELA 5.3 – Valores de demandas efetivamente abastecidas e vazamentos obtidos para as cinco situações.....	62
TABELA 5.4 – Valores de pressões e vazões obtidos para as cinco situações e quatro modelos de demanda.....	63
TABELA 5.5 – Valores de demandas totais efetivamente abastecidas e vazamentos obtidos para as cinco situações e quatro modelos de demanda.....	64
TABELA 5.6 – Dados da rede empregados nas simulações.....	69
TABELA 5.7 – Níveis dos reservatórios e demanda abastecida para os padrões de consumo.....	69
TABELA 5.8 – Pressão nos nós de consumo para os padrões de consumo.....	69
TABELA 5.9 – Valores mínimos e máximos das variáveis de decisão.....	70
TABELA 5.10 – Dados das simulações realizadas para análise dos tipos de seleção.....	70
TABELA 5.11 – Análise dos tipos de seleção – AG geracional elitista.....	71
TABELA 5.12 – Análise dos tipos de seleção – AG <i>Steady-State</i>	72
TABELA 5.13 – Dados das simulações realizadas para análise dos tipos de recombinação.....	73
TABELA 5.14 – Análise dos tipos de recombinação – AG geracional elitista.....	73
TABELA 5.15 – Análise dos tipos de recombinação – AG <i>Steady-State</i>	75
TABELA 5.16 – Dados das simulações.....	76
TABELA 5.17 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados	

(geracional elitista e <i>FOI</i>).....	77
TABELA 5.18 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FOI</i>).....	78
TABELA 5.19 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	78
TABELA 5.20 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	78
TABELA 5.21 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FOI</i>).....	79
TABELA 5.22 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FOI</i>).....	79
TABELA 5.23 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	79
TABELA 5.24 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	80
TABELA 5.25 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FOI</i>).....	80
TABELA 5.26 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	80
TABELA 5.27 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FOI</i>).....	80
TABELA 5.28 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	80
TABELA 5.29 – Dados das simulações.....	81
TABELA 5.30 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FOI</i>).....	83
TABELA 5.31 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FOI</i>).....	83
TABELA 5.32 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	83
TABELA 5.33 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	84
TABELA 5.34 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FOI</i>).....	84
TABELA 5.35 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FOI</i>).....	85

TABELA 5.36 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	85
TABELA 5.37 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	85
TABELA 5.38 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	86
TABELA 5.39 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	86
TABELA 5.40 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	87
TABELA 5.41 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	87
TABELA 5.42 – Dados das simulações.....	88
TABELA 5.43 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	89
TABELA 5.44 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	90
TABELA 5.45 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	90
TABELA 5.46 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	90
TABELA 5.47 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	91
TABELA 5.48 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	91
TABELA 5.49 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	91
TABELA 5.50 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	92
TABELA 5.51 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	92
TABELA 5.52 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	92
TABELA 5.53 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	92
TABELA 5.54 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	92
TABELA 5.55 – Dados das simulações.....	93
TABELA 5.56 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	95

TABELA 5.57 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	95
TABELA 5.58 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	95
TABELA 5.59 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	96
TABELA 5.60 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	96
TABELA 5.61 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	96
TABELA 5.62 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	97
TABELA 5.63 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	97
TABELA 5.64 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	97
TABELA 5.65 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	97
TABELA 5.66 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	98
TABELA 5.67 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	98
TABELA 5.68 – Dados das simulações.....	99
TABELA 5.69 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	100
TABELA 5.70 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	100
TABELA 5.71 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	101
TABELA 5.72 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	101
TABELA 5.73 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	102
TABELA 5.74 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	102
TABELA 5.75 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados	

(<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	103
TABELA 5.76 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	103
TABELA 5.77 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO1</i>).....	103
TABELA 5.78 – Valores calibrados e reais (geracional elitista e <i>FO2</i>).....	104
TABELA 5.79 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO1</i>).....	104
TABELA 5.80 – Valores calibrados e reais (<i>Steady-State</i> e <i>FO2</i>).....	104
TABELA 5.81 – Dados do AG nas simulações.....	106
TABELA 5.82 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (10 gerações).....	106
TABELA 5.83 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (10 gerações).....	107
TABELA 5.84 – Valores calibrados e reais (10 gerações).....	107
TABELA 5.85 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (10 gerações).....	107
TABELA 5.86 – Dados do AG nas simulações.....	109
TABELA 5.87 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (5 gerações).....	110
TABELA 5.88 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (5 gerações).....	110
TABELA 5.89 – Valores calibrados e reais (5 gerações).....	110
TABELA 5.90 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (5 gerações).....	110
TABELA 5.91 – Pesos adotados para cada conjunto de medidas.....	112
TABELA 5.92 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$).....	113
TABELA 5.93 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$).....	113
TABELA 5.94 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$).....	113
TABELA 5.95 – Valores de K para registro de gaveta parcialmente fechado.....	115
TABELA A.1 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (1 geração).....	135

TABELA A.2 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (1 geração).....	135
TABELA A.3 – Valores calibrados e reais (1 geração).....	135
TABELA A.4 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (1 geração).....	136
TABELA A.5 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (5 gerações).....	136
TABELA A.6 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (5 gerações).....	136
TABELA A.7 – Valores calibrados e reais (5 gerações).....	136
TABELA A.8 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (5 gerações).....	137
TABELA A.9 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (30 gerações).....	137
TABELA A.10 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (30 gerações).....	137
TABELA A.11 – Valores calibrados e reais (30 gerações).....	137
TABELA A.12 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (30 gerações).....	138
TABELA A.13 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (50 gerações).....	138
TABELA A.14 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (50 gerações).....	138
TABELA A.15 – Valores calibrados e reais (50 gerações).....	138
TABELA A.16 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (50 gerações).....	139
TABELA B.1 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (1 geração).....	141
TABELA B.2 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (1 geração).....	141
TABELA B.3 – Valores calibrados e reais (1 geração).....	141
TABELA B.4 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no	

método Simplex (1 geração).....	142
TABELA B.5 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (10 gerações).....	142
TABELA B.6 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (10 gerações).....	142
TABELA B.7 – Valores calibrados e reais (10 gerações).....	142
TABELA B.8 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (10 gerações).....	143
TABELA B.9 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (20 gerações).....	143
TABELA B.10 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (20 gerações).....	143
TABELA B.11 – Valores calibrados e reais (20 gerações).....	143
TABELA B.12 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (20 gerações).....	144
TABELA C.1 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,1$ e $w^P = 0,9$).....	146
TABELA C.2 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,1$ e $w^P = 0,9$).....	146
TABELA C.3 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,1$ e $w^P = 0,9$).....	146
TABELA C.4 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,2$ e $w^P = 0,8$).....	147
TABELA C.5 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,2$ e $w^P = 0,8$).....	147
TABELA C.6 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,2$ e $w^P = 0,8$).....	147
TABELA C.7 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,3$ e $w^P = 0,7$).....	148
TABELA C.8 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,3$ e $w^P = 0,7$).....	148
TABELA C.9 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,3$ e $w^P = 0,7$).....	148
TABELA C.10 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,4$ e $w^P = 0,6$).....	149

TABELA C.11 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,4$ e $w^P = 0,6$).....	149
TABELA C.12 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,4$ e $w^P = 0,6$).....	149
TABELA C.13 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,7$ e $w^P = 0,3$).....	150
TABELA C.14 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,7$ e $w^P = 0,3$).....	150
TABELA C.15 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,7$ e $w^P = 0,3$).....	150
TABELA C.16 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,8$ e $w^P = 0,2$).....	151
TABELA C.17 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,8$ e $w^P = 0,2$).....	151
TABELA C.18 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,8$ e $w^P = 0,2$).....	151
TABELA C.19 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,9$ e $w^P = 0,1$).....	152
TABELA C.20 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,9$ e $w^P = 0,1$).....	152
TABELA C.21 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,9$ e $w^P = 0,1$).....	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
AD	amostragem determinística (operador de seleção)
AG	algoritmo genético
AGs	algoritmos genéticos
ASCE	American Society of Civil Engineers
<i>BLX-α</i>	recombinação mistura (<i>Blend Crossover</i>)
EPA	United States Environmental Protection Agency
IWA	International Water Association
IWRA	International Water Resources Association
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MSHDD	modelos de simulação hidráulica dirigidos pelas demandas
MSHDP	modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão
PB	Estado da Paraíba
RJ	Estado do Rio de Janeiro
RS	Estado do Rio Grande do Sul
SP	Estado de São Paulo
SRS	<i>Stochastic Remainder Sampling</i>
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UK	United Kingdom
USA	United States of America

LISTA DE SÍMBOLOS

A	matriz Jacobiana
a	parâmetro de ajuste temporal do número de quebras, coeficiente do modelo pressão x demanda, coeficiente do escalonamento linear
a/D	grau de fechamento do registro
b	coeficiente do modelo pressão x demanda, coeficiente da recombinação aritmética, coeficiente do escalonamento linear
c	coeficiente de vazamento, coeficiente do escalonamento
C	demanda de consumo
c_1	coeficiente de vazamento para a rede modelada
c_2	coeficiente de vazamento para a rede não-modelada
D	diâmetro da tubulação
D'	demanda (variável de decisão)
d^*	demanda de referência
d	expoente dependente do valor do diâmetro, demanda requerida
e	vetor unitário
f	função de aptidão, nó, fator de atrito
f'	função de aptidão com escalonamento
F	vetor de balanço de massa
FE	fator multiplicador da demanda (correção espacial)
FO	função objetivo
FT	fator multiplicador da demanda (temporal)
g	aceleração da gravidade
h	perda de carga total
H	carga hidráulica, vetor de incógnitas em termos das cargas hidráulicas
I	vetor coeficiente de perda e rugosidade absoluta
ID	identificação da tubulação que contém registro
I_d	número de medidas
J	conjunto dos nós conectados a um nó
J_d	conjunto de nós com demandas

J_f	conjunto de nós com carga hidráulica constante
J_s	conjunto de nós
k	coeficiente auxiliar no cálculo da perda de carga, coeficiente dependente do tipo de material e instalação, instante da simulação, tubulação
K	coeficiente de descarga do orifício, coeficiente de vazamento no nó, coeficiente de perda de carga localizada
L	comprimento da tubulação
Le	comprimento equivalente
$\log$	logaritmo
m	instante da simulação, coeficiente de perda de carga localizada
M	número de tubulações ligadas ao um nó, função do método Simplex
$\max$	maximizar
$\min$	minimizar
N	número de nós, distribuição normal
n	número de variáveis, expoente do modelo pressão x demanda, cromossomos (soluções), número de vértices
n_b	número de quebras de tubulações
n_d	número de nós com demandas homogêneas
n_D	número de tubulações com diâmetros homogêneos
n^P	número de padrões de demanda com observações de pressão
NF	nós com carga hidráulica fixa
NP	número de tubulações da rede, padrão de demanda
n^{PD}	número de padrões de demanda observados
NPN	número de nós com carga hidráulica desconhecida
n^Q	número de padrões de demanda com observações de vazão
nvd	número total das variáveis de decisão
n_T	número de registros
n_z	número de nós com cotas topográficas homogêneas
n_β	número de tubulações com expoentes de vazamento homogêneos
n_ϵ	número de tubulações com rugosidades absolutas homogêneas
n_θ	número de tubulações com coeficientes de vazamento homogêneos
p	cromossomo pai, média

P	pressão
PNA	parcela da demanda que não é atendida
q	vazamento
Q	vazão
q_1	vazamento na rede modelada
q_2	vazamento na rede não-modelada
$\bar{q}_1$	vazamento médio para a rede modelada
$\bar{q}_2$	vazamento médio para a rede não-modelada
Q_c	vazão abastecida total
Q_d	demanda efetivamente abastecida
Q_s	vazão injetada controlada
R	conjunto dos nós conectados a um nó, coeficiente de resistência da tubulação
r	termo constante da equação de perda de carga distribuída
$R^0(V_{ij})$	perda localizada de uma válvula
s	cromossomo filho
sen	seno
sgn	sinal
T	número de intervalos na simulação
TD	demanda total efetivamente abastecida
TDP	demanda potencial total
TS	vazão total abastecida
TS^*	demanda total de referência
v	vazamento, velocidade
V	vazamento total, válvula
V_k	abertura da válvula
w^P	peso atribuído às pressões observadas
w^Q	peso atribuído às vazões observadas
x	vetor
x	vértice, inverso da derivada da perda de carga total
y	fator de correção da vazão
z	cota topográfica

Z	função objetivo, conjunto de variáveis de decisão, valor do evento
α	coeficiente função do diâmetro, auxiliar no intervalo de variação
β	expoente de perda por vazamento
γ	expoente do modelo pressão x demanda
Δ	desvio
Δh	perda de carga distribuída
ΔH	perda de carga localizada
δ	vetor auxiliar
δ_l	coeficiente de análise da pressão no nó
ε	rugosidade absoluta da tubulação
θ	coeficiente de perda por vazamento
λ	coeficiente auxiliar no cálculo da rugosidade relativa
μ	coeficiente de reflexão
π	número pi, coeficiente de proporção de vazamento
π_1	porcentagem de vazamento na rede modelada
π_2	porcentagem de vazamento na rede não-modelada
ρ	fator multiplicador do modelo pressão x demanda
σ	desvio padrão
Σ	somatório
τ	idade da tubulação
ψ	coeficiente de contração
ω	coeficiente de expansão
$\in$	pertence

Subscritos

i	nó, tubulação, gene, solução (cromossomo), vértice, variável de decisão
j	nó, tubulação, gene
n	vértices
t	padrão de consumo
0	jusante

Sobrescritos

-	valor médio
*	valor observado
θ	centróide
av	valor médio
C	contração
des	desejável
exp	expoente do operador escalonamento
E	expansão
H	vértice com maior valor da função objetivo
L	vértice com o menor valor da função objetivo
$máx$	máximo
$mín$	mínimo
n	expoente da fórmula de perda de carga
R	reflexão
s	setor da rede
S	vértice com o segundo maior valor da função objetivo

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
<i>ABSTRACT</i>	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 <i>Justificativa</i>	2
1.2 <i>Objetivo</i>	3
II. MODELOS HIDRÁULICOS.....	4
2.1 <i>Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água</i>	4
2.2 <i>A Utilização de Modelos de Vazamentos</i>	11
2.3 <i>Modelos de Demandas Dependentes da Pressão</i>	24
III. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO.....	29
3.1 <i>Algoritmos Genéticos (AGs)</i>	29
3.1.1 <i>Tipos de AGs</i>	31
3.1.2 <i>Representação das Soluções</i>	31
3.1.3 <i>Operadores Genéticos</i>	32
3.1.4 <i>Recentes Aplicações de AGs em Modelos de Sistemas de Distribuição de Água</i>	36
3.2 <i>Modelo Híbrido</i>	39
IV. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
4.1 <i>Materiais</i>	45
4.2 <i>Modelo Inverso</i>	45
4.2.1 <i>Escolha dos Pesos</i>	47
4.3 <i>Modelo de Simulação Hidráulica</i>	48

4.4	<i>Integração entre os Modelos de Simulação Hidráulica e de Otimização.....</i>	53
4.5	<i>Critério de Convergência.....</i>	55
4.6	<i>Parâmetros dos Algoritmos Genéticos.....</i>	56
4.7	<i>Rede Exemplo.....</i>	56
4.8	<i>Análise da Calibração.....</i>	58
V.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5.1	<i>Algoritmo Iterativo de Avaliação Hidráulica.....</i>	60
5.2	<i>Algoritmo de Calibração.....</i>	68
5.2.1	<i>Análise dos Operadores Genéticos.....</i>	70
5.2.2	<i>Calibração em termos das rugosidades absolutas.....</i>	75
5.2.3	<i>Calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento.....</i>	81
5.2.4	<i>Calibração em termos dos diâmetros.....</i>	87
5.2.5	<i>Calibração em termos das cotas topográficas.....</i>	93
5.2.6	<i>Calibração em termos das rugosidades absolutas, parâmetros do modelo pressão x vazamento, diâmetros e cotas topográficas.....</i>	98
5.3	<i>Modelo Híbrido na Calibração.....</i>	105
5.3.1	<i>Calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento.....</i>	105
5.3.2	<i>Calibração em termos das demandas.....</i>	108
5.4	<i>Utilização de Pesos na Função Objetivo.....</i>	111
5.5	<i>Localização de Componentes Hidráulicos.....</i>	113
VI.	CONCLUSÕES.....	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123
	OBRAS CONSULTADAS.....	133

APÊNDICE A.....	135
APÊNDICE B.....	141
APÊNDICE C.....	146

I - Introdução

Com a crescente demanda de água devido ao aumento do contingente populacional das cidades, há uma urgente necessidade de um gerenciamento eficiente dos recursos hídricos, particularmente quando a exploração de novas fontes hídricas mostra-se dispendiosa e os recursos naturais cada vez mais escassos. A distribuição de água, prática antiga e comum através de redes hidráulicas, pode ser considerada o primeiro passo importante na obtenção de um sistema de abastecimento eficiente. Com isso, as redes de distribuição de águas para abastecimento devem levar em consideração elementos essenciais ao desenvolvimento urbano sustentável, uma vez que são responsáveis pelo transporte e distribuição de um bem cada vez mais escasso e precioso: a água potável.

Levando-se em consideração que há um déficit entre a quantidade total de água produzida e a quantidade de água efetivamente entregue aos consumidores, um estudo mais detalhado da eficiência hidráulica (razão entre a água efetivamente entregue e a água produzida) das redes de distribuição de água deve ser realizado (MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER, 1999). Esta diferença é causada por diversos fatores, tais como vazamentos em tubulações e conexões, medidas inferiores às reais em hidrômetros, consumo público não-registrado ou conexões ilegais.

Considerando que, em uma rede de distribuição de água, os vazamentos dependem das pressões e que estas variam ao longo do dia e que, além disso, as demandas também dependem das pressões, a eficiência hidráulica pode não ser a mesma em períodos diurnos, sob demandas elevadas e pressões baixas, e em períodos noturnos, sob demandas baixas e pressões elevadas. Reconhece-se, portanto, a necessidade da previsão do comportamento das redes sob as mais diversas condições operacionais, que incluem níveis dos reservatórios, demandas, *status* de componentes como válvulas, bombas e outros. Tais previsões só podem ser realizadas a contento com o suporte de modelos matemáticos que descrevam adequadamente as leis físicas que regem o escoamento no interior dos condutos, bem como demandas e vazamentos, especialmente se a parcela relativa a estes últimos for expressiva.

Os modelos de previsão de comportamento produzem resultados mais consistentes na medida em que valores para os parâmetros de campo são conhecidos. Dentre os parâmetros de campo decisivos na reprodução do comportamento hidráulico das redes pode-se mencionar: as rugosidades absolutas, diâmetros, cotas topográficas, demandas e coeficientes de perdas por vazamento, bem como a localização e *status* de componentes hidráulicos. Este estudo propõe a determinação de valores para tais parâmetros através de modelo inverso, empregando os Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex – NELDER & MEAD, 1965) como ferramentas.

1.1 - Justificativa

A partir das propostas de redução das perdas por vazamento em redes por GERMANOPOULOS & JOWITT (1989) e JOWITT & XU (1990), alguns trabalhos (TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999; MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER, 1999; HERNÁNDEZ et al., 1999) tratam da avaliação dos parâmetros da rede e dos modelos pressão x vazamento, ao mesmo tempo em que consideram relações de dependência entre pressões e demandas na calibração de modelos de sistemas hidráulicos. Além disso, campanhas de campo realizadas dentro do projeto integrado “Controle Operacional e Avaliação de Perdas em um Sub-Sistema Urbano de Distribuição de Água” (sub-projeto da sub-rede 2 da REHIDRO), com o financiamento da FINEP, para determinação de parâmetros de vazamento em setores da rede de distribuição de água de São Carlos, SP, Brasil, demonstraram que os parâmetros de vazamento devem ser estimados conjuntamente com os parâmetros da rede propriamente dita, como rugosidades, diâmetros, demandas e localização de registros, além da necessidade de consideração da dependência das demandas com a pressão. Tal objetivo é perseguido no presente projeto de pesquisa, que visa a construção de uma rotina computacional para a calibração de modelos de redes de distribuição de água, considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão, simultaneamente.

Tendo-se em vista o fato de ser um *software* de domínio público, bem elaborado e amplamente utilizado em trabalhos da literatura, o simulador EPANET 2

(ROSSMAN, 2000) é empregado como rotina auxiliar para avaliação hidráulica no modelo proposto. Além dos motivos mencionados, o EPANET foi escolhido por possibilitar a implementação da rotina proposta na linguagem C++, visto que o próprio EPANET (implementado em linguagem C) e a biblioteca para desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos (*GAlib C++*) utilizam esta linguagem.

1.2 - Objetivo

O objetivo deste trabalho foi construir uma rotina computacional com vistas à calibração de modelos de redes de abastecimento em termos das rugosidades absolutas, diâmetros, cotas topográficas, demandas e parâmetros do modelo de vazamentos, bem como a localização de componentes hidráulicos, através da resolução do problema inverso, baseado na minimização dos desvios entre parâmetros observados e simulados, tais como pressões e vazões.

A literatura atual oferece duas possibilidades de avaliação das perdas por vazamento: explícita ou iterativa. A avaliação explícita é realizada introduzindo-se os modelos (equacionamentos) envolvidos diretamente na simulação hidráulica das redes. Isso é possível implementando-se um código específico ou utilizando-se um código computacional que possa sofrer intervenção direta. Caso contrário, deve-se usar um procedimento de avaliação iterativo. O presente trabalho de pesquisa lança mão de procedimento iterativo de avaliação de perdas por vazamento e demandas dependentes da pressão, uma vez que se utiliza um *software* já existente e testado. Trata-se do simulador hidráulico EPANET, que apresenta possibilidades de inclusão de componentes hidráulicos diversos, generalizando os estudos já realizados.

É utilizada rede hipotética da literatura para teste dos algoritmos de otimização, com emprego da biblioteca de distribuição livre *GAlib C++* (WALL, 1996) do Departamento de Engenharia Mecânica do “Massachusetts Institute of Technology”-MIT para desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos. Além disso, um procedimento híbrido é proposto, consistindo no uso dos Algoritmos Genéticos e do Método Simplex (NELDER & MEAD, 1965).

II – Modelos Hidráulicos

A literatura foi revisada enfocando tanto os modelos para calibração quanto os que consideram vazamentos e demandas dependentes da pressão a serem considerados na calibração.

2.1 - Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água

Modelos para análise e projeto de sistemas de distribuição de água têm existido por várias décadas e, atualmente, muitos avanços e até mesmo sofisticacões têm sido incorporadas para que eles tenham maior aplicabilidade.

A aplicabilidade dos modelos de redes hidráulicas depende da precisão dos dados de entrada (ORMSBEE & LINGIREDDY, 1997). Assim, o emprego de modelos de simulação de redes, por sua vez, requer que os parâmetros relevantes do ponto de vista hidráulico sejam identificados com vistas à reprodução (previsão) realística do comportamento do sistema, sob diferentes condições operacionais. Este processo é chamado de calibração.

Diversos métodos de calibração têm sido propostos na literatura como os métodos que empregam procedimentos *ad hoc* (WALSKI, 1983 e 1986; BHAVE, 1988) baseados em algoritmos apoiados em equações analíticas para a calibração dos fatores de atrito das tubulações e demandas nos nós.

ORMSBEE & WOOD (1986) propuseram um método explícito para calibração de redes de distribuição de água. O processo é formulado em termos dos fatores de atrito e de uma reformulação das equações governantes do escoamento, que são resolvidas explicitamente para determinadas condições operacionais.

Os métodos explícitos, também conhecidos como analíticos ou diretos, resolvem um sistema de n equações não-lineares que descrevem a hidráulica da rede para um conjunto de n desconhecidos, os quais podem incluir os parâmetros a serem estimados. Essa sistemática requer que o número de medidas de pressões e/ou vazões empregadas seja igual ao número de parâmetros desconhecidos.

BOULOS & WOOD (1990) também apresentaram um algoritmo explícito para determinar diretamente uma variedade de parâmetros de projeto, operação e calibração de redes de distribuição de água. Esta aplicação oferece uma base para determinar valores ótimos dos vários parâmetros de projeto, operação e calibração, no sentido que estes podem ser calculados para encontrar as restrições específicas de vazão e pressão sob diversas condições de operação. Para a resolução simultânea do sistema de equações foi utilizado o método de Newton-Raphson como procedimento de linearização dos termos não-lineares.

BOULOS & ORMSBEE (1991) apresentaram um aperfeiçoamento do método explícito proposto por ORMSBEE & WOOD (1986). O método original foi desenvolvido para determinar um conjunto de coeficientes de rugosidade com base em diversas observações de vazões e pressões (levantadas durante testes de incêndio) sob determinadas condições de contorno. A principal deficiência desta aproximação é devida ao reconhecimento de que múltiplos testes de incêndio devam ser realizados simultaneamente. Assim, o método foi estendido para que diversos testes de incêndio, sob diferentes condições de contorno (observações em tempos diferentes), pudessem ser considerados.

Utilizando o método de Newton-Raphson para a resolução do sistema de equações não-lineares no processo de calibração, FERRERI, NAPOLI & TUMBILOLO (1994) apresentam uma metodologia para a avaliação dos coeficientes de rugosidades de tubulações de uma rede de distribuição de água utilizando dados de pressões e vazões em determinados pontos de observação. Os autores utilizam uma matriz de sensibilidade para determinação da rede de amostragem e concluem que o melhor período para obtenção dos dados é o noturno.

CHEUNG (2001) fez um estudo comparando os métodos para calibração apresentados por WALSKI (1983), BHAVE (1988) e BOULOS & WOOD (1990). No caso deste último trabalho, o autor propõe melhorias na metodologia como generalização do método, antes restrito apenas a uma rede da literatura, e a inclusão de um simulador hidráulico proposto por SOUZA (1994).

Partindo de algumas informações de pressão e vazão da rede de distribuição de água, os métodos implícitos recorrem ao uso de uma função objetivo para a aproximação do problema inverso, que consiste em minimizar essa função objetivo,

usualmente a norma do erro total, que corresponde à soma das diferenças entre os valores das variáveis de estado (pressões e vazões) medidas e calculadas, onde as variáveis de decisão são os parâmetros desconhecidos do modelo.

Assim, ORMSBEE (1989) desenvolveu um método matemático implícito para calibração de modelos de redes de distribuição de água. O método utilizou um algoritmo de otimização não-linear juntamente com uma rede complexa, ajustando os parâmetros do modelo selecionado para diversas condições de carga em regime permanente, para período de operação estendido. Os melhores resultados foram obtidos com o uso de duas etapas no processo de calibração. Na primeira etapa, os valores de rugosidade das tubulações foram calibrados com base em condições de regime permanente (elevada perda de carga) enquanto que na segunda etapa a distribuição de demanda foi calibrada baseada em condições no período estendido (baixa perda de carga).

Uma aproximação similar à de ORMSBEE (1989) foi apresentada por LANSEY & BASNET (1991), segundo a qual o algoritmo de programação não-linear incorporou um modelo de simulação hidráulica. O método pode ser aplicado tanto no regime permanente quanto no período estendido para a calibração de coeficientes de rugosidade, aberturas de válvulas e demandas nos nós. Os autores admitiram que as medições eram exatas e o modelo tinha o objetivo de minimizar a soma dos quadrados ou valores absolutos das diferenças entre valores observados e estimados de vazões nas tubulações e energias nos nós. A divergência quadrática determinou soluções mais rápidas do que a divergência absoluta.

DATTA & SRIDHARAN (1994) apresentaram um método de calibração de coeficientes de rugosidade baseado na solução do problema inverso, expresso como a minimização dos quadrados das diferenças dos valores computados e observados, incluindo pesos nos desvios dos valores na função objetivo. A vantagem deste método é que diferentes condições de demanda com variado número de medidas de pressão e vazão para cada condição podem ser utilizados. Incertezas nos valores dos parâmetros estimados são obtidas através de uma análise de sensibilidade. Além disso, uma metodologia para a adoção dos pesos, baseada nos valores observados para as diferentes condições de demanda, é apresentada. O método foi aplicado para uma rede de distribuição de água da região metropolitana de Bangalore, na Índia, e o

efeito da escolha (determinação) dos pesos, das estimativas iniciais dos parâmetros e das incertezas nos valores destes são discutidos.

Baseado no trabalho de DATTA & SRIDHARAN (1994), REDDY, SRIDHARAN & RAO (1996) propuseram um método de calibração com uma metodologia melhorada para a determinação dos pesos. Esta é baseada na variância dos valores de pressões e vazões observados e simulados, com uma sistemática de dois passos para o procedimento de adoção dos pesos, que variam ao longo do processo de otimização até que uma convergência para estes pesos seja alcançada. O método é aplicado para três diferentes redes de distribuição de água, sendo uma real.

Visando melhorar a precisão dos resultados da calibração de modelos de redes de distribuição de água, bem como o tratamento de redes mais complexas, SAVIC & WALTERS (1997a) empregaram os Algoritmos Genéticos como métodos de busca no processo de otimização. Diversos usos dos Algoritmos Genéticos, técnicas baseadas no princípio da evolução natural, são descritos no trabalho e um estudo de caso analisado para a cidade de Exeter, Inglaterra. O método proposto foi utilizado para a calibração dos coeficientes de rugosidade da rede e os resultados foram comparados com aqueles de procedimentos de tentativa e erro, apresentando total dominância dos Algoritmos Genéticos sobre estes últimos. Além disso, outras características dos Algoritmos Genéticos favoráveis aos seus usos foram: facilidade de utilização, já que não necessitam de formulações matemáticas complexas, baseadas em equações diferenciais ou inversões de matrizes; utilização em redes de distribuição de água complexas e de grandes dimensões, com um alto número de parâmetros e condições de demanda a serem analisados; incorporação de parâmetros adicionais no processo de calibração, tais como diâmetros das tubulações, demandas, cotas topográficas, e outros.

Os Algoritmos Genéticos também são utilizados nos trabalhos de WALTERS et al. (1998) para a determinação das rugosidades absolutas, De SCHAEZTEN et al. (2000), que, além das rugosidades absolutas, avaliam diâmetros das tubulações e demandas nos nós, e LINGIREDDY & ORMSBEE (2002), para a avaliação de rugosidades absolutas e demandas.

Utilizando o simulador hidráulico EPANET, GAMBALE (2000) avaliou os Algoritmos Genéticos na calibração de modelos de redes de distribuição de água. São

realizados estudos quanto à influência dos operadores genéticos e do número de pontos monitorados na determinação dos coeficientes de rugosidade de uma rede hipotética. O autor evidenciou a robustez dos AGs e a necessidade de uma rede de amostragem otimizada para a calibração.

Também utilizando os AGs como método de busca, RIGHETTO (2001) propõe uma técnica de calibração de modelos de redes de distribuição de água, visando a determinação das demandas nodais e rugosidades absolutas e diâmetros das tubulações. O modelo hidráulico empregado baseia-se no método dos nós e na técnica dos elementos finitos, sendo cada trecho da rede considerado como um elemento, em que cada um destes elementos interage diretamente com os nós de suas extremidades. A composição ou soma dos efeitos diretos de todos os trechos da rede sobre um determinado nó resulta na equação da continuidade deste nó. O autor considera a determinação dos pontos de amostragem uma questão chave para a eficiência da calibração, além da associação do modelo operacional com um sistema de monitoramento da rede com informações em tempo real.

Buscando melhorar a solução final e poupar tempo computacional durante as simulações, KAPELAN, SAVIC & WALTERS (2002) propõem um método híbrido para a calibração de modelos de redes de distribuição de água operando no regime transiente. A idéia é utilizar um método de busca global (Algoritmos Genéticos), útil para a “varredura” do espaço de busca, mas que oscila em torno da solução ótima, em conjunto com um método de busca local (Levenberg-Marquardt), que não teria problemas de dependência da solução inicial e nem oscilação em torno da solução ótima. Além da determinação das rugosidades absolutas, o método também é útil para a detecção de vazamentos.

Sem a utilização de pesos ou técnicas avançadas de busca, GRECO & DEL GIUDICE (1999) apresentaram um método para calibração dos coeficientes de rugosidade de redes de distribuição de água com o auxílio de uma matriz de sensibilidade para a otimização não-linear, além de pacotes computacionais para a simulação hidráulica. O algoritmo foi aplicado para uma rede hipotética sob diferentes condições de demandas e os autores evidenciam a facilidade de utilização de pacotes computacionais para a simulação hidráulica e otimização no processo de calibração.

BRDYS et al. (2001) desenvolveram um algoritmo para calibração dos coeficientes de rugosidade utilizando a técnica de linearizações sucessivas em duas e três dimensões para a solução do problema não-linear e não-convexo. O método utilizou pacotes computacionais para o processo de otimização e foi aplicado para um setor da rede de distribuição de água da cidade de Leborg, Polônia. Além disso, uma descrição da incerteza dos parâmetros do modelo também foi realizada.

Com o intuito de estudar as incertezas na calibração causadas pelos erros nos valores medidos em campo e estimados, LANSEY et al. (2001) desenvolveram um procedimento de três passos para calibração, que considera as incertezas nos valores observados e simulados e proporciona o grau de incerteza da solução final. Os passos são a estimativa dos parâmetros, avaliação da calibração e uma metodologia para coleta dos dados. A estimativa dos parâmetros considera as incertezas nos dados de entrada e a incerteza resultante nos parâmetros do modelo. Na avaliação da calibração analisa-se a propagação dos erros nos parâmetros do modelo através de uma matriz covariância. A função objetivo considera diferentes condições de demanda e o quadrado da diferença entre os valores observados e simulados de pressões, vazões e níveis de reservatórios multiplicados por pesos atribuídos pelos autores. A metodologia foi aplicada a uma rede hipotética, mas estudos para redes reais fazem-se necessários, segundo os autores.

MALLICK et al. (2002) desenvolveram uma metodologia para quantificar o impacto introduzido no modelo devido à simplificação deste na escolha de setores com coeficientes de rugosidade homogêneos. O método determina o melhor número de tubulações com o mesmo coeficiente de rugosidade para cada setor da rede, e, também, o melhor número de setores em que a rede de distribuição de água deva ser dividida, de acordo com a idade, tipo de material, diâmetro e localização das tubulações. São analisados pelos autores erros no modelo através de uma matriz covariância em dois exemplos utilizando redes hipotéticas. Os autores evidenciaram o menor esforço na coleta de dados para a calibração e a melhor simplificação do modelo para que este ainda consiga representar as condições físicas do sistema, concluindo que há um ponto ótimo de número de setores com coeficientes de rugosidades homogêneos a serem considerados na simulação.

Os trabalhos citados anteriormente, além de limitarem o processo de calibração a coeficientes de rugosidade, demandas e diâmetros, não consideram perdas por vazamentos e demandas dependentes das pressões no modelo. Novas metodologias para a inclusão das perdas por vazamentos e demandas dependentes das pressões na calibração de modelos de redes de distribuição de água foram apresentadas por TUCCIARELLI & TERMINI (1998), TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), AINOLA et al. (2000) e SILVA et al. (2002) (os dois últimos trabalhos não consideram demandas dependentes das pressões).

TUCCIARELLI & TERMINI (1998) empregam um procedimento de dois passos no processo de calibração. O primeiro passo é a estimativa dos parâmetros no modelo de simulação da rede (inclusive parâmetros do modelo de vazamentos) para um dado conjunto de medidas de pressão. A seguir, as aberturas das válvulas são modificadas para a aquisição de um novo conjunto de medidas. O problema inverso é, então, resolvido novamente e o procedimento é repetido até que haja convergência do conjunto de parâmetros avaliados. O efeito de diferentes correlações entre medidas na mesma localização e diferentes aberturas de válvulas é investigado com a utilização de um esquema elementar (reservatório, tubo e válvula) e uma rede hipotética.

A principal desvantagem do método é o grande esforço computacional necessário para a inversão de duas matrizes da função objetivo para cada conjunto de medidas (resistência das válvulas).

TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) propiciaram um passo adiante ao trabalho de TUCCIARELLI & TERMINI (1998). Além da não utilização de inversão de matrizes, com o emprego do método de busca *Simulated Annealing*, o processo foi empregado em uma rede real com medidas de pressões e vazões na função objetivo (TUCCIARELLI & TERMINI, 1998, não consideraram medidas de vazões na otimização). Outro mérito do método é a possibilidade de quantificação do total de vazamentos em diversos setores da rede, com possibilidade de utilizar dados relativos a testes noturnos.

AINOLA et al. (2000) apresentam uma metodologia para a calibração de coeficientes de rugosidade considerando as perdas por vazamentos no modelo, baseada na setorização da rede de distribuição de água quanto a coeficientes de

rugosidade e perdas por vazamentos similares. O primeiro passo no procedimento de calibração é a distribuição das perdas de água com a utilização de uma formulação empírica, que leva em consideração o comprimento, idade, diâmetro e material das tubulações, além da pressão atuante. A seguir, os coeficientes de rugosidade são estimados através da minimização de uma função objetivo que leva em consideração as pressões medidas e calculadas. O método foi aplicado na rede de distribuição de água da cidade de Tallinn, Estônia, para diferentes tipos de setorização.

Também utilizando um algoritmo de dois passos, SILVA et al. (2002) propuseram um método iterativo para calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento de setores da rede de distribuição de água da cidade de São Carlos, SP, Brasil. O primeiro passo consiste em determinar as rugosidades absolutas das tubulações e o segundo os parâmetros de vazamentos, utilizando a rotina computacional desenvolvida por CALIMAN (2002). Os dados de campo foram obtidos com base em testes noturnos, ideais em áreas com elevada ocorrência de vazamentos. Os autores também propõem um estudo sobre a existência e posição de válvulas na rede, visto que, na prática, as incertezas quanto à localização e *status* do funcionamento de tais componentes podem comprometer a operação do sistema. A ferramenta de busca utilizada é apoiada na tecnologia dos Algoritmos Genéticos, sendo alvo de estudo os diferentes tipos de AGs e operadores inerentes à técnica.

As metodologias de TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) e AINOLA et al. (2000), principalmente no tocante ao tratamento das perdas por vazamentos, são detalhadas no item a seguir, por constituírem alvos de estudos do presente trabalho.

2.2 - A Utilização de Modelos de Vazamentos

Partindo do princípio de que os vazamentos dependem das pressões, os modelos de vazamentos podem ser subdivididos em métodos que se prestam a avaliações globais ou detalhadas da rede. Dentre os modelos de caráter mais globais destacam-se aqueles propostos por NATIONAL WATER COUNCIL (1980), LAMBERT & HIRNER (2000), LAMBERT et al. (2000), todos eles fazendo uso da

pressão média por zona. BURROWS, TANYIMBOH & TABESH (2000) fazem uso da pressão média por zona para o cálculo das perdas por vazamento, mas comentam que a principal deficiência é a falta de capacidade do modelo ser empregado em simulações, admitindo as perdas dirigidas pela pressão.

Dentre os modelos detalhados, diretamente utilizáveis nas simulações hidráulicas, a literatura oferece basicamente duas alternativas quanto à maneira de enquadrá-los. Uma possibilidade é a introdução dos vazamentos explicitamente no modelo de simulação hidráulica da rede (GERMANOPOULOS & JOWITT, 1989; JOWITT & XU, 1990; SALGADO, ROJO & ZEPEDA, 1993; TUCCIARELLI & TERMINI, 1998; TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999; MARTÍNEZ et al., 1999; MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER, 1999). A outra alternativa é supor que as perdas, função das pressões nos nós da rede, possam ser avaliadas iterativamente, sem que sejam explicitadas relações pressão x vazamento internamente ao modelo (HERNÁNDEZ et al., 1999). Observa-se que essa última forma facilita o acoplamento do problema de calibração com pacotes computacionais que não incorporam explicitamente os vazamentos no modelo, implicando em um tempo computacional maior, dada a natureza iterativa do procedimento. Apresentam-se a seguir as possíveis formulações de maneira a explicitar os vazamentos como componentes dos modelos de simulação hidráulica.

GERMANOPOULOS & JOWITT (1989) empregaram explicitamente as perdas por vazamento no modelo a partir de relações pré-estabelecidas dos parâmetros pressão x vazamento. A função relacionando pressão nos nós e perda por vazamentos é incorporada nas equações de continuidade dos nós no sentido de se obter uma determinação real dos efeitos do controle de pressão sobre as perdas por vazamentos. O problema da minimização do excesso de pressão é formulado com uma função objetivo linear e um conjunto de restrições não-lineares, por causa da não linearidade das equações de continuidade nos nós. O método da teoria linear é utilizado para a solução do problema não-linear de minimização do excesso de pressão até que sejam determinados o conjunto de aberturas ótimas das válvulas de controle de pressão e as correspondentes energias e vazões da rede. Assim, benefícios, tais como reduções no desperdício de água e redução de rompimento de tubulações, são também identificados.

O modelo é formulado com base na equação da continuidade para cada nó:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} + C_i + 0,5 \sum_{j \in J_i} q_{ij} = 0 \quad (2.1)$$

onde Q_{ij} representa a vazão entre os nós i e j , C_i é a demanda de consumo no nó i , J_i são todos os nós conectados ao nó i e q_{ij} é o vazamento na tubulação entre os nós i e j .

Os autores utilizam uma relação entre vazamento e pressão previamente conhecida experimentalmente, que aplicada a cada tubulação resulta em:

$$q_{ij} = c_l L_{ij} (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad (2.2)$$

onde c_l é uma constante que depende das características da rede, L_{ij} é o comprimento da tubulação entre os nós i e j e P_{ij}^{av} é a média entre as pressões no início e no final da tubulação. Assim, a equação (2.2) pode ser escrita diretamente em função das energias dos nós e correspondentes cotas topográficas:

$$q_{ij} = c_l L_{ij} [0,5.(H_i - z_i + H_j - z_j)]^{1,18} \quad (2.3)$$

onde H_i é a carga hidráulica e z_i a cota topográfica do nó i .

A função objetivo para a determinação das aberturas (V_k) ótimas consiste na minimização do somatório das diferenças entre as cargas hidráulicas calculadas H_i e as cargas hidráulicas requeridas H_i^* necessárias para atender a demanda, para I_d medidas:

$$\min_{V_k} \sum_{i \in I_d} (H_i - H_i^*) \quad (2.4)$$

sujeito a:

- (a) equação da continuidade nos nós (eq. (2.1));
- (b) aberturas máxima e mínima das válvulas:

$$V_k^{min} \leq V_k \leq V_k^{max} \quad (2.5)$$

- (c) carga hidráulica mínima para os nós:

$$H_i \geq H_i^* \quad (2.6)$$

De acordo com a metodologia proposta pelos autores, as variáveis desconhecidas são as cargas hidráulicas H_i e as aberturas das válvulas V_k incorporadas à rede. Os dados que devem ser inicialmente conhecidos são as cargas hidráulicas nos nós ligados aos reservatórios, a localização e as aberturas máximas e mínimas das válvulas, as demandas e cotas topográficas dos nós, as características

das tubulações da rede (comprimento, diâmetro e coeficiente de rugosidade), a carga hidráulica mínima para atender a demanda nos nós, e a relação pressão x vazamento da rede.

JOWITT & XU (1990) apresentam um algoritmo que melhora o trabalho proposto por GERMANOPOULOS & JOWITT (1989), consistindo na minimização das perdas por vazamentos diretamente, e não na minimização do excesso de pressões. O modelo proposto também usa técnicas de linearizações sucessivas, porém com uma sistemática mais apropriada para o problema, o que resultou em uma solução mais eficiente. As aberturas ótimas das válvulas devem ser determinadas para que a redução das perdas por vazamento seja satisfeita. A função objetivo proposta minimiza a soma das perdas por vazamentos e é dada por:

$$\min_{V_k} \sum_{ij \in R} q_{ij} \quad (2.7)$$

onde R é o conjunto dos nós conectados pela tubulação ij .

SALGADO, ROJO & ZEPEDA (1993) propõem uma extensão do Método Gradiente, desenvolvido inicialmente por TODINI & PILATI (1988), com a inclusão de vazamentos e demandas variáveis com a pressão para a simulação de modelos de redes de distribuição de água. A formulação de vazamentos é a mesma que a descrita pela eq. (2.2) e o modelo de demandas dirigidas pela pressão segue a equação dos orifícios. Testes do modelo quanto à convergência foram realizados para um sistema hipotético e os autores evidenciaram a confiabilidade e eficiência do novo método.

PEZZINGA (1994) propõe o uso da lógica *fuzzy* para a operação otimizada das válvulas redutoras de pressão para redução das perdas por vazamentos, em substituição ao método da teoria linear.

HINDI & HAMAM (1991a,b) também enfocaram o controle de pressão para a minimização de perdas por vazamentos, onde o objetivo do trabalho foi desenvolver modelos matemáticos e técnicas computacionais para determinar a abertura de válvulas redutoras de pressão. Na primeira parte do trabalho, o problema é investigado para um conjunto conhecido de demandas e níveis nos reservatórios. Na segunda parte, um modelo é desenvolvido para minimizar as perdas quando diversos conjuntos de demandas são conhecidos. No trabalho apresentado pelos autores, os dois modelos desenvolvidos com sistemáticas de linearizações alternativas foram utilizados para a análise de diversos casos de estudo.

Outros trabalhos presentes na literatura comentam a dificuldade de convergência dos modelos de GERMANOPOULOS & JOWITT (1989) e JOWITT & XU (1990). Alguns autores propõem soluções para esse problema, tais como VAIRAVAMOORTHY & LUMBERS (1998) e GUELI & PEZZINGA (1998). Todos eles empregando basicamente a mesma formulação pré-estabelecida para o modelo de vazamento.

VAIRAVAMOORTHY & LUMBERS (1998) tratam apenas da otimização das aberturas das válvulas para uma dada localização destas, sem considerar localizações ótimas. A metodologia apresentada envolve o uso de técnica de solução baseada em uma programação quadrática seqüencial, gerando a cada passo uma direção que é usada para corrigir o vetor solução.

Duas funções objetivo foram consideradas e incorporadas no modelo de otimização. A primeira minimiza o volume total de vazamento na rede:

$$\min Z_1 = \sum_{k=1}^{NP} q_{ij} \quad (2.8)$$

onde NP é o número de tubulações da rede.

A segunda função objetivo minimiza a soma dos quadrados dos desvios entre a pressão dos nós e a pressão mínima requerida para esses nós:

$$\min Z_2 = \sum_{i=1}^{NPN} (H_i - H_i^*)^2 \quad (2.9)$$

onde NPN é o número de nós com carga hidráulica desconhecida.

As restrições para as duas funções objetivo são: a equação da continuidade para cada nó, incluindo a dependência pressão x vazamento; e as pressões e aberturas das válvulas máximas e mínimas.

GUELI & PEZZINGA (1998) propõem o emprego de Algoritmos Genéticos para a determinação das aberturas das válvulas redutoras de pressão a fim de reduzir as perdas por vazamento, em substituição à técnica de programação não-linear, visando aumentar o grau de eficiência na convergência.

REIS, PORTO & CHAUDHRY (1997) desenvolvem uma proposta de solucionar o problema da localização ótima de válvulas de controle de pressão em um sistema de distribuição de água, bem como o número de válvulas a adotar, via Algoritmos Genéticos, que maximizam a redução de vazamentos para dadas demandas nos nós e níveis de reservatórios. O modelo de JOWITT & XU (1990) é

utilizado para a avaliação hidráulica da rede e a determinação das aberturas otimizadas das válvulas. Partindo de um número máximo pré-estabelecido de válvulas e demandas nos nós e níveis de reservatórios conhecidos, o algoritmo genético determina, simultaneamente, a localização destas válvulas maximizando a redução de vazamentos, através de aberturas ótimas das válvulas.

O vazamento, considerado explicitamente na formulação, é minimizado para obter as aberturas ótimas das válvulas para uma dada localização destas, e, então, a redução de vazamento é maximizada pelo uso de algoritmo genético para determinar a localização ótima destas válvulas. Um estudo dos efeitos da variação das demandas na localização ótima das válvulas indicou combinações distintas de localização das válvulas para diferentes padrões de demandas nodais e para diferentes demandas totais. Uma das vantagens do uso de Algoritmos Genéticos na formulação é a variedade de soluções envolvendo um número pequeno de válvulas.

Os autores citados anteriormente desenvolveram seus trabalhos considerando relações pré-estabelecidas dos parâmetros pressão x vazamento. Alguns autores apresentam metodologias para a determinação da relação pressão x vazamento, como KHADAM, SHAMMAS & AL-FERAIHEEDI (1991), ARREGUÍN-CORTES & OCHOA-ALEJO (1997), LAMBERT & HIRNER (2000) LAMBERT et al. (2000) e LAMBERT (2001), considerando dados extraídos de campo e aplicando análises estatísticas na investigação dos parâmetros.

KHADAM, SHAMMAS & AL-FERAIHEEDI (1991) realizaram medições das taxas de vazamentos para valores médios de pressão atuante na rede de distribuição de água da cidade de Riad, Arábia Saudita, e através de um estudo demográfico e de consumo em cada área, as relações pressão x vazamento não mostraram seguir uma variação exponencial específica, diferindo para cada área de estudo. De acordo com os autores, essa não uniformidade das relações pressão x vazamento evidenciou o caráter local dos parâmetros do modelo pressão x vazamento, e aparentemente ocorreu devido a diversos fatores como variação na pressão de serviço durante o dia, fadiga dos tubos devido às bruscas variações térmicas, diversos tipos de materiais e diâmetros usados nas tubulações, e a forma de instalação e construção das juntas das tubulações.

ARREGUÍN-CORTES & OCHOA-ALEJO (1997) propõem um método para determinar perdas de água em redes de distribuição, ligações residenciais, conexões não autorizadas e medidores residenciais. Este método é baseado em amostragem de setores previamente definidos (residenciais, industriais etc.) e medições de vazamentos nas conexões, observação de usuários com baixo consumo mensal, verificação de medidores residenciais, e medidas hidrométricas em distritos da cidade. Utilizando uma análise estocástica e o método das características para a resolução das equações, os autores propõem uma variação linear da curva pressão x vazamento, diferente do que os autores citados anteriormente, já que eles utilizam uma curva pressão x vazamento exponencial. O método foi aplicado em quinze cidades mexicanas, registrando um índice médio de 36% de perdas por vazamentos da água tratada e distribuída nas cidades.

Outra metodologia para a determinação dos parâmetros do modelo de vazamentos em redes de distribuição de água é apresentada por LAMBERT & HIRNER (2000). Utilizando-se de dados extraídos de observações reais e aplicando análises estatísticas para o tratamento destes dados (LAMBERT et al., 2000), os autores visam avaliar a eficiência hidráulica da rede considerando uma taxa mínima de vazamentos na rede, já que sistemas estanques são considerados inexistentes. Como alternativa para o cálculo de vazamentos da rede, LAMBERT & HIRNER (2000) propõem um estudo baseado em um balanço de massa envolvendo: o volume total de água que entra no setor da rede; o consumo de água autorizado pago e não-pago, o consumo medido e não-medido pago e não-pago; e as perdas de água aparente (consumo não-autorizado e medidores não-calibrados) e real (vazamentos nas linhas de distribuição, nas conexões entre os medidores prediais e a rede de distribuição de água, e, caso existam, nos reservatórios).

O método avalia a eficiência da rede relacionando a perda real registrada pelo balanço de massa e a perda real mínima do sistema, a qual depende do comprimento das linhas de distribuição, do número de conexões ligadas à rede, do comprimento das conexões dos medidores prediais à rede de distribuição, e de parâmetros da rede baseados em análises estatísticas de vazamentos não identificados e quebras de tubulações registradas e não-registradas com respectivos volumes perdidos, duração dos vazamentos e pressão média atuante (LAMBERT et al., 2000).

LAMBERT (2001) determina os parâmetros do modelo pressão x vazamento (coeficiente de perda) para diferentes materiais de tubulações, evidenciando a sensibilidade das perdas com a variação da pressão atuante.

Dentre os trabalhos que visam à determinação dos parâmetros do modelo de vazamentos e que se dedicam a tais investigações por meio de simulação da rede, podem ser citados os trabalhos de TUCCIARELLI & TERMINI (1998), TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), MARTÍNEZ et al. (1999), MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER (1999), HERNÁNDEZ et al. (1999), ALONSO et al. (2000) e AINOLA et al. (2000).

TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) desenvolveram uma estimativa de perda de água através de pequenos vazamentos em diferentes áreas de uma rede de distribuição de água por meio de um processo iterativo de dois passos. O primeiro passo consiste na estimativa dos parâmetros do modelo de simulação da rede. Esta etapa é realizada através da minimização de uma função objetivo igual à soma dos quadrados das diferenças entre as cargas hidráulicas e vazões observadas e os valores calculados para um dado número de nós e tubulações. Os parâmetros estimados incluem o coeficiente e o expoente de perda, que correspondem à perda de água para cada área da rede (chamadas zonas). O segundo passo consiste na otimização das aberturas das válvulas situadas na rede, tendo como restrições as pressões mínimas e a equação da continuidade nos nós.

O modelo de simulação empregado no procedimento de calibração relaciona os parâmetros da rede e as variáveis vazão e carga hidráulica. O modelo assume que o escoamento seja permanente e que a rugosidade absoluta e o coeficiente de perda são iguais para determinadas áreas da rede, combinando as equações de conservação de massa e conservação da quantidade de movimento em apenas uma equação algébrica:

$$\sum_{j=1}^{M_i} \frac{H_j - H_i}{\sqrt{R_{ij}(I_{ij} \cdot V_{ij})|H_j - H_i|}} - \delta_1 \cdot q_i - C \cdot \rho_i = 0, i = 1, \dots, N \quad (2.10)$$

onde N é o número total de nós, M_i é o número total de tubulações ligadas ao nó i , q_i é a perda de água nas tubulações ligadas ao nó i , δ_1 é igual a 1 ou zero se a pressão total no nó i é maior ou menor, respectivamente, que a cota topográfica deste, C é a demanda total, ρ_i é o fator multiplicador da demanda total (restrição da demanda

atendida) no nó i , I é um vetor, com cada valor correspondendo a um único valor de coeficiente de perda e rugosidade, V_{ij} é uma possível válvula localizada na tubulação entre os nós i e j e R_{ij} é o coeficiente de resistência da tubulação que liga o nó i ao nó j e é igual, de acordo com a fórmula de Prandtl-Nikuradse, a:

$$R_{ij} = R^0(V_{ij}) + 0,0826 \frac{L_{ij}}{\lambda D_{ij}^5} \quad (2.11)$$

$$\text{sendo } \lambda = 4 \left(\log \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{3,71 D_{ij}} \right) \right)^2 \quad (2.12)$$

onde $R^0(V_{ij})$ é a perda local correspondente a uma possível válvula de índice V_{ij} localizada na tubulação entre os nós i e j , ε_{ij} é a rugosidade absoluta da tubulação entre os nós i e j e D_{ij} é o diâmetro da tubulação ligando o nó i ao nó j .

O termo q_i é calculado assumindo que nas tubulações em cada zona há valores constantes de vazamento por área de superfície de tubo. Assim:

$$q_i = (H_i - z_i)^\beta \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (2.13)$$

onde β é o expoente de perda e θ_{ij} é a taxa de vazamento por unidade de superfície da tubulação ligando o nó i ao nó j .

Avaliando a perda de água através da solução do problema inverso, o valor de q_i pode ser calculado através das estimativas dos parâmetros C , β , θ_{ij} , e ε_{ij} . A estimativa desses parâmetros pode ser feita por medições das cargas hidráulicas totais e vazões para determinados nós e tubulações, respectivamente.

Os autores evidenciam a precisão e estabilidade da solução do problema inverso, testada com sucesso em alguns experimentos numéricos.

MARTÍNEZ et al. (1999) construíram e calibraram um modelo de simulação dinâmico para a cidade de Valência, Espanha, tendo como base o *software* EPANET. O *software* construído possui modelos de qualidade da água e de relação pressão x vazamento, bem como a dependência pressão x demanda. Quanto ao modelo de vazamentos, estes são diferenciados na rede de distribuição de água em vazamentos nas partes modelada e não-modelada do sistema. A parte modelada da rede constitui das linhas principais de distribuição de água (esqueleto), enquanto que os setores com tubulações de menor diâmetro e, portanto, consumos inferiores, são

representados pela demanda total deste setor localizada em um ou mais nós das linhas principais, sendo que esta fração da rede constitui a parte não-modelada. Um estudo mais detalhado dos modelos pressão x vazamento e pressão x demanda do *software* produzido é apresentado por MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER (1999).

Considerando a modelagem aplicada à rede composta de suas linhas principais e partindo da formulação tradicional do cálculo de uma rede de distribuição de água, MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER (1999) propõem uma integração das relações pressão x vazamento e pressão x demanda na formulação geral de cálculo do problema em cada instante m :

$$\sum_{j \in J_i} k_{ij}(m) (H_i(m) - H_j(m)) + \frac{1}{2} \sum_{j \in J_i} q_{1,ij}(m) + q_{2,i}(m) + Q_{d,i}(m) = 0 \quad (2.14)$$

para $i \in J_d$, onde $k_{ij}(m) = R_{ij}^{-0,5}(m) |H_i(m) - H_j(m)|^{-0,5}$, $q_{1,ij}$ é a taxa de vazamento na rede modelada (a parte da rede de distribuição de água considerada no cálculo, já que tubulações de menor diâmetro podem ser substituídas apenas pelo respectivo consumo localizado em um nó) e é dada por:

$$q_{1,ij} = c_1^s L_{ij} \cdot (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad (2.15)$$

onde c_1^s é uma constante dependente das características particulares da rede ou do setor s .

Uma formulação mais complexa para o cálculo da taxa de vazamento na rede modelada é baseada no fato em que as perdas por vazamentos podem ser consideradas proporcionais ao número de defeitos (MARTÍNEZ et al., 1999):

$$n_b = k \cdot L \cdot D^d \cdot e^{a\tau} \quad (2.16)$$

onde n_b é o número de quebras ocorridas durante o intervalo $[0, \tau]$, k é um coeficiente que depende do tipo e qualidade do material e da instalação, L é o comprimento da tubulação, D é o diâmetro, d é um expoente cujo valor é 1 para diâmetros pequenos (menores que 125 mm) e -1 para diâmetros maiores, a é um parâmetro de ajuste da evolução temporal do número de quebras e τ é a idade da tubulação. Portanto, a eq. (2.15) pode ser escrita da seguinte forma:

$$q_{1,ij} = c \cdot L_{ij} \cdot D_{ij}^d \cdot e^{a\tau} (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad (2.17)$$

para um grupo de tubulações de igual material e idade.

Se o vazamento no nó i é dado por:

$$q_{1,i} = \frac{1}{2} \sum_{j \in J_i} q_{1,ij} \quad (2.18)$$

onde J_i é o conjunto de todos os nós conectados ao nó i , o vazamento médio durante o período de simulação para a rede modelada no setor s , será dado por:

$$\bar{q}_1^s = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \sum_{i \in J_d^s} q_{1,i}(k) \quad (2.19)$$

onde $q_{1,i}(k)$ é o vazamento no nó i no instante k , T é o número total de intervalos considerados na simulação e J_d^s é o conjunto de nós com demandas no setor s . Se, por outro lado, π_1^s é a porcentagem de vazamento na rede modelada no setor s , o vazamento médio pode ser escrito como:

$$\bar{q}_1^s = \pi_1^s \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \sum_{j \in J_s^s} Q_{s,j}(k) \quad (2.20)$$

onde $Q_{s,j}(k)$ é a vazão controlada injetada no nó fonte j no instante k e J_s^s é o conjunto de nós do setor s .

Assim, resolvendo as equações (2.19) e (2.20), o valor da constante c_I^s para o setor s pode ser obtido.

Uma expressão similar é proposta para o cálculo da taxa de vazamento médio na rede não-modelada, porém substituindo a porcentagem π_1^s por π_2^s :

$$\bar{q}_{2,i} = \pi_2^s \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T Q_{c,i}(k) \quad (2.21)$$

onde π_2^s é a porcentagem de vazamento na rede não modelada no setor s e $Q_{c,i}(k)$ é a vazão abastecida total no nó i e instante k .

Mas, de acordo com a equação de descarga através de um orifício:

$$q_i = K_i (P_i - P_0)^\beta \quad (2.22)$$

onde P_i é a pressão a montante do orifício, P_0 é a pressão a jusante do orifício, β é um expoente determinado em laboratório e K_i é o coeficiente de descarga do orifício que depende do tipo e da forma deste, o vazamento será dado por:

$$\bar{q}_{2,i} = K_i \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_i^\beta(k) \quad (2.23)$$

onde são assumidos $P_0=0$ e K_i constante ao longo do tempo.

Buscando inserir a porcentagem de vazamento na rede não modelada no setor s (π_2^s), a seguinte restrição é proposta:

$$\sum_{i \in I_s} \bar{q}_{2,i} = \bar{q}_2^s = \pi_2^s \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T \sum_{j \in J_s} Q_{s,j}(k) \quad (2.24)$$

Uma melhor aproximação visando distribuir o vazamento espacialmente sem fixar a porcentagem para cada nó e fazendo o vazamento total de cada nó proporcional à pressão atuante é apresentada a seguir:

$$q_{2,i}(k) = c_2^s \left[\sum_{k=1}^T Q_{c,i}(k) \right] P_i^\beta(k) \quad (2.25)$$

onde c_2^s é o coeficiente de vazamento do setor a ser determinado. De acordo com esta expressão, o vazamento médio no período de simulação será dado por:

$$\bar{q}_{2,i} = c_2^s \left[\sum_{k=1}^T Q_{c,i}(k) \right] \frac{1}{T} \sum_{k=1}^T P_i^\beta(k) \quad (2.26)$$

Substituindo a eq. (2.26) na eq. (2.24), o valor da constante c_2^s para o setor pode ser obtido, e o coeficiente K_i para cada nó será:

$$K_i = c_2^s \left[\sum_{k=1}^T Q_{c,i}(k) \right] \quad (2.27)$$

O último termo da eq. (2.14) representa a demanda efetivamente atendida ($Q_{d,i}$).

Também utilizando como base o simulador hidráulico EPANET, HERNÁNDEZ et al. (1999) propõem um modelo iterativo de simulação baseado no Método Gradiente (TODINI & PILATI¹ *apud* HERNÁNDEZ et al., 1999). O *software* produzido utiliza técnica de computação paralela para diminuir o tempo computacional das simulações, além de um processo iterativo para a integração do modelo pressão x vazamento. O processo possui os seguintes passos:

- 1- As perdas por vazamento são assumidas iguais a zero em cada nó;
- 2- As pressões em cada nó são calculadas através do modelo de simulação;
- 3- Uma aproximação do vazamento em cada nó i é obtida da seguinte formulação:

¹ TODINI, E.; PILATI, S. (1987). A Gradient Method for the Solution of Looped Pipe Networks. *Computer Applications in Water Supply*, vol. 1, RSP, UK.

$$q_i = K_i \cdot P_i^{1,1} \quad (2.28)$$

onde K_i é um coeficiente para cada nó, suposto constante para longos períodos do dia;

- 4- Soma-se a perda por vazamento à demanda real em cada nó, e um novo valor global de consumo é obtido;
- 5- Volta-se ao passo 2. O processo termina quando os valores de vazamentos em cada nó atingem valores estáveis para uma certa tolerância.

Com a utilização de válvulas redutoras de pressão, um modelo de minimização de perdas por vazamento também é proposto, sendo o problema de otimização resolvido por uma programação quadrática seqüencial. Os autores evidenciam o menor tempo computacional atingido e os aspectos matemáticos da computação paralela.

Utilizando a mesma metodologia de HERNÁNDEZ et al. (1999), ALONSO et al. (2000) modificaram o expoente de perda da equação (2.28), adotando a seguinte formulação:

$$q_i = K_i \cdot P_i^{1,18} \quad (2.29)$$

AINOLA et al. (2000) desenvolveram uma metodologia para a calibração de modelos de redes de distribuição de água que consiste em dois passos: o primeiro diz respeito à quantificação e distribuição das perdas por vazamento, e o segundo à calibração propriamente dita. Quanto ao modelo de vazamentos empregado, os autores empregam a seguinte formulação para o cálculo do vazamento entre os nós i e j :

$$q_{ij} = \pi \cdot \alpha_{ij} \cdot L_{ij} \cdot (P_{ij}^{av})^\beta \quad (2.30)$$

onde π é um coeficiente de proporcionalidade de vazamentos para a rede ou setor da rede e α_{ij} é um coeficiente que é função do diâmetro, idade e material da tubulação.

Assim, o volume total de vazamentos para cada nó i será:

$$q_i = \pi \cdot q_i^* \quad (2.31)$$

onde

$$q_i^* = \sum_{j=1}^{M_i} (0,5)^\beta \cdot \alpha_{ij} \cdot L_{ij} \cdot P_i \cdot (P_i + P_j)^{\beta-1} \quad (2.32)$$

O coeficiente de proporcionalidade π pode ser determinado como:

$$\pi = \frac{q}{\sum_{i=1}^{J_d} q_i^*} \quad (2.33)$$

onde q é o volume total de vazamento e J_d é o número total de nós da rede.

Um procedimento iterativo é utilizado até que o volume de vazamentos seja conhecido.

Utilizando o modelo de vazamentos proposto por JOWITT & XU (1990) e um método de busca direta univariada, SANTOS (2000) fez um estudo das perdas por vazamentos em um setor da rede de abastecimento da cidade de São Carlos, SP, Brasil. Estudo também feito por CALIMAN (2002) e SILVA et al. (2002), nos quais os autores utilizam como método de busca os Algoritmos Genéticos. CALIMAN (2002) também realizou estudos de zoneamento em três setores da rede de distribuição de água de São Carlos, baseando-se na idade, diâmetro e tipo das tubulações, bem como nos níveis de pressão atuantes. O autor considera o resultado do levantamento dos parâmetros de vazamento como satisfatório, mas conclui que estes parâmetros devem ser estimados conjuntamente com os parâmetros da rede propriamente dita (rugosidades e diâmetros).

2.3 - Modelos de Demandas Dependentes da Pressão

Uma das importantes descobertas recentes é que o uso de modelos de simulação hidráulica dirigidos pelas demandas (MSHDD) mostram-se irrealistas na reprodução do comportamento de sistemas de distribuição de águas para abastecimento. Assim, o uso desses modelos pode ter implicações diretas sobre a confiabilidade de sistemas projetados ou operados com base nos prognósticos por eles realizados, à medida que consideram demandas abastecidas integralmente, independentemente dos níveis de pressão atuantes na rede. Da mesma forma que os vazamentos estão condicionados às relações de dependência da pressão, também devemos considerar que as demandas efetivas nos modelos de simulação de redes possuem esta dependência.

A literatura reporta o emprego de modelos de simulação hidráulica dirigidos pela pressão (MSHDP), assumindo diversas relações entre as demandas e as

respectivas pressões de serviço. Dentre eles destacam-se FUJIWARA & LI (1998), MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER (1999), TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), TABESH & KARIMZADEH (2000). Tais modelos consideram a máxima razão entre a demanda efetivamente atendida e a demanda potencial no nó i , dada por ρ_i .

WAGNER, SHAMIR & MARKS (1988) empregaram uma relação pressão x demanda no método de confiabilidade proposto, expressa como:

$$\begin{aligned} Q_{d,i} &= d_i & \text{se } H_i &\geq H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= d_i \left[\frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{des} - H_i^{\min}} \right]^{\frac{1}{2}} & \text{se } H_i^{\min} < H_i < H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= 0 & \text{se } H_i &\leq H_i^{\min} \end{aligned} \quad (2.34)$$

onde $Q_{d,i}$ é a vazão disponibilizada para consumo (demanda efetivamente atendida) e d_i é a pré-disposição ao consumo (demanda requerida) no nó i , H_i^{des} é a carga hidráulica mínima desejada para suprir integralmente a demanda, H_i é a carga hidráulica atuante e $H_i^{\min}$ é a carga hidráulica mínima (dependente da topografia e do padrão do consumidor) no nó i .

A formulação foi utilizada para casos de falhas no abastecimento em sistemas de distribuição de água e o método foi aplicado para duas redes hipotéticas reproduzindo bons resultados.

Outro autor que propõe a mesma formulação para a relação pressão x demanda foi CHANDAPILLAI (1991), em decorrência do baixo fornecimento de água na Índia, que além da pouca duração, não abastecia a demanda integralmente.

Com o objetivo de estudar as causas e conseqüentes efeitos de falhas em tubulações em redes de distribuição de água e ilustrar a possibilidade de modelagem desses impactos, JOWITT (1995) desenvolveu duas aproximações para o problema, nas quais um modelo de dependência das demandas com a pressão é incorporado. O modelo de demanda variável com a pressão assume a seguinte forma:

$$Q_{d,i} = d_i \left[1 - a_i \cdot \exp \left(-b_i \cdot \frac{H_i}{H_i^{des}} \right) \right] \quad (2.35)$$

onde a_i é um coeficiente que varia de 3 a 10 e b_i é igual a 5.

GUPTA & BHAVE (1996) apresentaram uma revisão e um estudo das diversas metodologias para o modelo pressão x demanda até então propostas. Os autores utilizaram um esquema real e concluíram que a metodologia proposta por WAGNER, SHAMIR & MARKS (1988) e CHANDAPILLAI (1991) foi a que apresentou melhores resultados.

Posteriormente, TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1998), TABESH & KARIMZADEH (2000) e TANYIMBOH, TABESH & BURROWS (2001) também utilizaram a mesma relação pressão x demanda para métodos de confiabilidade em sistemas de distribuição de água.

Porém, nos trabalhos de TABESH & KARIMZADEH (2000) e TANYIMBOH, TABESH & BURROWS (2001) o expoente da relação pressão x demanda assumiu uma variação. Assim, as equações são expressas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} Q_{d,i} &= d_i & \text{se } H_i &\geq H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= d_i \left[\frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{des} - H_i^{\min}} \right]^{\frac{1}{n}} & \text{se } H_i^{\min} < H_i < H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= 0 & \text{se } H_i &\leq H_i^{\min} \end{aligned} \quad (2.36)$$

onde $1,5 \leq n \leq 2$.

FUJIWARA & LI (1998) apresentaram um modelo de demandas também para a análise de confiabilidade em redes de distribuição de água, descrito a seguir:

$$\begin{aligned} Q_{d,i} &= d_i & \text{se } H_i &\geq H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= d_i \left[\frac{(H_i - H_i^{\min})^2 (3 \cdot H_i^{des} - 2 \cdot H_i - H_i^{\min})}{(H_i^{des} - H_i^{\min})^3} \right] & \text{se } H_i^{\min} < H_i < H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= 0 & \text{se } H_i &\leq H_i^{\min} \end{aligned} \quad (2.37)$$

Os únicos autores que utilizaram um modelo de demanda no processo de calibração de um modelo de rede de distribuição de água foram TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), propondo um modelo pressão x demanda senoidal. Assim, a relação pressão x demanda fica:

$$\begin{aligned} Q_{d,i} &= d_i & \text{se } H_i &\geq H_i^{des} \\ Q_{d,i} &= d_i \cdot \text{sen}^2 \left[\frac{H_i}{2 \cdot H_i^{des}} \cdot \pi \right] & \text{se } H_i^{\min} < H_i < H_i^{des} \end{aligned}$$

$$Q_{d,i} = 0 \quad \text{se} \quad H_i \leq H_i^{\min} \quad (2.38)$$

MARTÍNEZ et al. (1999) aplicaram os modelos pressão x demanda e pressão x vazamento internamente ao simulador hidráulico EPANET, intervindo no código computacional do *software*. Em outro trabalho, MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER (1999) propõem a mesma metodologia para a relação pressão x demanda, um pouco mais detalhada, como descrito a seguir para cada instante m da simulação:

$$Q_{d,i}(m) = K_i(m) [H_i(m) - H_i^{\min}]^\gamma \quad (2.39)$$

onde $K_i(m)$ é um coeficiente diferente para cada nó e intervalo de tempo m e γ é um expoente cujo valor é igual a 0,21 segundo estudos realizados pelos autores para a cidade de Valência, Espanha.

Em trabalho recente, OBRADOVIC (2000) expõe um estudo realizado para a rede de distribuição de água de uma cidade da Bósnia e Herzegovina, no qual é utilizada a relação pressão x demanda proposta por WAGNER, SHAMIR & MARKS (1988) e o simulador hidráulico WESNET (WILLIAMS, 1993). Levantamentos de perdas por vazamentos também são realizados.

Um quadro resumo das metodologias revisadas é mostrado na Tabela 2.1 e a variação do fator ρ_i para os trabalhos de FUJIWARA & LI (1998), TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) e TABESH & KARIMZADEH (2000) considerando o expoente n igual a 1,5 e 2, é apresentada na Figura 2.1.

Nota-se na Tabela 2.1 as diferentes considerações dos autores quanto às constantes presentes nas formulações e ao tratamento dos valores das pressões mínimas ($H^{\min}$) e desejáveis (H^{des}) para o abastecimento. Tais parâmetros podem ser diferentes para cada sistema em estudo, necessitando, portanto, de uma avaliação mais detalhada.

A variação do fator ρ_i mostrada na Figura 2.1 para as metodologias que são avaliadas no presente trabalho reflete as diferentes considerações dos autores para a dependência das demandas com a pressão.

TABELA 2.1 - Quadro resumo dos modelos pressão x demanda.

Modelo	$H_i \leq H_i^{\min}$	$H_i^{\min} < H_i < H_i^{des}$	$H_i \geq H_i^{des}$	Obs.
JOWITT (1995)	0	$1 - a_i \cdot \exp\left(-b_i \cdot \frac{H_i}{H_i^{des}}\right)$	1	$a_i = 3 \text{ a } 10$, $b_i = 5$ e $H_i^{des} = 20 \text{ a } 35 \text{ m}$
FUJIWARA & LI (1998)	0	$\frac{(H_i - H_i^{\min})^2 \cdot (3 \cdot H_i^{des} - 2 \cdot H_i - H_i^{\min})}{(H_i^{des} - H_i^{\min})^3}$	1	$H_i^{\min} \approx 5 \text{ m}$
TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999)	0	$\text{sen}^2\left(\pi \frac{H_i}{2H_i^{des}}\right)$	1	$H_j^{\min} = 0$
TABESH & KARIMZADEH (2000)	0	$\left(\frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{des} - H_i^{\min}}\right)^{\frac{1}{n}}$	1	$1,5 \leq n \leq 2$ $H_i^{\min} = 5 \text{ a } 6 \text{ m}$
MARTÍNEZ, CONEJOS & VERCHER (1999)	0	$K_i(H_i - H_i^{\min})^\gamma$		$\gamma=0,5$ (descarga p/ atmosfera) $\gamma=0,21$ (Valência, Espanha)

FIGURA 2.1 - Variação do fator ρ_i para os modelos pressão x demanda.

III – Modelos de Otimização

Dentre os métodos convencionais de busca direta frequentemente utilizados para resolver problemas não-lineares irrestritos como os de calibração, pode-se mencionar os métodos como Gradiente, Newton-Raphson e outros (FOX, 1971). Entretanto, ferramentas mais gerais, como os Algoritmos Genéticos (AGs), têm sido apontadas como promissoras na resolução desse tipo de problema.

3.1 - Algoritmos Genéticos (AGs)

Os AGs foram inventados por Holland nos anos 60 e desenvolvidos por ele, seus alunos e colegas, na “Universidade de Michigan”, nos anos 60 e 70. Em contraste com outras técnicas evolutivas, a grande idéia de Holland foi não desenvolver algoritmos para solucionar problemas específicos, mas sim estudar o fenômeno da adaptação como ele ocorre na natureza e desenvolver caminhos através dos quais os mecanismos da adaptação natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais (GOLDBERG, 1989).

De acordo com a terminologia dos AGs, cada “cromossomo”, referido como *string*, representa uma possível solução para o problema, sendo que uma população de “cromossomos” representa um conjunto de possíveis soluções. O primeiro passo de um AG é a geração de uma população inicial de soluções. Durante o processo de otimização, a população é avaliada e cada solução recebe um valor, denominado de aptidão (*fitness*). Os AGs geralmente compreendem três operadores inspirados na genética: seleção, recombinação (*crossover*) e mutação, os quais são aplicados repetidamente em busca de soluções eficientes para o problema em questão. A seleção é o mecanismo através do qual os “cromossomos” são copiados para a próxima geração, resultando na sobrevivência das soluções mais aptas, ou seja, que resultem em valores mais eficientes na função objetivo. A recombinação promove a troca parcial de segmentos correspondentes entre dois “cromossomos” pais, gerando dois “cromossomos” filhos. E a mutação é uma degeneração casual dos valores, permitindo a introdução de novas características genéticas às populações. Nos AGs, a

mutação é considerada mais um método para recuperar material genético perdido do que de procura de uma solução melhor.

Os AGs possuem muitos termos originados da biologia, portanto, a lista apresentada a seguir descreve os principais termos encontrados na literatura (GOLDBERG, 1989; MICHALEWICZ, 1994; LACERDA & CARVALHO, 1999).

Cromossomo e Genoma: 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: é um parâmetro codificado no cromossomo, ou seja, um elemento do vetor que representa o cromossomo.

Alelo: representa os valores que um gene pode assumir.

Indivíduo: é um simples membro da população, formado pelo cromossomo e sua aptidão.

Genótipo: representa a informação contida no cromossomo ou genoma (composição genética contida no genoma).

Fenótipo: representa o objeto, estrutura ou organismo construído a partir das informações do genótipo. É o cromossomo decodificado.

Epistasia: interação entre genes do cromossomo, isto é, quando um valor de um gene influencia o valor de outro gene.

Elitismo: proposto por DeJong em 1975, esta estratégia é muito comum nos AGs tradicionais e se baseia na transferência do melhor cromossomo de uma geração para outra sem alterações, já que o melhor cromossomo pode ser perdido devido à aplicação dos operadores recombinação e mutação. O AG com elitismo encontra a solução mais rapidamente que o AG sem elitismo, ressaltando que o AG ocasionalmente encontra máximos locais.

Dentre as vantagens dos AGs sobre os métodos de busca direta convencionais pode-se citar o fato de que eles trabalham com o código dos parâmetros e não com os parâmetros propriamente ditos; buscam, a partir de uma população de pontos e não de um único ponto; usam informações da função objetivo apenas, não necessitando de derivadas ou de outras informações; não é necessário conhecimento matemático complexo, sendo de fácil implementação; são capazes de otimizar um número grande de variáveis, trabalhando com funções objetivo com superfícies complexas,

reduzindo a incidência de mínimos ou máximos locais; adaptam-se bem a técnicas de computação paralela; fornecem uma gama de parâmetros ótimos e não uma simples solução; usam regras de transição probabilísticas e não determinísticas; são também facilmente hibridizados com outras técnicas. Sobretudo, os AGs apresentam a propriedade de "varrer" o espaço de soluções de maneira eficaz quando o número de variáveis de decisão do problema é grande.

Apesar dessas vantagens, os AGs são lentos, pois são eficazes na avaliação do espaço de soluções, mas oscilam em torno da solução ótima.

SIMPSON, DANDY & MURPHY (1994) compararam o uso de Algoritmos Genéticos para otimização de sistemas de distribuição de água com outras duas técnicas de otimização: enumeração completa e programação não-linear. Embora programação não-linear seja a técnica que utilizou menos tempo computacional, os autores concluíram que os AGs foram muito eficientes na busca das soluções ótimas e que a maior vantagem do método é a gama de possíveis soluções apresentadas para o problema.

3.1.1 - Tipos de AGs

Existem dois tipos básicos de AGs: geracional, com ou sem elitismo, e *Steady-State*. No AG geracional sem elitismo, toda a população é substituída em cada geração, ou seja, são criados n filhos para substituir n pais. Caso o elitismo seja utilizado, os p melhores pais nunca são substituídos por filhos piores. Recomenda-se um valor baixo para p , caso contrário, aumenta-se o risco da convergência prematura.

No AG *Steady-State*, são criados n filhos para substituírem os n piores pais da população em cada geração. Em geral, a probabilidade de recombinação é maior ($\approx 1,0$) no AG *Steady-State* do que no AG geracional.

Há outros tipos de AGs na literatura, mas o presente trabalho investiga apenas os citados acima.

3.1.2 - Representação das Soluções

A representação binária das soluções é a sistemática mais usual dos AGs, sendo fácil de utilizar, manipular e simples de analisar teoricamente, além de ser historicamente importante, sendo utilizado nos trabalhos pioneiros. No entanto, se quisermos uma precisão numérica maior, cromossomos mais longos deverão ser armazenados na memória do computador. Havendo muitos parâmetros no processo de otimização, longas cadeias de *bits* podem fazer o algoritmo convergir vagarosamente.

Contudo, a representação real (com ponto flutuante), além de gerar cromossomos menores, possui uma maior facilidade na criação de novos operadores. MICHALEWICZ (1994) discute o uso das representações binária e real, com experimentos favoráveis à representação real.

Portanto, este trabalho utiliza representação real (ponto flutuante) para codificação da cadeia de soluções, com o emprego da biblioteca *GAlib C++* (WALL, 1996), de distribuição livre, para desenvolvimento dos AGs.

3.1.3-Operadores Genéticos

Diferentes tipos de operadores (seleção, recombinação e mutação) para representação real disponíveis na biblioteca *GAlib C++* são apresentados a seguir.

Recombinação: os tipos de operadores de recombinação mais conhecidos são o de n pontos e o uniforme (Operadores Convencionais). Na recombinação de n pontos, os tipos disponíveis na biblioteca são o de um ponto e o de dois pontos, os mais comuns. Nestes operadores, cada um dos cromossomos pais tem sua cadeia “cortada” em uma (recombinação de um ponto, ilustrada na Figura 3.1) ou duas posições (recombinação de dois pontos, ilustrada na Figura 3.2) aleatórias. As partes são recombinadas, gerando dois novos cromossomos (filhos). A recombinação é aplicada com uma dada probabilidade, que na prática varia de 70% a 100%, a cada par de cromossomos selecionados.

	Ponto de Recombinação				
Pai ₁	2,345	0,359	5,010	7,993	3,597
Pai ₂	1,184	4,421	6,253	0,011	8,571
Filho ₁	2,345	0,359	6,253	0,011	8,571
Filho ₂	1,184	4,421	5,010	7,993	3,597

FIGURA 3.1 - Recombinação de um ponto – simples troca.

	Ponto de Recombinação		Ponto de Recombinação		
Pai ₁	2,345	0,359	5,010	7,993	3,597
Pai ₂	1,184	4,421	6,253	0,011	8,571
Filho ₁	2,345	0,359	6,253	0,011	3,597
Filho ₂	1,184	4,421	5,010	7,993	8,571

FIGURA 3.2 - Recombinação de dois pontos – simples troca.

No entanto, os operadores convencionais funcionam bem na representação binária, mas na representação real eles apenas trocam valores e não geram novas informações. A melhor solução para a codificação real é o uso de Operadores Aritméticos, onde os tipos de recombinação disponíveis são a recombinação aritmética e a recombinação *BLX- α* ou recombinação mistura (*Blend crossover*).

A recombinação aritmética realiza uma combinação linear entre os cromossomos pais, produzindo dois cromossomos filhos da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Filho}_1 &= b * \text{Pai}_1 + (1 - b) * \text{Pai}_2 \\ \text{Filho}_2 &= (1 - b) * \text{Pai}_1 + b * \text{Pai}_2 \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde o valor de b varia de 0 a 1.

A recombinação *BLX- α* ou mistura produz um novo cromossomo a partir de dois cromossomos através da seguinte combinação:

$$\text{Filho} = \text{Pai}_1 + b * (\text{Pai}_2 - \text{Pai}_1) \quad (3.2)$$

onde b pertence ao intervalo $(-\alpha, 1+\alpha)$, podendo-se variar o valor de b para cada par de genes.

Mutação: através do operador seleção, o valor de um gene é substituído por outro valor aleatório da faixa admissível para cada variável de uma distribuição normal, ou seja, dado um cromossomo pai p com o j -ésimo gene selecionado para mutação, é produzido um cromossomo filho s da seguinte forma:

$$\begin{aligned} s_i &= N(p_i, \sigma) & \text{se } i=j \\ s_i &= p_i & \text{caso contrário} \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde $N(p_i, \sigma)$ é uma distribuição normal com média p_i e desvio padrão σ (neste trabalho igual a 1). Alternativamente, o valor do desvio padrão pode ser diminuído à medida que o número de gerações aumenta.

Seleção: inspirado no processo de seleção natural dos seres vivos, o AG seleciona os melhores cromossomos da população para gerar cromossomos filhos através dos operadores recombinação e mutação. Geralmente, os pais são selecionados com probabilidade proporcional à sua aptidão. Os tipos de seleção mais usuais são Roda da Roleta, Ordenamento, Torneio, Uniforme, Amostragem Determinística e *Stochastic Remainder Sampling* (SRS).

De acordo com o algoritmo Roda da Roleta, são calculadas as probabilidades de seleção para cada cromossomo de acordo com a razão de sua aptidão e da aptidão da população acumulada. Em seguida, um número aleatório é gerado no intervalo de zero até o valor da aptidão acumulada e, então, a solução selecionada sofre a ação dos operadores recombinação e mutação. A desvantagem deste método é que aptidões negativas não são toleradas e problemas de convergência prematura podem acontecer.

Outra forma de seleção é Ordenamento dos cromossomos na população, definindo uma aptidão arbitrária máxima para o primeiro cromossomo da população e uma aptidão mínima, também arbitrária (geralmente zero), para o último cromossomo. As demais aptidões são calculadas interpolando os dois extremos por uma reta.

Na seleção por Torneio, são escolhidos, aleatoriamente e com probabilidades iguais, n cromossomos da população (geralmente, adota-se $n = 2$) e comparados os respectivos valores de aptidão entre si diretamente, sendo o melhor cromossomo selecionado. A seleção por Torneio não necessita de escalonamento da aptidão e nem de ordenamento.

Com a mesma probabilidade de seleção para todos os cromossomos da população, a seleção Uniforme “escolhe” aleatoriamente os cromossomos a serem recombinados e mutados. A seleção Uniforme não leva em consideração a aptidão do cromossomo.

Na seleção por Amostragem Determinística, as probabilidades de seleção são calculadas como na Roda da Roleta. Em seguida, cada probabilidade é multiplicada pelo número de cromossomos da população e, então, cada cromossomo é selecionado de acordo com a parte inteira do valor calculado e a população ordenada de acordo com a parte decimal deste mesmo valor. O restante da população é selecionada do topo da lista ordenada. A seguir, selecionam-se uniformemente os cromossomos que sofrerão a ação dos operadores genéticos.

Na *Stochastic Remainder Sampling* (SRS), o processo começa como na Amostragem Determinística e difere no tratamento das partes fracionárias, que são consideradas probabilidades. Por exemplo, um cromossomo com aptidão 1,5 terá uma cópia idêntica na população intermediária e uma probabilidade de 50% de ter outra cópia. Em seguida, selecionam-se uniformemente os cromossomos.

Escalonamento: Uma vantagem dos tipos de AGs da biblioteca *GAlib C++* é a possibilidade do emprego de escalonamento (*scaling*) na função objetivo, pois o valor desta nem sempre é adequado para ser utilizado como valor de aptidão. Por exemplo, a função objetivo pode assumir valores negativos, onde um tipo de seleção (roda da roleta) não funciona, valores muito próximos tornam a seleção aleatória, ou alguns valores podem ser muito elevados em relação ao restante da população, causando a convergência prematura. Este mecanismo de mapeamento da função objetivo é dividido em três tipos (MICHALEWICZ, 1994):

Escalonamento Linear: neste método a função aptidão para cada cromossomo i é obtida da seguinte equação:

$$f'_i = a \cdot f_i + b \quad (3.4)$$

onde a e b são coeficientes determinados para limitar o número de filhos dos cromossomos, pois filhos em excesso causam perda de diversidade nos descendentes, e f_i é o valor da função objetivo para o cromossomo i . O escalonamento linear transforma os valores das aptidões de tal modo que a aptidão média torna-se igual ao valor médio da função objetivo, e a aptidão máxima igual a c vezes (tipicamente $1,2 \leq c \leq 2,0$) a aptidão média. O problema deste método é quando este gera valores negativos para as aptidões, tendo-se que limitar o valor mínimo da função aptidão.

Escalonamento com Truncamento Sigma: este método foi criado para sanar as deficiências do escalonamento linear, como os valores negativos da função aptidão e o excesso de descendentes com pouca diversidade. O valor da função aptidão é calculado de acordo com a equação:

$$f'_i = f_i + \left(\bar{f} - c \cdot \sigma \right) \quad (3.5)$$

onde c é um valor inteiro escolhido no intervalo de 1 a 5, $\bar{f}$ é o valor médio da função objetivo e σ é o desvio padrão da população. Neste método, possíveis valores negativos da função aptidão são adotados como zero.

Escalonamento Exponencial (Power Law Scaling): neste método o valor inicial da função aptidão é elevado a uma potência, como na equação:

$$f'_i = f_i^{\exp} \quad (3.6)$$

onde o valor de $\exp$ é tomado próximo de 1. Gillies em 1985 sugeriu o valor de 1,005 para o expoente, mas o valor deste pode ser modificado durante a otimização.

3.1.4-Recentes Aplicações de AGs em Modelos de Sistemas de Distribuição de Água

Recentes trabalhos na literatura empregaram AGs em modelos de redes de distribuição de água, dentre eles WALTERS & LOHBECK (1993), que aplicaram os AGs para o traçado ótimo de redes de distribuição de água, comparando dois tipos de representação (binária e real inteiro) das variáveis de decisão com programação dinâmica. Os autores concluíram que para redes de distribuição de água de pequena

dimensão os AGs atingiram os mesmos resultados que a programação dinâmica, mas com menos esforço computacional. Já para redes de grandes dimensões, os AGs apresentaram resultados melhores. Quanto à representação, a real inteira apresentou melhores resultados à medida que aumentava o grau de conectividade (maior número de trechos interligados) da rede.

SIMPSON, DANDY & MURPHY (1994) empregaram os AGs para otimização de sistemas de distribuição de água e, além disso, comparação com outras duas técnicas de otimização (enumeração completa e programação não-linear). Os autores defenderam o uso dos AGs que, embora tenham consumido um esforço computacional maior que a programação não-linear, obtiveram melhores resultados nas simulações realizadas. Estabeleceram, também, alguns parâmetros para escolha do tamanho da população (entre 30 e 200), probabilidades de recombinação (de 0,7 a 1,0) e de mutação (0,01 a 0,05). Neste último caso, a probabilidade de mutação pode ser tomada como maior que o inverso do número de cromossomos da população e menor que o inverso do comprimento dos cromossomos.

DANDY, SIMPSON & MURPHY (1996) também empregaram os AGs para otimização de redes, porém, utilizando codificação (*Gray*) e mutação (*creep*) diferentes, além do emprego de escalonamento exponencial. Os resultados foram comparados com o AG geracional descrito por Goldberg em 1989, e com diferentes técnicas de otimização: programações linear, não-linear e dinâmica, e enumeração completa. Os testes realizados apresentaram resultados favoráveis ao novo tipo de AG.

Para a calibração de modelos de redes de distribuição de água, SAVIC & WALTERS (1997a) utilizaram como método de busca os AGs e compararam-nos com métodos de tentativa e erro. Neste trabalho, os autores citam diferentes aplicações dos AGs e suas vantagens quando utilizados em calibração, principalmente na não limitação de tipos de parâmetros a serem otimizados, ou seja, calibração não só de coeficientes de rugosidade e demandas, mas, também, cotas topográficas, diâmetros e outros.

Em outro trabalho, SAVIC & WALTERS (1997b) utilizaram os AGs na forma de um pacote computacional (*GAnet*) para auxílio em projetos e expansão de redes de distribuição de água. Os autores utilizaram um tipo de codificação (*Gray*) que

melhora o desempenho do AG, se comparado com a representação binária. O pacote computacional é melhor apresentado no trabalho de MORLEY et al. (2001).

Visando a redução de perdas por vazamentos em redes de distribuição de água através da localização e abertura ótimas de válvulas redutoras de pressão, REIS, PORTO & CHAUDHRY (1997) utilizaram os AGs como método de busca. Os autores evidenciaram as diferentes soluções apresentadas pelos AGs para um pequeno número de válvulas, sendo, portanto, soluções mais econômicas.

HALHAL et al. (1997) propuseram um novo tipo de Algoritmo Genético, o AG *Structured Messy*, para reabilitação, manutenção e expansão de redes de distribuição de água. Este tipo de AG difere dos AGs padrões por utilizar comprimentos variáveis dos cromossomos em cada geração, codificação com números inteiros e seleção com escalonamento que consiste na comparação da “distância” de um indivíduo com outros dois indivíduos através de uma função. Se esta “distância” é igual a zero, os indivíduos são idênticos e, portanto, não há diversidade na população. Utilizando-se de uma otimização multi-objetivo, os autores compararam o novo tipo de AG com o AG geracional, concluindo que o AG *Structured Messy* produzira melhores resultados.

Com o intuito de otimizar a rede de amostragem de dados empregados para a calibração de modelos de redes de distribuição de água, De SCHAETZEN et al. (1999) e De SCHAETZEN, WALTERS & SAVIC (2000) empregaram os AGs como método de busca dos pontos de coleta de dados, bem como o número de pontos de amostragem. Os autores concluem que os melhores pontos de observação são os nós nas extremidades da rede, onde a variação da pressão é maior, e que os pontos de observação devem ser distribuídos ao longo da rede.

MEIER & BARKDOLL (2000) empregaram o AG geracional elitista para a otimização da estratégia de coleta de dados na calibração de um modelo de rede de distribuição de água. Os pontos de testes de incêndio foram determinados pelo AG, a fim de encontrar o número e localização ótimos dos testes, fazendo com que testes excessivos sejam evitados e que um modelo menos preciso não seja utilizado. O simulador hidráulico EPANET foi utilizado como módulo auxiliar no algoritmo.

VAIRAVAMOORTHY & ALI (2000) propõem uma metodologia para otimização do custo total de uma rede de distribuição de água, cujas restrições são os

níveis de pressão nos nós. Os autores utilizam os AGs com codificação real para as soluções, a qual resultou em um esforço computacional menor nas simulações.

DANDY & ENGELHARDT (2001) também utilizaram os AGs para a otimização multi-objetivo da estratégia de reabilitação de redes de distribuição de água. Os autores aplicaram o método para a rede de Adelaide, Austrália, onde evidenciaram a habilidade do AG em identificar as tubulações que necessitavam de manutenção.

Os trabalhos até agora citados neste item utilizam-se de análises no regime permanente e não no regime transiente, como são os casos dos trabalhos de TANG et al. (1999), VÍTKOVSKÝ, SIMPSON & LAMBERT (2000) e SIMPSON, VÍTKOVSKÝ & LAMBERT (2000).

TANG et al. (1999) e SIMPSON, VÍTKOVSKÝ & LAMBERT (2000) desenvolveram trabalhos para calibração dos fatores de atrito de redes de distribuição de água com o auxílio de AGs. Já VÍTKOVSKÝ, SIMPSON & LAMBERT (2000), além da calibração dos fatores de atrito, apresentaram uma metodologia para incorporar a detecção e quantificação de vazamentos no processo de calibração. Foram incorporados novos tipos de operadores nos AGs (recombinação e mutação), melhorando o desempenho do método de busca.

Uma revisão das aplicações dos AGs não apenas em modelos de redes de distribuição de água, mas também em outras áreas da Hidráulica e Hidrologia, é feita por SAVIC & WALTERS (1996).

3.2-Modelo Híbrido

Apesar das inúmeras vantagens, os AGs são lentos, pois são eficazes na avaliação do espaço de soluções, mas oscilam em torno da solução ótima. Assim, a fim de melhorar o tempo computacional e a eficiência do modelo de otimização, um modelo híbrido será utilizado.

Como os AGs não trabalham com as derivadas das funções, o método de busca direta a ser utilizado também não deve considerar derivadas no processo de otimização. Exemplos são os métodos de Rosenbrock, Hooke & Jeeves, Direções Conjugadas e Simplex (não confundir com o método Simplex utilizado em

problemas de programação linear). O método Simplex foi proposto por NELDER e MEAD (1965), e é o método mais eficiente, dentre os citados, para otimização onde os problemas apresentam funções complexas ou com descontinuidades (DIXON, 1972).

QUARTERONI, SACCO & SALERI (2000) comentam a dificuldade de convergência do método Simplex devido à solução inicial, o ponto de partida do processo de otimização. Mas, em um estudo de caso, os autores compararam os métodos Simplex e Hooke & Jeeves, tendo o último consumido 5,7 vezes mais iterações que o método Simplex.

A idéia do modelo híbrido é utilizar os AGs como ponto de partida e por um número determinado de gerações para que o espaço de busca seja “varrido” e, então, utilizar o método Simplex para a parte final do processo, poupando tempo computacional. No entanto, o processo iterativo proposto apresenta restrições quanto aos valores máximo e mínimo das variáveis de decisão. Assim, o método Simplex deverá conter restrições no processo de otimização, fato este explorado no trabalho de SUBRAHMANYAM (1989), que apresenta algumas modificações no método.

O método Simplex é baseado na comparação dos valores da função objetivo de $n+1$ vértices de uma *Simplex geral* (região no espaço onde os vértices não são eqüidistantes – Figura 3.3) e “mover” estes pontos para o ponto ótimo. Este processo é alcançado pela aplicação dos operadores: reflexão, contração e expansão.

FIGURA 3.3 - Vértices em uma *Simplex geral*.

A seguinte notação é utilizada para os vértices:

x^H é o vértice correspondente ao maior valor da função objetivo:

$$M(x^H) = \max_i (x^i), \quad i = 1, \dots, (n+1) \quad (3.7)$$

x^S é o vértice com o segundo maior valor de M .

x^L é o vértice com o menor valor de M .

x^0 é o centróide de todos os pontos, exceto x^H , dado por:

$$x^0 = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq H}}^{n+1} x^i \quad (3.8)$$

Os três operadores do método (reflexão, contração e expansão) são aplicados da seguinte maneira:

Reflexão: x^H é substituído por:

$$x^R = (1 + \mu).x^0 - \mu.x^H, \quad \mu > 0 \quad (3.9)$$

Expansão: x^R é expandido na direção cuja melhora é esperada dada por:

$$x^E = \omega.x^R + (1 - \omega).x^0, \quad \omega > 1 \quad (3.10)$$

Contração: dado por:

$$x^C = \psi.x^H + (1 - \psi).x^0, \quad 0 < \psi < 1 \quad (3.11)$$

SUBRAHMANYAM (1989) sugere valores para os coeficientes: $\mu = 0,95$, $\omega = 2$ e $\psi = 0,5$.

Dada uma estimativa inicial do valor mínimo $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, uma região é formada usando um vetor auxiliar δ e um vetor $\mathbf{e}$ unitário na direção $\mathbf{x}$:

Assim, os $n+1$ vértices da região são dados por:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^1 &= (1 - \delta_1).\mathbf{x} \\ \mathbf{x}^i &= \mathbf{x} + \mathbf{e}_{i-1}.\delta_{i-1}.x_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n+1 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Caso algum vértice esteja fora da região factível, o vetor δ é modificado, aumentando seu valor se o limite inferior da variável seja violado, ou diminuindo se limite superior da variável é ultrapassado.

O procedimento do método segue os seguintes passos, descritos no fluxograma da Figura 3.4.

Para critério de convergência, pode-se comparar o desvio padrão da função nos $n+1$ vértices com uma tolerância. Assim:

$$\left\{ \sum_{i=1}^{n+1} \frac{[M(x^i) - M(x^0)]^2}{n} \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \text{tolerância} \quad (3.13)$$

FIGURA 3.4 - Fluxograma do Método Simplex – SUBRAHMANYAM (1989).

Em redes de distribuição de água, o método Simplex foi aplicado por LUVIZOTTO et al. (2000) para a detecção de vazamentos. Os autores compararam o método Simplex com outros três métodos de busca: Gradiente, Levenberg-Marquardt e Algoritmos Genéticos. Todos os métodos conseguiram detectar os vazamentos impostos para alguns nós de uma rede hipotética. Notou-se uma convergência mais rápida nos métodos diferenciais (Gradiente e Levenberg-Marquardt), embora o método Gradiente tenha utilizado um número elevado de soluções do problema hidráulico, em decorrência do passo de busca aleatório. Dentre os métodos diretos, o método Simplex mostrou-se mais eficiente para a solução do problema proposto que os algoritmos genéticos. De maneira geral, o método Simplex foi o que obteve melhores resultados quanto à solução final.

KAPELAN, SAVIC & WALTERS (2000) propuseram um método híbrido para a calibração e detecção de vazamentos em modelos de redes de distribuição de água operando no regime transiente. O método de otimização alia a capacidade dos AGs (global) de “varrer” o espaço de busca de maneira eficiente, mas que oscila em torno da solução ótima, com um método de busca local (Levenberg-Marquardt), que apresenta dependência da convergência em relação à solução inicial adotada (pode convergir para um ótimo local), mas não oscila em torno da solução ótima, quando a solução inicial está nas proximidades do ótimo global. Neste trabalho, os autores empregam uma busca em dois passos, primeiro utilizando os AGs durante um certo número de iterações e, depois, empregando o método Levenberg-Marquardt para as demais, tendo como solução inicial a melhor solução apresentada pelos AGs. A metodologia empregada resultou em menor tempo computacional nas simulações quando comparado ao uso dos AGs somente, e melhorou a solução final das variáveis de decisão. Uma dificuldade desta metodologia é a adoção do número de iterações nos AGs. Visando sanar este problema, KAPELAN, SAVIC & WALTERS (2002) utilizaram uma outra forma do modelo híbrido para o mesmo problema de calibração. Neste tipo de hibridização, a cada número de gerações pré-estabelecido (no caso, duas), um ou dois cromossomos são selecionados e empregados como solução inicial no método Levenberg-Marquardt, aplicado em apenas uma ou duas iterações. As soluções resultantes da aplicação deste último método retornam à população anterior e, novamente os AGs são aplicados em mais duas gerações e o

método de busca local em mais duas iterações, até que um critério de convergência seja alcançado.

Neste trabalho, a metodologia empregada por KAPELAN, SAVIC & WALTERS (2000) foi utilizada, em que consiste de um método híbrido de dois passos. A vantagem do método de otimização proposto neste trabalho é que o método Levenberg-Marquardt é substituído pelo método Simplex, que não utiliza derivadas, um fator considerável, pois a função objetivo empregada é muito complexa.

IV – Materiais e Métodos

4.1 - Materiais

O presente trabalho utilizou o laboratório de simulação computacional, devidamente instrumentado com computadores, impressoras, *softwares* como compilador de linguagem de programação *C++ Builder 5*, simulador hidráulico EPANET 2 (ROSSMAN, 2000) desenvolvido pela “U.S. Environmental Protection Agency”-EPA e de domínio público, biblioteca *Galib C++* (WALL, 1996) do Departamento de Engenharia Mecânica do “Massachusetts Institute of Technology”-MIT, de distribuição livre, além de planilhas eletrônicas. As simulações foram feitas em um microcomputador AMD Athlon 1,8 GHz, com 512 Mb de memória RAM.

4.2 - Modelo Inverso

O modelo inverso implementado minimiza os desvios entre os parâmetros (pressão e vazão) observados e aqueles obtidos pela rotina computacional produzida, que utiliza o simulador hidráulico EPANET como módulo de avaliação auxiliar. Convém salientar que, neste trabalho, os parâmetros observados (pressão e vazão) não são valores reais e sim valores extraídos via simulação hidráulica, dada à utilização de rede hipotética.

A resolução do problema de calibração de modelos de redes de distribuição de água prevê as seguintes etapas: preparação dos dados de entrada do modelo, definição dos parâmetros dos modelos de otimização a serem determinados e dos parâmetros de avaliação hidráulica da rede, e aplicação do modelo de otimização.

Os dados de entrada do modelo são compostos pelos dados de observações de pressões em alguns nós e de vazões em certos trechos da rede, usualmente na saída dos reservatórios, dos níveis dos reservatórios, e da vazão abastecida total na rede,

para os diversos padrões (cenários) de demanda observados. Neste trabalho, o número de padrões de demanda será três, correspondentes às condições de vazão abastecida máxima (horas do dia em que o consumo é maior, portanto com menores níveis de vazamentos e maiores restrições na vazão abastecida devido às menores pressões na rede), média e mínima (horas do dia em que o consumo é menor ou quase nulo, com maiores índices de vazamentos e menor ou nenhuma restrição na vazão abastecida devido aos maiores níveis de pressão). Também fazem parte dos dados de entrada do modelo, os dados da rede propriamente dita, como comprimento, diâmetro e rugosidade absoluta das tubulações, cota topográfica e demanda média nos nós, os setores de rugosidades, coeficientes (θ) e expoentes do modelo de vazamento (β).

Podem ser variáveis de decisão no modelo, as rugosidades absolutas (ε) e diâmetros (D) das tubulações ou setores de tubulações, as demandas (d) e cotas topográficas (z) dos nós ou setores de nós, os parâmetros do modelo pressão x vazamento, coeficiente (θ) e expoente (β) para tubulações ou setores de tubulações, e as tubulações que possam ter registros com o respectivo valor de perda localizada. Para a representação das variáveis de decisão, um alfabeto deve ser escolhido. Optou-se pela representação real (números inteiros ou ponto flutuante), com limites máximo e mínimo definidos na entrada do modelo.

Neste trabalho, duas funções objetivo são utilizadas para fins de comparação.

A primeira se baseia no quadrado da diferença de valores computados e simulados de pressões e vazões ponderado pelo quadrado do somatório dos valores observados:

$$\min_Z FO_1 = \sum_{t=1}^{n^{PD}} \left\{ \sum_{j=1}^{n_t^P} w_j^P \frac{(P_{t,j} - P_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^P} P_{t,i}^* / n_t^P \right)^2} + \sum_{j=1}^{n_t^Q} w_j^Q \frac{(Q_{t,j} - Q_{t,j}^*)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n_t^Q} Q_{t,i}^* / n_t^Q \right)^2} \right\} \quad (4.1)$$

onde n^{PD} é o número de padrões de demanda observados, n^P é o número de padrões de demanda em que há observações de pressões, n^Q é o número de padrões de demanda em que há observações de vazões, w^P e w^Q são pesos atribuídos às observações de pressões e vazões, respectivamente, P são as pressões simuladas, P^*

as pressões observadas, Q as vazões simuladas, Q^* as vazões observadas e Z o conjunto de variáveis de decisão do problema, dado por:

$$Z = Z_1 = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_{n_\varepsilon}, D_1, \dots, D_{n_D}, d_1, \dots, d_{n_d}, z_1, \dots, z_{n_z}, \theta_1, \dots, \theta_{n_\theta}, \beta_1, \dots, \beta_{n_\beta}) \quad (4.2)$$

onde n_ε e n_D são o número de tubulações ou setores de tubulações com rugosidades absolutas e diâmetros homogêneos, respectivamente, n_d e n_z o número de nós ou setores com demandas e cotas topográficas homogêneos, respectivamente, e n_θ e n_β o número de tubulações ou setores com coeficiente e expoente de vazamento homogêneos.

Para o caso de determinação de registros em tubulações da rede, o conjunto de variáveis de decisão toma a seguinte forma:

$$Z = (Z_1, ID_1, \Delta H_1, ID_2, \Delta H_2, \dots, ID_{n_T}, \Delta H_{n_T}) \quad (4.3)$$

onde ID é a identificação da tubulação que contém registro, número inteiro arbitrado pelo autor da modelação, ΔH é a respectiva perda de carga localizada devido à presença de registro, estimada pelo comprimento equivalente ou acréscimo da rugosidade absoluta, e n_T é o número de registros que se estima estarem presentes na rede.

A outra função objetivo baseia-se no quadrado da diferença de valores computados e simulados de pressões e vazões para os diversos padrões de demanda observados.

$$\min_Z FO_2 = \sum_{t=1}^{n^{PD}} \left\{ \sum_{j=1}^{n_t^P} [(P_{t,j} - P_{t,j}^*)^2] + \sum_{j=1}^{n_t^Q} [(Q_{t,j} - Q_{t,j}^*)^2] \right\} \quad (4.4)$$

4.2.1-Escolha dos Pesos

Recentes trabalhos na literatura têm discutido as formas e origens de erros no processo de calibração (LANSEY et al., 2001; MALLICK et al., 2002) e muitos desses erros são originados da coleta de dados de campo para a alimentação do modelo, quando se tem erros nos medidores ou os pontos escolhidos não refletem uma representação considerável da condição operacional do sistema. Uma forma de incluir as imprecisões causadas no modelo por esses tipos de erro é a aplicação de pesos na função objetivo. Alguns trabalhos apresentam metodologia clara que resulta

na melhora dos resultados da calibração (DATTA & SRIDHARAN, 1994; REDDY, SRIDHARAN & RAO, 1996), a maioria deles fazendo análises estatísticas (variância) dos dados extraídos de observações de campo.

REDDY, SRIDHARAN & RAO (1996) apresentaram uma metodologia para a adoção de pesos na função objetivo, onde a influência dos diferentes tipos de pesos (para pressão e vazão) é investigada. Os autores comentam que os erros das medidas de vazão são mais representativos do que os erros das medidas de pressão. Para o caso de medidas de pressão, adota-se um erro padrão, chamado de erro do tipo fixo, baseado na média dos valores observados. Já para medidas de vazão, o erro se baseia não só na variância dos valores observados, mas também na magnitude do valor e, assim, não é adotada a média dos valores medidos, mas a porcentagem de cada valor.

No entanto, a dificuldade desta metodologia diz respeito à sua aplicação para algoritmos populacionais como os AGs. No presente trabalho, a adoção de pesos é feita na base da tentativa, ou seja, adotam-se pesos fixos para cada conjunto de medidas de tipos diferentes. No caso, um peso para o conjunto de medidas de pressão e outro peso para o conjunto de medidas de vazão, com análise dos desvios gerados.

4.3 - Modelo de Simulação Hidráulica

As equações da continuidade e da conservação da energia e a relação entre a perda de carga e a vazão, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede num dado instante, podem ser resolvidas através de um Método Híbrido Nó-Malha. TODINI & PILATI *apud* ROSSMAN (2000) optaram por designá-lo como sendo o “Método Gradiente”, método utilizado no simulador hidráulico EPANET para obtenção dos valores de pressão e vazão na rede.

Considerando uma rede com N nós e NF nós com carga hidráulica fixa, a relação perda de carga x vazão em uma tubulação entre os nós i e j pode ser representada pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = r.Q_{ij}^n + m.Q_{ij}^2 \quad (4.5)$$

onde H é a carga hidráulica no nó, h a perda de carga total, r o termo de perda de

carga que depende da formulação utilizada, Q a vazão na tubulação, n o expoente da formulação perda de carga x vazão e m o coeficiente de perda de carga localizada.

A conservação de massa nos nós é especificada pela expressão:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i = 0 \quad \text{para} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.6)$$

em que C é o consumo no nó i e J_i são todos os nós conectados ao nó i . Assim, conhecendo a carga hidráulica nos NF nós, obtém-se os valores de pressão e vazão na rede que satisfaçam as equações (4.5) e (4.6).

Arbitrada uma solução inicial para as vazões nas tubulações, novas cargas hidráulicas nos nós são obtidas em cada iteração do Método Gradiente, resolvendo o seguinte sistema linear:

$$A.H = F \quad (4.7)$$

em que A é a matriz Jacobiana ($N \times N$), H o vetor de incógnitas em termos das cargas hidráulicas e F o vetor de balanço de massa mais um fator de correção da vazão.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são dados por:

$$A_{ii} = \sum_{j \in J_i} x_{ij} \quad (4.8)$$

enquanto os elementos não nulos fora da diagonal são dados por:

$$A_{ij} = -x_{ij} \quad (4.9)$$

em que x_{ij} é o inverso da derivada da perda de carga total na tubulação entre os nós i e j , dado por:

$$x_{ij} = \frac{1}{n.r.|Q_{ij}|^{n-1} + 2.m.|Q_{ij}|} \quad (4.10)$$

O vetor F é composto pela parcela do balanço de massa no nó adicionada um fator de correção da vazão, como:

$$F_i = \left(\sum_{j \in J_i} Q_{ij} - C_i \right) + \sum_{j \in J_i} y_{ij} + \sum_{f \in J_f} x_{if} . H_f \quad (4.11)$$

sendo o último termo aplicável a qualquer tubulação ligando o nó i a um nó f de carga hidráulica constante, J_f o conjunto de nós com carga hidráulica constante ligados ao nó i , e y o fator de correção da vazão, dado pela seguinte expressão:

$$y_{ij} = x_{ij} \left(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (4.12)$$

em que $\text{sgn}(x)$ é 1 se $x > 0$ e -1 caso contrário.

Após terem sido calculadas as cargas hidráulicas nos nós, os novos valores das vazões nas tubulações são obtidos de acordo com a seguinte expressão:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - [y_{ij} - x_{ij}(H_i - H_j)] \quad (4.13)$$

Se a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto) relativa à vazão total em todas as tubulações for superior à tolerância especificada, as equações (4.7) e (4.13) são resolvidas novamente.

O simulador hidráulico EPANET será um módulo auxiliar na avaliação hidráulica da rede de distribuição de água que considera vazamentos e demandas dirigidas pela pressão.

Uma das dificuldades inerentes à problemática dos vazamentos é a avaliação da parcela da vazão abastecida total que corresponde aos vazamentos. Assim, é necessária uma suposição quanto à composição da vazão abastecida. Embora, na prática haja a possibilidade de usos não autorizados da água admitiu-se que a vazão total abastecida (TS) possa ser subdividida em demanda total efetivamente abastecida (TD) e vazamentos (V), e o balanço de massa correspondente passa ser escrito como:

$$TS = TD + V \quad (4.14)$$

Supondo-se, ainda, que a distribuição espacial da demanda total seja conhecida e obedeça a um mesmo padrão de variação temporal, refletido no fator multiplicador (FT) da demanda total de referência (TS^*), geralmente estabelecida com base nos consumos mensais, a demanda potencial total (TDP) pode ser expressa como:

$$TDP = FT \cdot TS^* \quad (4.15)$$

Assim, a demanda potencial total corresponde à demanda efetivamente abastecida total mais aquela parcela que deixa de ser atendida (PNA), devido às limitações impostas pelas variações das pressões (modelo pressão x demanda):

$$TD = TDP - PNA \quad (4.16)$$

Substituindo-se as equações (4.15) e (4.16) em (4.14), tem-se:

$$TS = FT \cdot TS^* - PNA + V \quad (4.17)$$

Dessa maneira, o fator (FT) pode ser obtido a partir dos valores estimados iniciais para PNA e V como:

$$FT = \frac{TS + PNA - V}{TS^*} \quad (4.18)$$

onde $PNA = (FT \cdot TS^* - TD)_{\text{inicial}}$; para V_{inicial} .

Assim, o novo fator multiplicador (FT_2) no procedimento iterativo será:

$$FT_2 = \frac{TS + FT_1 \cdot TS^* - TD_1 - V_1}{TS^*} \quad (4.19)$$

sendo FT_1 , TD_1 e V_1 os valores na estimativa anterior para o fator multiplicador, a demanda total efetivamente abastecida e o vazamento total, respectivamente.

FIGURA 4.1 - Fluxograma do processo iterativo proposto para avaliação hidráulica e determinação do fator de consumo para cada padrão (cenário) de demanda.

Na Figura 4.1:

Δ_1 = máximo desvio entre as pressões anteriores e presentes calculadas para cada nó.

$$TS^* = \sum_{i \in N} d_i^* \quad (4.20)$$

$$TD = FT_1 \sum_{i \in N} d_i^* \cdot \rho_i \quad (4.21)$$

$$V = \sum_{i \in N} v_i \quad (4.22)$$

N = número de nós.

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos modelos de vazamento e demanda dependentes da pressão descritos a seguir, integrando-os ao simulador hidráulico EPANET, sem intervenção direta sobre o código existente, propõe-se, portanto, o procedimento iterativo ilustrado no fluxograma da Figura 4.1. Uma rotina computacional de cálculo foi codificada em linguagem C++ para a realização dos cálculos em conformidade com o fluxograma apresentado.

Para avaliação das perdas por vazamentos, foi utilizada a formulação proposta por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), dada pela eq. (2.13), onde se considera que nas tubulações em cada zona há valores constantes de vazamento por área de superfície de tubo.

No entanto, para avaliação das demandas nos nós, são utilizadas as metodologias propostas por FUJIWARA & LI (1998), TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) e TABESH & KARIMZADEH (2000), todas descritas na Tabela 2.1, para fins de comparações.

O processo descrito no fluxograma da Figura 4.1 tem início com o conhecimento prévio da vazão abastecida total (TS) e do consumo potencial no espaço para uma certa condição operacional do dia, que inclui a demanda total efetivamente abastecida aos consumidores (TD) e a quantidade total das perdas por vazamentos (V). O conhecimento da vazão total abastecida pode ser feito através do controle das vazões que saem dos reservatórios. Além da vazão total abastecida, também são dados de entrada no modelo a vazão de abastecimento de referência (TS^*), geralmente determinada com base no consumo médio mensal, as rugosidades absolutas ε e coeficientes de perdas por vazamento θ para cada tubulação ou zona, o expoente de perda β para cada nó ou zona, a formulação para variação das demandas com a pressão, além das características da rede, como diâmetros e comprimentos das tubulações, níveis dos reservatórios, topografia e componentes hidráulicos.

4.4 – Integração entre os Modelos de Simulação Hidráulica e de Otimização

Para estudos sobre a calibração em termos das rugosidades absolutas, diâmetros, demandas, cotas topográficas e parâmetros do modelo de vazamentos, além da identificação de registros na rede de distribuição de água, uma rotina computacional foi implementada em linguagem C++, utilizando o simulador hidráulico EPANET como módulo auxiliar no processo iterativo proposto e a biblioteca *Galib* C++ para desenvolvimento dos Algoritmos Genéticos. Foi implementado, também, o método Simplex (NELDER & MEAD, 1965) para uso em conjunto com os AGs (método híbrido).

Três arquivos de entrada foram construídos:

Arquivo 1: contém os dados observados (simulados no avaliador hidráulico) de pressão, vazão, nível dos reservatórios, com as respectivas identificações de localização da medida (nó e tubulação), e vazão abastecida para cada padrão de demanda, além dos pesos da função objetivo para cada tipo de medida (pressão ou vazão).

Arquivo 2: contém os parâmetros estabelecidos dos AGs, como tipo (geracional elitista ou *Steady-State*), seleção (Ordenamento, Roda da Roleta, Torneio, Uniforme, Amostragem Determinística e *Stochastic Remainder Sampling* - SRS), número de cromossomos a serem trocados (no caso do AG *Steady-State*), recombinação (Uniforme, Um Ponto, Dois Pontos, Aritmética e $BLX-\alpha$), probabilidades de recombinação e mutação, tamanho da população, número de gerações e semente aleatória. Neste arquivo, está estabelecida a setorização da rede de distribuição de água em relação às rugosidades absolutas e parâmetros de vazamento, identificando as tubulações que compõem cada zona, as variáveis de decisão do problema, que podem ser as rugosidades absolutas, parâmetros de vazamento (coeficiente e expoente), diâmetros, cotas topográficas, demandas e a localização de um determinado número de registros, além dos limites mínimo e máximo para cada variável de decisão. Por fim, o modelo pressão x demanda (FUJIWARA & LI, 1998; TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999 e TABESH & KARIMZADEH, 2000).

Arquivo 3: entrada do simulador hidráulico EPANET, contendo os dados da rede, como demandas e cotas topográficas dos nós, nível dos reservatórios, comprimentos, diâmetros e rugosidades das tubulações, bombas, válvulas e regras de operação do sistema, além de opções quanto ao uso de equações de perda de carga (Darcy-Weisbach, Hazen-Williams ou Chezy-Manning), unidades, tolerância e outros.

Assim, o fluxograma da Figura 4.2 mostra o processo de calibração com a utilização dos AGs como método de busca.

FIGURA 4.2 - Fluxograma do processo de calibrao com os AGs.

A integrao do modelo de otimizao ao processo de calibrao, empregando o modelo hbrido (AGs e Mtodo Simplex) apresentada na Figura 4.3.

FIGURA 4.3 - Fluxograma do processo de calibração com o modelo híbrido.

Diferentes formas de hibridização para calibração de modelos de redes de distribuição de água são descritas no item 3.2.

4.5 – Critério de Convergência

Nas simulações realizadas, o número de gerações foi o critério de parada adotado para o uso dos Algoritmos Genéticos. Este critério foi adotado devido à melhor utilização da biblioteca *Galib C++*, visto que outro critério demandaria um esforço computacional maior, devido à incompatibilidade da biblioteca com outras formas de convergência.

No caso do método híbrido, uma tolerância foi adotada para a verificação da convergência do Método Simplex, e comparada com a equação (3.13).

4.6 – Parâmetros dos Algoritmos Genéticos

Os parâmetros dos AGs aplicados nas simulações para o processo de calibração são descritos na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Parâmetros dos AGs adotados nas simulações.

	Tipos de AGs	
	Geracional elitista	Steady-State *
Representação das soluções	Real	Real
População de soluções	dependente do nº de variáveis de decisão	
Recombinação	definida em análise de sensibilidade no cap. 5	
Probabilidade de recombinação	0,70	1,00
Seleção	definida em análise de sensibilidade no cap. 5	
Mutação	gaussiana	gaussiana
Probabilidade de mutação	0,01	0,01
Taxa de elitismo	0,30	0,30
Número de gerações	dependente do nº de variáveis de decisão	
Escalonamento	linear (c=1,5)	linear (c=1,5)

* Para o caso do AG *Steady-State*, 4 indivíduos da população foram selecionados para realização dos operadores recombinação e mutação, número este que conduziu a melhores resultados nas simulações e, para não descaracterizar o tipo de AG, optou-se por não aumentar o número de indivíduos no processo.

4.7 – Rede Exemplo

Com vistas às análises do algoritmo proposto, empregou-se a rede estudada por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), mostrada na Figura 4.4, cujos dados constam das Tabelas 4.2 e 4.3.

FIGURA 4.4 - Rede hipotética utilizada para a verificação do algoritmo.

A rede analisada possui três zonas homogêneas em termos do parâmetro do modelo de vazamento (θ) e uma única zona para o expoente de vazamento (β) e a rugosidade absoluta (ε).

É utilizado um fator de distribuição espacial das demandas igual a 0,20, já que apenas cinco nós da rede possuem demandas.

Neste trabalho, foram admitidos diferentes níveis d'água nos três reservatórios, expoente de perda (β), coeficientes de perda (θ) para cada zona, rugosidade absoluta (ε) e demandas totais abastecidas e de referência, para fins de estudos do algoritmo de avaliação hidráulica proposto. Os dados e resultados das diversas simulações são reportados no capítulo 5.

Para as simulações foi adotado o modelo de vazamento proposto por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) através da eq. (2.13) e três modelos pressão x demanda (FUJIWARA & LI, 1998; TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999 e TABESH & KARIMZADEH, 2000) para fins de comparações.

TABELA 4.2 - Dados das tubulações e diferentes zonas homogêneas em termos dos vazamentos.

Tubulação	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Zona (θ)
1	1000,0	500,0	3
2	500,0	250,0	1
3	1000,0	500,0	3
4	500,0	150,0	1
5	500,0	150,0	1
6	500,0	250,0	1
7	500,0	250,0	1
8	500,0	150,0	1
9	500,0	150,0	2
10	500,0	250,0	2
11	500,0	150,0	2
12	560,0	250,0	2
13	250,0	250,0	2
14	560,0	250,0	2
15	500,0	150,0	2
16	500,0	250,0	2
17	500,0	150,0	2
18	500,0	150,0	2
19	500,0	250,0	2
20	700,0	150,0	2
21	500,0	250,0	2
22	500,0	500,0	3
23	1,0	500,0	3
24	1,0	500,0	3
25	1,0	500,0	3

TABELA 4.3 - Cotas dos nós.

Nó	Cota (m)
1	25,0
2	20,0
3	22,0
4	27,0
5	30,0
6	27,0
7	22,0
8	25,0
9	25,0
10	20,0
11	22,0
12	27,0
13	25,0
14	25,0
15	30,0

4.8 – Análise da Calibração

Neste trabalho, a análise da performance da calibração será feita com base nos critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989), para comparação entre os valores reais (sintéticos) e aqueles obtidos via simulação. Para os valores de vazão, o erro relativo, dado pela eq. (4.23), deve estar dentro da seguinte faixa:

- $\pm 5\%$ para as medidas de vazão quando as vazões medidas excedem 10% da vazão abastecida total;
- $\pm 10\%$ para as medidas de vazão quando as vazões medidas não excedem 10% da vazão abastecida total.

Para o caso dos valores de pressão, o critério deve se basear no erro absoluto, dado pela diferença entre o valor simulado e o observado, e não deve exceder uma das seguintes faixas:

- $\pm 0,5$ m para 85% das medidas de pressão;
- $\pm 0,75$ m para 95% das medidas de pressão;
- ± 2 m para 100% das medidas de pressão.

$$Erro\ Relativo_i = \frac{Z_i - Z_i^*}{Z_i^*} 100(\%) \quad (4.23)$$

onde Z_i é o valor encontrado pelo modelo de otimização para a variável de decisão ou de estado i e Z_i^* é o valor real de i .

Para as variáveis de decisão, foram adotados o erro relativo (equação (4.23)) e o erro relativo total (eq. 4.24) como critério de comparação entre os valores reais (sintéticos) e os valores simulados, sendo esta comparação não normalizada nos moldes do WATER RESEARCH CENTRE (1989).

$$Erro\ Total = \sum_{i=1}^{nvd} Erro\ Relativo_i (\%) \quad (4.24)$$

onde nvd é o número total de eventos na simulação.

V - Resultados e Discussões

Os procedimentos apresentados no capítulo 4 são empregados aqui para a calibração de um modelo de rede de distribuição de água. A Figura 5.1 apresenta um organograma das simulações realizadas neste trabalho e, a cada passo do estudo, os resultados das simulações são apresentados e discutidos.

FIGURA 5.1 - Organograma das simulações realizadas.

5.1 - Algoritmo Iterativo de Avaliação Hidráulica

Com vistas às análises de convergência do algoritmo de avaliação hidráulica proposto, empregou-se a rede estudada por TUCCIARELLI, CRIMINISI &

TERMINI (1999), mostrada na Figura 4.4, cujos dados constam das Tabelas 4.2 e 4.3.

Cinco situações foram analisadas, primeiramente admitindo-se o nível de 70 m.c.a. nos três reservatórios (representando um período do dia em que as demandas são mais baixas e as pressões elevadas), e depois admitindo-se o nível de 40 m.c.a. (período em que as demandas são elevadas e as pressões mais baixas).

As cinco situações analisadas foram designadas por I, II, III, IV e V, e os dados como expoente de perda (β), coeficientes de perda (θ) para cada zona, rugosidade absoluta (ε) e demandas totais abastecidas e de referência, são apresentados na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 - Dados das cinco situações.

Situação	Expoente de perda (β)	Demanda		Rugosidade absoluta (mm)	Coeficiente de perda		
		Referência (l/s)	Abastecida (l/s)		Zona 1 - θ_1	Zona 2 - θ_2	Zona 3 - θ_3
I	1,253	180,0	267,3	3,153	7,504E-08	1,909E-07	0
II	1,188	196,0	273,4	3,433	5,235E-08	2,543E-07	0
III	0,924	205,0	295,2	3,162	1,090E-07	8,540E-07	0
IV	0,100	152,0	288,3	3,474	1,046E-05	2,054E-05	0
V	0,100	234,0	267,7	1,953	4,900E-10	7,635E-06	0

Para as simulações foi adotado o modelo de vazamento proposto por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) através da eq. (2.13). Admitindo-se o nível de 70 m.c.a. nos três reservatórios, as cinco situações foram analisadas e os valores obtidos pelo modelo para alguns nós e saída dos reservatórios da rede são mostrados nas Tabelas 5.2 e 5.3. Não houve influência do modelo de variação das demandas com a pressão, visto que os níveis dos reservatórios foram suficientes para suprir a demanda potencial em todos os nós, sob pressão mínima de 5 m.c.a. pré-estabelecida e pressão desejada de suprimento da demanda de 15 m.c.a. para todos os nós da rede.

TABELA 5.2 - Valores de pressões e vazões obtidos para as cinco situações.

Situação	Pressão (m.c.a.)			Vazão (l/s)			Vazão Abastecida Total (l/s)
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Tubulação 23	Tubulação 24	Tubulação 25	
I	41,0	44,0	46,4	72,5	77,4	117,4	267,3
II	40,7	43,4	46,3	72,4	79,5	121,5	273,4
III	40,3	42,9	46,2	75,5	86,6	133,1	295,2
IV	40,6	43,7	46,4	76,1	83,1	129,1	288,3
V	41,1	43,9	46,4	75,1	75,0	117,6	267,7

TABELA 5.3 - Valores de demandas efetivamente abastecidas e vazamentos obtidos para as cinco situações.

Situação	Demanda Efetiva (l/s)	Vazamento (l/s)	FT
I	163,8	103,5	0,91
II	174,1	99,3	0,89
III	176,3	118,9	0,86
IV	135,5	152,8	0,89
V	221,5	46,2	0,95

A convergência do modelo proposto é demonstrada através da evolução dos valores do fator multiplicador das demandas (FT) e do balanço de massa ($TS - V - TD$) com as iterações, para as cinco situações, nas Figuras 5.2 e 5.3.

Observa-se que os testes realizados admitindo-se o nível de 70 m.c.a. nos reservatórios não limitam o atendimento das demandas potenciais. Os valores de perdas por vazamentos obtidos são elevados devido à ocorrência de pressões elevadas. Nessas circunstâncias, o fator, inicialmente 1, decresce ao longo das iterações tendendo a valores inferiores ao inicial.

A tolerância adotada para o *loop* interno do procedimento iterativo proposto foi de 0,01 m.c.a., já que o critério de convergência deste *loop* baseia-se no máximo desvio entre as pressões anteriores e presentes, calculadas para cada nó. Para o *loop* externo do algoritmo, dois critérios de convergência foram admitidos: o fator multiplicador do consumo e o balanço de massa no sistema. Quanto ao fator de consumo, a tolerância adotada foi de 0,01 e do balanço de massa de 0,1 l/s, já que testes realizados indicaram que uma precisão maior não propiciava uma melhora significativa dos resultados.

FIGURA 5.2 - Convergência do fator de consumo (FT) para as cinco situações.

FIGURA 5.3 - Convergência do balanço de massa para as cinco situações.

Considerando o nível de 40 m.c.a. nos três reservatórios para representar uma condição operacional em que as demandas requeridas nos nós são elevadas e as pressões mais baixas, foram feitos testes do modelo proposto para quatro diferentes modelos de variação das demandas com a pressão: TABESH & KARIMZADEH (2000) com $n_j = 2$ (Modelo A), TABESH & KARIMZADEH (2000) com $n_j = 1,5$ (Modelo B), FUJIWARA & LI (1998) (Modelo C) e TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) (Modelo D). Os valores obtidos para alguns nós e trechos, considerando uma pressão mínima de 5 m.c.a. e pressão desejada de suprimento da demanda de 15 m.c.a. para todos os nós da rede, são mostrados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

TABELA 5.4 - Valores de pressões e vazões obtidos para as cinco situações e quatro modelos de demanda.

Situação	Modelo	Pressão (m.c.a.)			Vazão (l/s)		
		Nó 1	Nó 2	Nó 3	Tubulação 23	Tubulação 24	Tubulação 25
I	A	10,47	12,35	15,47	82,62	75,71	108,87
	B	10,56	12,40	15,32	83,48	76,22	107,47
	C	10,65	12,22	15,21	84,70	76,48	106,01
	D	10,39	12,17	15,61	82,01	75,14	110,02
II	A	10,19	11,91	15,24	84,12	77,88	111,29
	B	10,29	11,99	15,07	85,06	78,49	109,79
	C	10,43	11,87	14,91	86,51	78,89	107,91
	D	10,10	11,71	15,39	83,56	77,30	112,44
III	A	9,80	11,37	14,95	89,13	85,34	120,66
	B	9,91	11,46	14,77	90,04	85,92	119,13
	C	10,10	11,44	14,50	91,97	86,67	116,51
	D	9,71	11,17	15,10	88,66	84,77	121,68
IV	A	10,59	13,18	16,04	79,65	83,76	124,87
	B	10,65	13,16	15,96	80,30	84,03	123,96
	C	10,69	12,92	15,89	81,29	84,07	122,93
	D	10,53	13,08	16,11	79,28	83,42	125,60
V	A	11,20	13,59	16,14	78,40	75,75	113,45
	B	11,24	13,55	16,05	79,17	76,06	112,36
	C	11,25	13,29	16,02	79,92	76,00	111,65
	D	11,13	13,51	16,23	77,75	75,30	114,59

As Figuras 5.4 a 5.13 mostram a variação do fator multiplicador do consumo e do balanço de massa para as cinco situações e quatro modelos de demandas.

TABELA 5.5 - Valores de demandas totais efetivamente abastecidas e vazamentos obtidos para as cinco situações e quatro modelos de demanda.

Situação	Modelo	Demanda Efetiva (l/s)	Vazamentos (l/s)	FT
I	A	244,97	22,25	1,60
	B	244,90	22,31	1,67
	C	244,92	22,29	1,72
	D	245,04	22,17	1,52
II	A	250,60	22,72	1,53
	B	250,53	22,80	1,60
	C	250,50	22,83	1,66
	D	250,70	22,62	1,46
III	A	258,14	36,98	1,54
	B	258,01	37,10	1,64
	C	257,88	37,22	1,72
	D	258,26	36,85	1,47
IV	A	153,23	135,03	1,17
	B	153,21	135,05	1,22
	C	153,23	135,03	1,26
	D	153,25	135,00	1,12
V	A	226,78	40,85	1,09
	B	226,77	40,85	1,13
	C	226,76	40,85	1,14
	D	226,79	40,83	1,04

FIGURA 5.4 - Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação I.

FIGURA 5.5 - Convergência quanto ao balanço de massa para situação I.

FIGURA 5.6 - Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação II.

FIGURA 5.7 - Convergência quanto ao balanço de massa para situação II.

multiplicador (FT) para a situação II.

FIGURA 5.8 - Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação III.

FIGURA 5.10 - Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação IV.

FIGURA 5.12 - Convergência do fator multiplicador (FT) para a situação V.

balanço de massa para situação II.

FIGURA 5.9 - Convergência quanto ao balanço de massa para situação III.

FIGURA 5.11 - Convergência quanto ao balanço de massa para situação IV.

FIGURA 5.13 - Convergência quanto ao balanço de massa para situação V.

Para o nível de 40 m.c.a. nos reservatórios, as demandas abastecidas são restringidas pelas pressões e, nessas condições, o fator multiplicador cresce ao longo das iterações, tendendo a valores maiores que o inicial (1,0). Os resultados obtidos

demonstraram que o Modelo D (TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999) requer um menor número de iterações para a convergência do algoritmo proposto, tanto para o fator multiplicador do consumo FT , quanto para o balanço de massa no sistema no *loop* externo do algoritmo. Tal comportamento parece resultado do fato da primeira estimativa do balanço de massa no sistema ser sempre menor no caso do Modelo D. Por outro lado, o Modelo C (FUJIWARA & LI, 1998) produziu o maior número de iterações, dentre os quatro modelos, tanto no balanço de massa no sistema quanto no fator multiplicador do consumo. O mesmo ocorreu na convergência do processo iterativo para avaliação dos vazamentos e das demandas dirigidas pela pressão (*loop* interno): o Modelo D requer menos iterações e o Modelo C foi o que mais exigiu em termos de número de iterações. Os Modelos A, B e D mantiveram um número constante de iterações a cada passo do algoritmo, e o Modelo C aumentava o número de iterações para diminuir o desvio das pressões anteriores e presentes a cada passo do algoritmo para a convergência do fator multiplicador do consumo.

Os valores obtidos nas simulações, mostrados nas Tabelas 5.4 e 5.5, foram praticamente os mesmos para os quatro modelos em cada situação, diferindo apenas o fator multiplicador FT . Isto se deve ao emprego de modelos de demandas dependentes da pressão distintos. Sendo a vazão abastecida total (TS) constante e, também, as perdas por vazamentos (V) constantes (o mesmo modelo de vazamentos é utilizado em todas as simulações – TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI, 1999), a demanda efetivamente abastecida deverá ser a mesma para cada modelo e situação, sendo, também, a demanda de referência constante para cada nó. Assim, os parâmetros diferentes em cada simulação serão o fator multiplicador do consumo FT e a máxima razão entre a demanda efetivamente abastecida e a demanda potencial em cada nó, dada por ρ_i .

A convergência foi também analisada a partir de diferentes estimativas iniciais para o fator multiplicador do consumo, ao invés de adotar-se $FT = 1$. Adotando o Modelo A para variação das demandas com a pressão e nível de 40 m.c.a. para os três reservatórios, os resultados obtidos para diferentes estimativas iniciais do fator de consumo para a situação I são mostrados na Figura 5.14, onde se pode verificar

que o modelo proposto convergiu para um mesmo valor a partir de diversas estimativas iniciais distintas.

A forma como a condição operacional do sistema influencia a convergência no processo iterativo da avaliação dos vazamentos e das demandas nodais (*loop* interno) pode ser observada pelo comportamento dos desvios máximos produzidos entre as pressões anteriores e presentes, como se pode verificar nas Figuras 5.15 e 5.16. Quando o fator de consumo na rede é menor que 1 (Figura 5.15), ou seja, as pressões são elevadas e as demandas mais baixas, o desvio máximo produzido na primeira iteração permanece praticamente constante ao longo das iterações para convergência do fator multiplicador do consumo (*loop* externo), convergindo logo em seguida, com poucas iterações. No entanto, se o fator multiplicador do consumo na rede é maior que 1 (Figura 5.16), ou seja, as pressões são mais baixas e as demandas elevadas, o desvio máximo produzido na primeira iteração cresce ao longo das iterações para convergência do fator de consumo. Isto se deve ao fato de que as demandas nodais sofrem modificações quanto à capacidade de abastecimento da demanda requerida, isto é, as pressões atuantes são menores que a pressão desejada para suprimento da demanda requerida. Por outro lado, o fator de consumo cresce devido à condição operacional do sistema, fazendo com que o desvio seja maior a cada iteração do fator de consumo.

O procedimento iterativo para avaliação hidráulica de redes de distribuição de águas para abastecimento, incluindo vazamentos e demandas dirigidas pela pressão, com o auxílio do *software* EPANET, foi considerado robusto quanto às análises de convergência do algoritmo para os diferentes modelos de demandas existentes na literatura. As simulações realizadas a partir de modelos de demandas dependentes das pressões distintos, não resultaram discrepância considerável na avaliação dos consumos para a rede hipotética analisada. Dessa maneira, o modelo proposto por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) mostrou-se vantajoso por implicar em menor número de iterações.

FIGURA 5.14 - Convergência do fator multiplicador para diferentes estimativas iniciais.

FIGURA 5.15 - Convergência no *loop* interno para FT menor que 1.

FIGURA 5.16 - Convergência no *loop* interno para FT maior que 1.

5.2 - Algoritmo de Calibração

Após a implementação do algoritmo de calibração, os testes quanto às possibilidades de emprego da biblioteca *Galib C++* no procedimento de calibração em termos de diferentes conjuntos de variáveis de decisão foram feitos considerando três padrões de consumo (mínimo, médio e máximo) para a mesma rede descrita na Figura 4.4, cujos dados constam das Tabelas 4.2 e 4.3. Os três padrões de consumo

foram simulados pelo algoritmo de avaliação hidráulica proposto, tendo, cada um, diferentes valores para os níveis dos reservatórios, demanda abastecida total e pressão nos nós de consumo, como visto nas Tabelas 5.7 e 5.8. Tanto a formulação de vazamentos quanto a de demanda variável com a pressão apresentadas por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) foram utilizadas nas simulações. Os dados da rugosidade absoluta, demanda de referência e dos parâmetros do modelo de vazamentos são apresentados na Tabela 5.6, considerando a mesma setorização proposta para a rede, como descrito no capítulo 4.

TABELA 5.6 - Dados da rede empregados nas simulações.

Expoente de perda (β)	Demanda de Referência (l/s)	Rugosidade absoluta (mm)	Coeficiente de perda		
			θ_1	θ_2	θ_3
1,253	180,0	3,153	7,504E-08	1,909E-07	0

TABELA 5.7 - Níveis dos reservatórios e demanda abastecida para os padrões de consumo.

Padrão de consumo	Nível dos reservatórios (m)	Vazão abastecida (l/s)		
		Reservatório 16	Reservatório 17	Reservatório 18
1	65,0	49,25	54,80	83,12
2	55,0	76,37	75,73	115,14
3	45,0	103,77	97,00	146,67

TABELA 5.8 - Pressão nos nós de consumo para os padrões de consumo.

Padrão de consumo	Pressão (m.c.a.)				
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 6	Nó 11
1	38,15	42,26	42,31	36,83	41,20
2	25,60	28,14	31,17	25,55	28,60
3	12,16	12,65	19,38	13,73	14,98

Os dados da Tabela 5.6 foram empregados para avaliação das vazões abastecidas pelos três reservatórios (Tabela 5.7) e pressões nos nós de consumo (Tabela 5.8), os quais foram adotados como valores “observados”, para o cômputo da função objetivo ou de aptidão para cada solução ou combinação de valores para as variáveis de decisão do problema. Embora a rede de amostragem de dados de pressão e/ou vazão na rede deva sempre ser precedida de uma otimização quanto à localização dos pontos de amostragem, tais análises estão além do escopo deste trabalho.

5.2.1 - Análise dos Operadores Genéticos

Devido ao grande número de operadores genéticos disponíveis na biblioteca *Galib C++*, uma análise quanto aos tipos de seleção e recombinação foi feita para escolha dos operadores a serem utilizados nas demais simulações.

Primeiramente, analisamos os diferentes tipos de seleção: Ordenamento, Roda da Roleta, Torneio, Uniforme, Amostragem Determinística (AD) e *Stochastic Remainder Sampling* (SRS), quanto à precisão dos valores simulados das variáveis de decisão. Assim, foram escolhidas como variáveis de decisão do problema de calibração as rugosidades absolutas e os parâmetros do modelo pressão x vazamento (expoente e coeficiente de perda), seguindo a mesma setorização já descrita no item 4.7. As faixas de valores admitidos para as variáveis de decisão são apresentadas na Tabela 5.9.

TABELA 5.9 - Valores mínimos e máximos das variáveis de decisão.

Variável de Decisão	Valor Mínimo	Valor Máximo
ε (mm)	0,01	5,00
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,50
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,50
β	0,10	1,30

O valor do coeficiente de vazamento para o setor 3 (θ_3) é conhecido e igual a zero.

Foram analisados dois tipos de AGs, geracional elitista e *Steady-State*, com escalonamento linear e função objetivo *FOI* (eq. (4.1)), adotando, como critério de convergência para as simulações, o número máximo de gerações. As informações para os tipos de AGs constam da Tabela 5.10.

TABELA 5.10 - Dados das simulações realizadas para análise dos tipos de seleção.

AG	Recombinação	Prob. de Recombinação (%)	Prob. de Mutação (%)	População	Número de Gerações	Semente Aleatória
Geracional elitista	Aritmética	70	1	100	500	2400
<i>Steady-State</i>	Aritmética	100	1	100	50	2400

Os resultados das simulações realizadas, em termos da evolução do valor da função de aptidão para os dois tipos de AGs são apresentados nas Figuras 5.17 e 5.18. Nas Tabelas 5.11 e 5.13 são apresentadas as comparações entre valores simulados e reais das variáveis de decisão.

FIGURA 5.17 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de seleção – AG geracional elitista.

TABELA 5.11 - Análise dos tipos de seleção – AG geracional elitista.

Variável de Decisão	Tipos de Seleção e Erro Relativo correspondente						Valor Real
	Ordenamento	Erro Relativo (%)	Roda da Roleta	Erro Relativo (%)	Torneio	Erro Relativo (%)	
ε (mm)	3,286	4,2	3,045	3,4	3,286	4,2	3,153
θ_1 (x10e-7)	1,605	114,0	1,066	42,1	1,066	42,1	0,750
θ_2 (x10e-7)	1,886	1,2	2,413	26,4	2,545	33,3	1,909
β	1,269	1,3	1,173	6,4	1,190	5,0	1,253
	Total	120,7		78,3		84,7	

Variável de Decisão	Tipos de Seleção e Erro Relativo correspondente						Valor Real
	Uniforme	Erro Relativo (%)	SRS	Erro Relativo (%)	AD	Erro Relativo (%)	
ε (mm)	3,493	10,8	3,125	0,9	3,262	3,5	3,153
θ_1 (x10e-7)	1,313	75,1	0,683	8,9	1,598	113,1	0,750
θ_2 (x10e-7)	2,358	23,5	2,358	23,5	3,201	67,7	1,909
β	1,246	0,6	1,162	7,3	1,137	9,3	1,253
	Total	109,9		40,6		193,5

FIGURA 5.18 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de seleção – AG *Steady-State*.

TABELA 5.12 - Análise dos tipos de seleção – AG *Steady-State*.

	Tipos de Seleção e Erro Relativo correspondente						
Variável de Decisão	Ordenamento	Erro Relativo (%)	Roda da Roleta	Erro Relativo (%)	Torneio	Erro Relativo (%)	Valor Real
ε (mm)	2,519	20,1	2,991	5,1	3,189	1,1	3,153
θ_1 (x10e-7)	0,574	23,5	0,574	23,5	0,574	23,5	0,750
θ_2 (x10e-7)	2,027	6,2	2,027	6,2	2,027	6,2	1,909
β	1,188	5,2	1,201	4,2	1,228	2,0	1,253
	Total	54,9		38,9		32,8	
	Tipos de Seleção e Erro Relativo correspondente						
Variável de Decisão	Uniforme	Erro Relativo (%)	SRS	Erro Relativo (%)	AD	Erro Relativo (%)	Valor Real
ε (mm)	3,189	1,1	3,199	1,5	3,249	3,0	3,153
θ_1 (x10e-7)	1,168	55,7	0,817	8,9	1,168	55,7	0,750
θ_2 (x10e-7)	2,482	30,0	2,184	14,4	2,481	30,0	1,909
β	1,188	5,2	1,201	4,2	1,201	4,2	1,253
	Total	92,1		28,9		92,9	

Adotando como critério de comparação entre os tipos de seleção o erro relativo, dado pela eq. (4.23), para cada variável de decisão e somando-se cada um deles, para obter o erro relativo total (eq. 4.24).

Para os dois tipos de AGs o melhor operador de seleção foi o *Stochastic Remainder Sampling* (SRS), tendo no AG geracional elitista um erro relativo total de 40,6% e no AG *Steady-State* 28,9%. Ainda para este último tipo de AG, os

operadores seleção do tipo Roda da Roleta e Torneio também produziram resultados melhores do que os do AG geracional elitista.

Quanto à função de aptidão, os tipos de seleção Uniforme e Amostragem Determinística não apresentaram convergência no AG geracional elitista.

Portanto, para as simulações seguintes será adotada apenas a seleção do tipo *Stochastic Remainder Sampling*.

Assim, partimos para a análise dos tipos de recombinação disponíveis na biblioteca: Uniforme, Um Ponto, Dois Pontos, Aritmético e *BLX- α* . São adotadas as mesmas variáveis de decisão descritas na Tabela 5.9, com os mesmos valores máximos e mínimos. Também foi adotado escalonamento linear e a função objetivo *FOI*. Os dados dos AGs nas simulações são descritos na Tabela 5.13.

TABELA 5.13 - Dados das simulações realizadas para análise dos tipos de recombinação.

AG	Seleção	Prob. de Recombinação (%)	Prob. de Mutação (%)	População	Número de Gerações	Semente Aleatória
Geracional elitista	SRS	70	1	100	500	2400
<i>Steady-State</i>	SRS	100	1	100	50	2400

Os resultados das simulações realizadas, com evolução da função de aptidão e comparações entre os valores reais e os simulados para os dois tipos de AGs e com o cálculo do erro relativo, são apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20, e Tabelas 5.14 e 5.15.

TABELA 5.14 - Análise dos tipos de recombinação – AG geracional elitista.

Variável de Decisão	Tipo de Recombinação e Erro Relativo correspondente					
	Uniforme	Erro Relativo (%)	Um Ponto	Erro Relativo (%)	Dois Pontos	Erro Relativo (%)
ε (mm)	3,125	0,9	3,125	0,9	3,125	0,9
θ_1 ($\times 10e-7$)	0,683	8,9	0,683	8,9	0,683	8,9
θ_2 ($\times 10e-7$)	2,358	23,5	2,358	23,5	2,358	23,5
β	1,162	7,3	1,162	7,3	1,162	7,3
Total	40,6		40,6		40,6	

Variável de Decisão	Tipo de Recombinação e Erro Relativo correspondente				
	Aritmético	Erro Relativo (%)	BLX- α	Erro Relativo (%)	Valor Real
ε (mm)	3,125	0,9	3,125	0,9	3,153
θ_1 ($\times 10e-7$)	0,683	8,9	0,683	8,9	0,750
θ_2 ($\times 10e-7$)	2,358	23,5	2,358	23,5	1,909
β	1,162	7,3	1,162	7,3	1,253
Total	40,6		40,6

FIGURA 5.19 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de recombinação – AG geracional elitista.

FIGURA 5.20 – Evolução do valor de aptidão com as gerações para os diversos tipos de recombinação – AG *Steady-State*.

TABELA 5.15 - Análise dos tipos de recombinação – AG *Steady-State*.

Variável de Decisão	Tipo de Recombinação e Erro Relativo correspondente					
	Uniforme	Erro Relativo (%)	Um Ponto	Erro Relativo (%)	Dois Pontos	Erro Relativo (%)
ε (mm)	3,199	1,5	3,199	1,5	3,199	1,5
θ_1 (x10e-7)	0,817	8,9	0,817	8,9	0,817	8,9
θ_2 (x10e-7)	2,184	14,4	2,184	14,4	2,184	14,4
β	1,201	4,2	1,201	4,2	1,201	4,2
Total	28,9		28,9		28,9	

Variável de Decisão	Tipo de Recombinação e Erro Relativo correspondente				
	Aritmético	Erro Relativo (%)	BLX- α	Erro Relativo (%)	Valor Real
ε (mm)	3,199	1,5	3,199	1,5	3,153
θ_1 (x10e-7)	0,817	8,9	0,817	8,9	0,750
θ_2 (x10e-7)	2,184	14,4	2,184	14,4	1,909
β	1,201	4,2	1,201	4,2	1,253
Total	28,9		28,9		

Observa-se que o tipo de recombinação não apresentou diferenças, mantendo-se a mesma solução para diferentes tipos de recombinação. No caso do AG geracional elitista, o erro relativo total manteve-se em 40,6% e, para o AG *Steady-State*, o erro relativo total manteve-se em 28,9%.

Portanto, para as demais simulações, será adotada a recombinação aritmética com probabilidade de recombinação de 70% para o AG geracional elitista e 100% para o AG *Steady-State*, a seleção Amostragem Estocástica das Soluções Remanescentes, probabilidade de mutação (gaussiana) de 1%. O critério de convergência adotado é o do número máximo de gerações, já que estudos realizados indicaram que este fora o melhor critério para uso da biblioteca.

5.2.2 - Calibração em termos das rugosidades absolutas

Calibração de um modelo de rede de distribuição de água deve ser sempre realizada antes de qualquer análise de planejamento operacional ou reabilitação de redes. Historicamente, um dos mais difíceis passos do processo tem sido o ajuste final dos valores das rugosidades absolutas dos tubos. Estimativas dos valores das rugosidades dos tubos podem ser obtidas usando valores médios da literatura ou diretamente de medidas de campo. Pesquisadores e fabricantes têm desenvolvido tabelas que fornecem estimativas da rugosidade do tubo em função das características do material, diâmetro e idade. Embora tais tabelas possam ser úteis

para tubos novos, suas aplicações para tubos velhos diminuem significativamente com a idade destes, devido à possibilidade de incrustação, resultado das propriedades químicas da água. Tendo em vista o custo envolvido nas determinações de campo, as estimativas da rugosidade para tubos em uso devem resultar da calibração do modelo do sistema. Mesmo quando tubos novos estão sendo usados, é importante verificar os seus valores das rugosidades. Para a obtenção das estimativas das rugosidades das tubulações através da calibração, é conveniente dividir o sistema de distribuição de água em zonas que contenham as mesmas características do material e idade dos tubos.

Neste item apresentamos os resultados obtidos para as simulações visando a calibração em termos das rugosidades absolutas, considerando dois tipos de AGs (geracional elitista e *Steady-State*) e duas funções objetivo (*FO1* – eq. (4.1) e *FO2* – eq. (4.4)).

Adotamos a setorização para a rede da Figura 4.4 descrita no item 4.7, e são realizadas três simulações para cada tipo de AG e função objetivo, a partir de diferentes sementes aleatórias, descritas na Tabela 5.16.

TABELA 5.16 - Dados das simulações.

AG	Simulações	População	Gerações	Semente Aleatória	
				<i>FO1</i>	<i>FO2</i>
Geracional elitista	1	30	100	1	1
	2	30	100	150	150
	3	30	100	200	200
<i>Steady-State</i>	1	30	20	50	50
	2	30	20	100	150
	3	30	20	150	200

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, para as diferentes funções objetivo e sementes aleatórias, considerando como critério de análise a evolução da função objetivo (aptidão), a comparação entre valores simulados e observados de pressões e vazões, e os valores calibrados das variáveis de decisão, sendo o erro relativo dado pela eq. (4.23), o erro absoluto dado pela diferença entre o valor real e o valor observado e o erro absoluto médio dado pela diferença entre a média dos valores encontrados nas simulações e o valor real das variáveis de decisão. Convém salientar que os valores ditos aqui observados, são valores gerados sinteticamente.

O comportamento das duas funções objetivo (*FO1* e *FO2*) foi praticamente o mesmo para cada tipo de AG, sendo que no *Steady-State* a convergência é alcançada em pouco mais de 5 gerações. No AG geracional elitista, a simulação 1, tanto para *FO1* quanto para *FO2*, apresentou picos maiores que as simulações 2 e 3.

FIGURA 5.21 - Função de aptidão (geracional elitista e *FO1*).

FIGURA 5.22 – Função de aptidão (geracional elitista e *FO2*).

FIGURA 5.23 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO1*).

FIGURA 5.24 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO2*).

TABELA 5.17 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO1*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,26	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,13	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,37	76,36	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,72	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,13	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,79	103,77	103,74	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,02	97,00	96,97	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,61	146,66	146,72	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.18 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO1*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,13	38,15	38,17	38,15	0,02	0,00	0,02
	2	42,24	42,26	42,28	42,26	0,02	0,00	0,02
	3	42,30	42,31	42,31	42,31	0,01	0,00	0,00
	6	36,82	36,83	36,84	36,83	0,01	0,00	0,01
	11	41,18	41,20	41,21	41,20	0,02	0,00	0,01
2	1	25,57	25,60	25,64	25,60	0,03	0,00	0,04
	2	28,08	28,13	28,20	28,14	0,06	0,01	0,06
	3	31,15	31,16	31,18	31,17	0,02	0,01	0,01
	6	25,53	25,55	25,57	25,55	0,02	0,00	0,02
	11	28,57	28,60	28,64	28,60	0,03	0,00	0,04
3	1	12,11	12,15	12,22	12,16	0,05	0,01	0,06
	2	12,58	12,64	12,73	12,65	0,07	0,01	0,08
	3	19,34	19,37	19,42	19,38	0,04	0,01	0,04
	6	13,70	13,73	13,77	13,73	0,03	0,00	0,04
	11	14,92	14,97	15,05	14,98	0,06	0,01	0,07

TABELA 5.19 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,13	38,15	38,17	38,15	0,02	0,00	0,02
	2	42,24	42,26	42,28	42,26	0,02	0,00	0,02
	3	42,30	42,31	42,31	42,31	0,01	0,00	0,00
	6	36,82	36,83	36,84	36,83	0,01	0,00	0,01
	11	41,18	41,20	41,21	41,20	0,02	0,00	0,01
2	1	25,57	25,60	25,64	25,60	0,03	0,00	0,04
	2	28,08	28,13	28,20	28,14	0,06	0,01	0,06
	3	31,15	31,16	31,18	31,17	0,02	0,01	0,01
	6	25,53	25,55	25,57	25,55	0,02	0,00	0,02
	11	28,57	28,60	28,64	28,60	0,03	0,00	0,04
3	1	12,11	12,15	12,22	12,16	0,05	0,01	0,06
	2	12,58	12,67	12,73	12,65	0,07	0,02	0,08
	3	19,34	19,37	19,42	19,38	0,04	0,01	0,04
	6	13,70	13,73	13,77	13,73	0,03	0,00	0,04
	11	14,92	14,97	15,05	14,98	0,06	0,01	0,07

TABELA 5.20 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,26	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,13	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,37	76,36	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,72	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,13	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,79	103,77	103,74	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,02	97,00	96,97	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,61	146,66	146,72	146,67	0,0	0,0	0,0

Para o AG geracional elitista, não há uma diferença significativa quanto à função objetivo, na comparação entre os valores simulados e observados, com erros muito próximos de zero.

TABELA 5.21 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FOI*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,14	38,15	0,00	0,00	0,01
	2	42,26	42,27	42,27	42,26	0,00	0,01	0,01
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,60	25,61	25,61	25,60	0,00	0,01	0,01
	2	28,13	28,15	28,16	28,14	0,01	0,01	0,02
	3	31,16	31,17	31,17	31,17	0,01	0,00	0,00
	6	25,55	25,56	25,56	25,55	0,00	0,01	0,01
	11	28,60	28,61	28,62	28,60	0,00	0,01	0,02
3	1	12,15	12,18	12,18	12,16	0,01	0,02	0,02
	2	12,64	12,67	12,68	12,65	0,01	0,02	0,03
	3	19,37	19,39	19,39	19,38	0,01	0,01	0,01
	6	13,73	13,74	13,75	13,73	0,00	0,01	0,02
	11	14,97	14,99	15,00	14,98	0,01	0,01	0,02

TABELA 5.22 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FOI*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,25	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,36	76,36	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,73	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,14	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,77	103,76	103,76	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,00	96,99	96,99	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,66	146,69	146,69	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.23 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,14	38,15	0,00	0,00	0,01
	2	42,26	42,27	42,25	42,26	0,00	0,01	0,01
	3	42,31	42,31	42,30	42,31	0,00	0,00	0,01
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,19	41,20	0,00	0,00	0,01
2	1	25,60	25,61	25,58	25,60	0,00	0,01	0,02
	2	28,13	28,16	28,11	28,14	0,01	0,02	0,03
	3	31,16	31,17	31,16	31,17	0,01	0,00	0,01
	6	25,55	25,56	25,54	25,55	0,00	0,01	0,01
	11	28,60	28,62	28,58	28,60	0,00	0,02	0,02
3	1	12,15	12,18	12,13	12,16	0,01	0,02	0,03
	2	12,64	12,68	12,61	12,65	0,01	0,03	0,04
	3	19,37	19,39	19,36	19,38	0,01	0,01	0,02
	6	13,73	13,75	13,72	13,73	0,00	0,02	0,01
	11	14,97	15,00	14,94	14,98	0,01	0,02	0,04

Também não há uma diferença significativa entre as duas funções objetivo no AG *Steady-State*, com os valores simulados sendo muito próximos dos valores observados.

TABELA 5.24 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,25	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,36	76,37	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,73	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,14	115,14	115,13	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,77	103,76	103,78	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,00	96,99	97,01	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,66	146,69	146,64	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.25 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	6,00	3,226	3,162	3,070	3,153	3,153	0,00	0,0

TABELA 5.26 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	6,00	3,226	3,162	3,070	3,153	3,153	0,00	0,0

TABELA 5.27 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	6,00	3,162	3,131	3,125	3,139	3,153	-0,014	-0,4

TABELA 5.28 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	6,00	3,162	3,125	3,192	3,160	3,153	0,007	0,2

Quanto à solução final em termos das variáveis de decisão, o melhor resultado foi alcançado pelo AG geracional elitista, sem preferência quanto à função objetivo, com erro médio zero. A solução encontrada pelo AG *Steady-State* também foi

satisfatória, pois apresentou erros próximos de zero, com uma pequena vantagem para a função objetivo $FO2$.

5.2.3 - Calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento

Considerando que não existem sistemas estanques e que a perda de água nestes sistemas possa ser elevada, o levantamento do volume total perdido, bem como o caráter local destas perdas, tem sido alvo de investigações por meio da inclusão de modelos pressão x vazamento nas análises das redes de distribuição de água. No entanto, o conhecimento dos parâmetros do modelo pressão x vazamento passa pela calibração do modelo de tais sistemas. Portanto, a consideração simultânea das rugosidades absolutas e dos parâmetros do modelo de vazamentos no processo de calibração implicará ou resultará em maior precisão dos valores ajustados. A divisão do sistema de distribuição de água em diversas zonas para efeito de consideração dos vazamentos pode ser feita através de estudos de ocorrência de vazamentos, tipos de materiais e diâmetros das tubulações, bem como níveis de pressão atuante.

Neste item, apresentamos os resultados obtidos para as simulações visando a calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento (coeficiente θ e expoente β) para a rede da Figura 4.4 com a setorização descrita no item 4.7. Foram considerados dois tipos de AGs (geracional elitista e *Steady-State*) e duas funções objetivo ($FO1$ – eq. (4.1) e $FO2$ – eq. (4.4)).

São realizadas três simulações para cada tipo de AG e função objetivo, a partir de diferentes sementes aleatórias, descritas na Tabela 5.29.

TABELA 5.29 - Dados das simulações.

AG	Simulações	População	Gerações	Semente Aleatória	
				$FO1$	$FO2$
Geracional elitista	1	100	500	800	500
	2	100	500	3200	3200
	3	100	500	5600	5600
<i>Steady-State</i>	1	100	40	1	800
	2	100	40	2400	2400
	3	100	40	3200	3200

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, para as diferentes funções objetivo e sementes aleatórias, considerando como critério de análise a evolução do valor da função objetivo (aptidão), a comparação entre valores simulados e observados de pressões e vazões, e os valores calibrados das variáveis de decisão.

FIGURA 5.25 - Função de aptidão (geracional elitista e *FO1*).

FIGURA 5.26 – Função de aptidão (geracional elitista e *FO2*).

FIGURA 5.27 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO1*).

FIGURA 5.28 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO2*).

Mais uma vez nota-se a rápida convergência do AG *Steady-State* para as duas funções objetivo, com menos de 20 gerações consumidas.

TABELA 5.30 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FOI*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	37,88	38,07	38,18	38,15	0,27	0,08	0,03
	2	41,68	42,00	42,17	42,26	0,58	0,26	0,09
	3	42,18	42,28	42,31	42,31	0,13	0,03	0,00
	6	36,70	36,74	36,82	36,83	0,13	0,09	0,01
	11	40,96	41,18	41,28	41,20	0,24	0,02	0,08
2	1	25,27	25,54	25,83	25,60	0,33	0,06	0,23
	2	27,49	27,92	28,40	28,14	0,65	0,22	0,26
	3	31,04	31,16	31,28	31,17	0,13	0,01	0,11
	6	25,39	25,47	25,64	25,55	0,16	0,08	0,09
	11	28,31	28,59	28,87	28,60	0,29	0,01	0,27
3	1	11,89	12,17	12,64	12,16	0,27	0,01	0,48
	2	12,27	12,62	13,26	12,65	0,38	0,03	0,61
	3	19,25	19,41	19,70	19,38	0,13	0,03	0,32
	6	13,57	13,72	14,01	13,73	0,16	0,01	0,28
	11	14,71	15,01	15,53	14,98	0,27	0,03	0,55

TABELA 5.31 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FOI*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	50,06	48,00	48,33	49,25	1,6	-2,5	-1,9
	3	53,86	54,89	54,69	54,80	-1,7	0,2	-0,2
	22	83,24	84,30	84,16	83,12	0,1	1,4	1,3
2	1	76,62	75,62	75,66	76,37	0,3	-1,0	-0,9
	3	74,83	75,53	75,43	75,73	-1,2	-0,3	-0,4
	22	115,79	116,09	116,15	115,14	0,6	0,8	0,9
3	1	103,73	103,38	103,08	103,77	0,0	-0,4	-0,7
	3	96,59	96,76	96,57	97,00	-0,4	-0,2	-0,4
	22	147,09	147,25	147,80	146,67	0,3	0,4	0,8

TABELA 5.32 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,03	38,09	38,13	38,15	0,12	0,06	0,02
	2	41,93	42,04	42,11	42,26	0,33	0,22	0,15
	3	42,26	42,30	42,32	42,31	0,05	0,01	0,01
	6	36,70	36,71	36,71	36,83	0,13	0,12	0,12
	11	41,15	41,22	41,27	41,20	0,05	0,02	0,07
2	1	25,44	25,55	25,59	25,60	0,16	0,05	0,01
	2	27,76	27,94	28,01	28,14	0,38	0,20	0,13
	3	31,13	31,18	31,20	31,17	0,04	0,01	0,03
	6	25,40	25,44	25,44	25,55	0,15	0,11	0,11
	11	28,50	28,61	28,66	28,60	0,10	0,01	0,06
3	1	12,01	12,14	12,17	12,16	0,15	0,02	0,01
	2	12,42	12,58	12,62	12,65	0,23	0,07	0,03
	3	19,32	19,40	19,42	19,38	0,06	0,02	0,04
	6	13,60	13,67	13,67	13,73	0,13	0,06	0,06
	11	14,84	14,99	15,02	14,98	0,14	0,01	0,04

TABELA 5.33 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	47,76	47,07	46,43	49,25	-3,0	-4,4	-5,7
	3	54,92	55,21	55,49	54,80	0,2	0,7	1,3
	22	84,52	84,92	85,29	83,12	1,7	2,2	2,6
2	1	75,26	74,84	74,47	76,37	-1,5	-2,0	-2,5
	3	75,64	75,88	76,08	75,73	-0,1	0,2	0,5
	22	116,35	116,54	116,66	115,14	1,1	1,2	1,3
3	1	103,14	102,87	102,74	103,77	-0,6	-0,9	-1,0
	3	96,99	97,08	97,18	97,00	0,0	0,1	0,2
	22	147,29	147,46	147,49	146,67	0,4	0,5	0,6

Para o AG geracional elitista, não há uma diferença significativa quanto à comparação entre os valores simulados e observados. Nota-se que os maiores erros nos valores das pressões simuladas são decorrentes do uso da função objetivo *FO1*, com erro máximo de 0,65 m.c.a. na simulação 1, nó 2 e padrão de consumo 2 (Tabela 5.30), enquanto com o uso de *FO2*, o erro máximo não ultrapassou 0,38 m.c.a., para o mesmo nó e padrão de consumo (simulação 1, Tabela 5.32).

No entanto, a função objetivo *FO1* produziu melhores resultados quando comparados os valores das vazões simuladas e observadas. Enquanto o erro máximo encontrado com o uso da *FO1* foi de -2,5% para o trecho 1, padrão de consumo 1 e simulação 2 (Tabela 5.31), o erro máximo com a utilização de *FO2* foi de -5,7% para o mesmo trecho e padrão de consumo (simulação 3, Tabela 5.33), o que, de acordo com o item 4.8, a calibração não foi bem sucedida com o uso da função objetivo *FO2*.

TABELA 5.34 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FO1*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,41	49,40	49,43	49,25	0,3	0,3	0,4
	3	54,82	54,72	54,76	54,80	0,0	-0,1	-0,1
	22	82,97	83,06	82,99	83,12	-0,2	-0,1	-0,2
2	1	76,44	76,41	76,48	76,37	0,1	0,1	0,1
	3	75,88	75,67	75,73	75,73	0,2	-0,1	0,0
	22	114,92	115,14	115,01	115,14	-0,2	0,0	-0,1
3	1	103,81	103,76	103,84	103,77	0,0	0,0	0,1
	3	97,11	97,00	97,01	97,00	0,1	0,0	0,0
	22	146,49	146,67	146,58	146,67	-0,1	0,0	-0,1

TABELA 5.35 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados
(*Steady-State* e *FO1*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,18	38,13	38,15	38,15	0,03	0,02	0,00
	2	42,36	42,23	42,27	42,26	0,10	0,03	0,01
	3	42,33	42,30	42,31	42,31	0,02	0,01	0,00
	6	36,86	36,82	36,84	36,83	0,03	0,01	0,01
	11	41,21	41,18	41,19	41,20	0,01	0,02	0,01
2	1	25,63	25,57	25,59	25,60	0,03	0,03	0,01
	2	28,22	28,09	28,14	28,14	0,08	0,05	0,00
	3	31,18	31,16	31,16	31,17	0,01	0,01	0,01
	6	25,57	25,54	25,55	25,55	0,02	0,01	0,00
	11	28,62	28,58	28,59	28,60	0,02	0,02	0,01
3	1	12,17	12,13	12,14	12,16	0,01	0,03	0,02
	2	12,66	12,61	12,63	12,65	0,01	0,04	0,02
	3	19,37	19,36	19,36	19,38	0,01	0,02	0,02
	6	13,74	13,72	13,72	13,73	0,01	0,01	0,01
	11	14,97	14,94	14,95	14,98	0,01	0,04	0,03

TABELA 5.36 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados
(*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,14	38,05	38,18	38,15	0,01	0,10	0,03
	2	42,26	42,05	42,34	42,26	0,00	0,21	0,08
	3	42,31	42,26	42,33	42,31	0,00	0,05	0,02
	6	36,82	36,76	36,85	36,83	0,01	0,07	0,02
	11	41,18	41,12	41,21	41,20	0,02	0,08	0,01
2	1	25,53	25,42	25,63	25,60	0,07	0,18	0,03
	2	28,04	27,79	28,21	28,14	0,10	0,35	0,07
	3	31,14	31,09	31,18	31,17	0,03	0,08	0,01
	6	25,51	25,44	25,56	25,55	0,04	0,11	0,01
	11	28,53	28,43	28,63	28,60	0,07	0,17	0,03
3	1	12,02	11,92	12,17	12,16	0,14	0,24	0,01
	2	12,48	12,33	12,66	12,65	0,17	0,32	0,01
	3	19,28	19,23	19,38	19,38	0,10	0,15	0,00
	6	13,65	13,59	13,74	13,73	0,08	0,14	0,01
	11	14,82	14,72	14,98	14,98	0,16	0,26	0,00

TABELA 5.37 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados
(*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,15	49,05	49,21	49,25	-0,2	-0,4	-0,1
	3	54,89	54,77	54,86	54,80	0,2	-0,1	0,1
	22	83,15	83,35	83,12	83,12	0,0	0,3	0,0
2	1	76,34	76,29	76,31	76,37	0,0	-0,1	-0,1
	3	75,84	75,57	75,88	75,73	0,1	-0,2	0,2
	22	115,04	115,35	115,04	115,14	-0,1	0,2	-0,1
3	1	103,88	103,87	103,74	103,77	0,1	0,1	0,0
	3	97,12	96,97	97,11	97,00	0,1	0,0	0,1
	22	146,43	146,58	146,56	146,67	-0,2	-0,1	-0,1

Os resultados de pressões e vazões para o uso do AG *Steady-State* foram melhores que os resultados alcançados para o AG geracional elitista. No caso das funções objetivo, os resultados de pressão foram melhores com o uso da *FOI*, produzindo erros muito próximos de zero. Quanto às vazões simuladas, não há diferença significativa entre as duas funções objetivo.

TABELA 5.38 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FOI*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,331	3,021	3,108	3,153	3,153	0,000	0,0
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,798	0,587	0,560	0,648	0,750	-0,102	-13,6
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,240	1,633	2,039	1,971	1,909	0,062	3,2
β	0,1	1,3	1,215	1,256	1,183	1,218	1,253	-0,035	-2,8

A solução final em termos das variáveis de decisão alcançada pelo AG geracional elitista foi melhor com o uso da função objetivo *FOI*, sendo que apenas um parâmetro (coeficiente de perda θ_2) apresentou um erro considerável de -13,6% com o uso desta função objetivo (Tabela 5.38). Os demais parâmetros foram considerados ajustados.

TABELA 5.39 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,274	3,138	3,121	3,178	3,153	0,025	0,8
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,818	0,865	0,893	0,859	0,750	0,109	14,5
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,401	2,376	2,206	2,328	1,909	0,419	21,9
β	0,1	1,3	1,156	1,178	1,216	1,183	1,253	-0,070	-5,6

O uso da função objetivo *FO2* com o AG geracional elitista não produziu resultados satisfatórios para os coeficientes de perda θ_1 e θ_2 , apresentando erros de 14,5% e 21,9%, respectivamente, como pode ser visto na Tabela 5.39. Apenas os parâmetros rugosidade ε e expoente de perda β foram considerados ajustados.

Os resultados alcançados com o uso do AG *Steady-State* e função objetivo *FO2* foram os melhores, se considerarmos que todos os parâmetros tiveram erros proporcionais uns aos outros (Tabela 5.41). Já o uso da função objetivo *FOI* com o AG *Steady-State* (Tabela 5.40) produziu praticamente os mesmos resultados quando

comparados com aqueles desta mesma função objetivo com o AG geracional elitista (Tabela 5.38).

TABELA 5.40 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,200	3,199	3,188	3,196	3,153	0,043	1,4
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,93	0,839	0,801	0,857	0,750	0,107	14,2
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	1,957	2,121	1,88	1,986	1,909	0,077	4,0
β	0,1	1,3	1,265	1,219	1,26	1,248	1,253	-0,005	-0,4

TABELA 5.41 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,357	3,418	3,188	3,321	3,153	0,168	5,3
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,729	0,498	0,877	0,701	0,750	-0,049	-6,5
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	1,732	1,74	1,977	1,816	1,909	-0,093	-4,9
β	0,1	1,3	1,292	1,259	1,26	1,270	1,253	0,017	1,4

A dificuldade encontrada nas simulações foi o valor máximo do expoente de perda β , fixado, como visto nas Tabelas 5.38 a 5.41, em 1,3. Com a utilização de valores maiores e/ou uma combinação de valores elevados dos parâmetros de vazamento não há convergência no algoritmo iterativo de avaliação hidráulica, mais especificamente no *loop* interno do avaliador.

5.2.4 - Calibração em termos dos diâmetros

A falta do conhecimento geométrico das redes de distribuição de água é um dos fatores limitantes não apenas da calibração, mas também de qualquer modelo construído para representá-las. Os cadastros de trocas de tubulações antigas, ligações e expansões feitas ao longo da operação destes sistemas nem sempre são atualizados. Além disso, as propriedades químicas da água podem provocar incrustações no interior dos tubos, afetando não só a rugosidade mas também a seção real do escoamento. Assim, a verificação do diâmetro de algumas tubulações pode ser feita via calibração.

Neste item apresentamos os resultados obtidos para as simulações visando a calibração em termos dos diâmetros das tubulações. A rede da Figura 4.4 possui três

tipos de diâmetros (150 mm, 250 mm e 500 mm) e foram escolhidas duas tubulações, uma com diâmetro de 150 mm (trecho 4 e zona 1, denominada D_1) e outra com diâmetro de 250 mm (trecho 10 e zona 2, denominada D_2), como parâmetros para o procedimento de calibração, adotando a mesma setorização para os parâmetros do modelo de vazamentos descrita no item 4.7. Foram considerados dois tipos de AGs (geracional elitista e *Steady-State*) e duas funções objetivo ($FO1$ – eq. (4.1) e $FO2$ – eq. (4.4)), com três simulações para cada tipo de AG e função objetivo e diferentes sementes aleatórias, descritas na Tabela 5.42.

As variáveis de decisão do problema são contínuas, para que o AG possa “detectar” possíveis casos de incrustação, embora variáveis discretas possam ser utilizadas no caso de diâmetros comerciais.

TABELA 5.42 - Dados das simulações.

AG	Simulações	População	Gerações	Semente Aleatória	
				$FO1$	$FO2$
Geracional elitista	1	30	100	1	1
	2	30	100	50	50
	3	30	100	200	200
<i>Steady-State</i>	1	30	20	50	50
	2	30	20	100	100
	3	30	20	300	300

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, para as diferentes funções objetivo e sementes aleatórias, considerando como critério de análise a evolução da função objetivo (aptidão), a comparação entre valores simulados e observados de pressões e vazões, e os valores calibrados das variáveis de decisão.

Para o AG geracional elitista, a função objetivo $FO1$ apresentou picos proporcionalmente maiores que aqueles produzidos pela $FO2$. Já para o AG *Steady-State*, o comportamento das duas funções objetivo foi praticamente o mesmo para cada tipo de AG, sendo a convergência alcançada em pouco mais de 5 gerações.

FIGURA 5.29 - Função de aptidão (geracional elitista e FO1).

FIGURA 5.30 – Função de aptidão (geracional elitista e FO2).

FIGURA 5.31 - Função de aptidão (Steady-State e FO1).

FIGURA 5.32 - Função de aptidão (Steady-State e FO2).

TABELA 5.43 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e FO1).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,14	38,14	38,15	0,00	0,01	0,01
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,59	25,60	25,60	25,60	0,01	0,00	0,00
	2	28,14	28,13	28,13	28,14	0,00	0,01	0,01
	3	31,17	31,16	31,16	31,17	0,00	0,01	0,01
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,61	28,62	28,60	0,00	0,01	0,02
3	1	12,14	12,17	12,17	12,16	0,02	0,01	0,01
	2	12,66	12,64	12,64	12,65	0,01	0,01	0,01
	3	19,39	19,37	19,37	19,38	0,01	0,01	0,01
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,96	15,01	15,02	14,98	0,02	0,03	0,04

TABELA 5.44 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO1*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,24	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,79	54,78	54,77	54,80	0,0	0,0	-0,1
	22	83,14	83,15	83,17	83,12	0,0	0,0	0,1
2	1	76,38	76,33	76,32	76,37	0,0	-0,1	-0,1
	3	75,67	75,78	75,78	75,73	-0,1	0,1	0,1
	22	115,18	115,12	115,13	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,79	103,69	103,67	103,77	0,0	-0,1	-0,1
	3	96,90	97,12	97,14	97,00	-0,1	0,1	0,1
	22	146,75	146,63	146,63	146,67	0,1	0,0	0,0

TABELA 5.45 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,16	38,13	38,14	38,15	0,01	0,02	0,01
	2	42,25	42,27	42,26	42,26	0,01	0,01	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,60	25,59	25,60	25,60	0,00	0,01	0,00
	2	28,14	28,14	28,13	28,14	0,00	0,00	0,01
	3	31,17	31,17	31,16	31,17	0,00	0,00	0,01
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,59	28,62	28,61	28,60	0,01	0,02	0,01
3	1	12,16	12,16	12,17	12,16	0,00	0,00	0,01
	2	12,65	12,65	12,64	12,65	0,00	0,00	0,01
	3	19,39	19,37	19,37	19,38	0,01	0,01	0,01
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,94	15,03	15,01	14,98	0,04	0,05	0,03

TABELA 5.46 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,27	49,22	49,25	49,25	0,0	-0,1	0,0
	3	54,83	54,72	54,78	54,80	0,1	-0,1	0,0
	22	83,08	83,23	83,15	83,12	0,0	0,1	0,0
2	1	76,41	76,30	76,33	76,37	0,1	-0,1	-0,1
	3	75,70	75,75	75,78	75,73	0,0	0,0	0,1
	22	115,12	115,18	115,12	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,85	103,61	103,69	103,77	0,1	-0,2	-0,1
	3	96,91	97,13	97,12	97,00	-0,1	0,1	0,1
	22	146,67	146,70	146,63	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.47 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FOI*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,19	41,20	0,00	0,00	0,01
2	1	25,61	25,60	25,62	25,60	0,01	0,00	0,02
	2	28,13	28,14	28,13	28,14	0,01	0,00	0,01
	3	31,16	31,17	31,16	31,17	0,01	0,00	0,01
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,61	28,60	28,62	28,60	0,01	0,00	0,02
3	1	12,18	12,16	12,20	12,16	0,02	0,00	0,04
	2	12,64	12,65	12,64	12,65	0,01	0,00	0,01
	3	19,37	19,38	19,36	19,38	0,01	0,00	0,02
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	15,00	14,96	15,01	14,98	0,02	0,02	0,03

TABELA 5.48 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FOI*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,26	49,26	49,28	49,25	0,0	0,0	0,1
	3	54,80	54,82	54,81	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,11	83,10	83,09	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,35	76,39	76,34	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,78	75,71	75,84	75,73	0,1	0,0	0,1
	22	115,10	115,13	115,05	115,14	0,0	0,0	-0,1
3	1	103,74	103,81	103,72	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,10	96,96	97,21	97,00	0,1	0,0	0,2
	22	146,60	146,67	146,52	146,67	0,0	0,0	-0,1

TABELA 5.49 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,61	25,60	25,59	25,60	0,01	0,00	0,01
	2	28,13	28,14	28,15	28,14	0,01	0,00	0,01
	3	31,16	31,17	31,17	31,17	0,01	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,61	28,60	28,59	28,60	0,01	0,00	0,01
3	1	12,18	12,16	12,13	12,16	0,02	0,00	0,03
	2	12,64	12,65	12,66	12,65	0,01	0,00	0,01
	3	19,37	19,38	19,39	19,38	0,01	0,00	0,01
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	15,00	14,96	14,95	14,98	0,02	0,02	0,03

TABELA 5.50 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,26	49,26	49,24	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,82	54,79	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,11	83,10	83,15	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,35	76,39	76,39	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,78	75,71	75,64	75,73	0,1	0,0	-0,1
	22	115,10	115,13	115,20	115,14	0,0	0,0	0,1
3	1	103,74	103,81	103,81	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,10	96,96	96,84	97,00	0,1	0,0	-0,2
	22	146,60	146,67	146,79	146,67	0,0	0,0	0,1

Para os dois tipos de AGs e duas funções objetivo, não há uma diferença significativa quanto à comparação entre os valores simulados e observados, sendo os erros muito próximos de zero.

TABELA 5.51 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
D1 (mm)	50,0	300,0	146,0	155,5	156,8	152,8	150,0	2,8	1,8
D2 (mm)	50,0	300,0	252,1	254,2	256,9	254,4	250,0	4,4	1,8

TABELA 5.52 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
D1 (mm)	50,0	300,0	146,0	156,8	155,5	152,8	150,0	2,8	1,8
D2 (mm)	50,0	300,0	243,6	266,8	254,2	254,9	250,0	4,9	1,9

TABELA 5.53 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
D1 (mm)	50,0	300,0	154,3	148,1	158,8	153,7	150,0	3,7	2,5
D2 (mm)	50,0	300,0	249,1	247,0	246,7	247,6	250,0	-2,4	-1,0

TABELA 5.54 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
D1 (mm)	50,0	300,0	154,3	148,1	143,6	148,7	150,0	-1,3	-0,9
D2 (mm)	50,0	300,0	249,1	247,0	252,5	249,5	250,0	-0,5	-0,2

A solução final em termos das variáveis de decisão alcançada pelo AG geracional elitista foi a mesma para as duas funções objetivo. A solução encontrada pelo AG *Steady-State* também foi satisfatória, pois apresentou erros próximos de

zero, com uma pequena vantagem para a função objetivo *FO2*. Para todos os casos, os parâmetros foram considerados ajustados.

É válido ressaltar a faixa de variação dos valores das variáveis de decisão (50 mm a 300 mm) permitida para este caso, cujo valor mínimo é crítico na avaliação hidráulica, pois quanto menor o valor do diâmetro da tubulação, maior é a perda de carga no trecho. Esta perda de carga pode ser tão elevada que acarreta uma pressão negativa no nó a jusante do trecho.

5.2.5 - Calibração em termos das cotas topográficas

Também como parte do conhecimento geométrico de uma rede de distribuição de água, as cotas topográficas podem ser desconhecidas para determinados nós do sistema. As cotas topográficas apresentam reflexões diretas sobre as pressões e, portanto, são decisivas na determinação dos vazamentos.

Neste item apresentamos os resultados obtidos para as simulações visando a calibração em termos das cotas topográficas dos nós. Foram escolhidos dois nós, um com cota de 20 m (nó 10, denominado *Cota₁₀*) e outro com cota de 27 m (nó 12, denominado *Cota₁₂*), como parâmetros para o procedimento de calibração, adotando a mesma setorização descrita no item 4.7. Foram considerados dois tipos de AGs (geracional elitista e *Steady-State*) e duas funções objetivo (*FO1* – eq. (4.1) e *FO2* – eq. (4.4)), com três simulações para cada tipo de AG e função objetivo, a partir de diferentes sementes aleatórias, descritas na Tabela 5.55.

TABELA 5.55 - Dados das simulações.

AG	Simulações	População	Gerações	Semente Aleatória	
				<i>FO1</i>	<i>FO2</i>
Geracional elitista	1	30	80	50	1
	2	30	80	200	50
	3	30	80	300	300
<i>Steady-State</i>	1	30	20	1	1
	2	30	20	50	50
	3	30	20	200	300

Os resultados obtidos são apresentados a seguir, para as diferentes funções objetivo e sementes aleatórias, considerando como critério de análise a evolução da função objetivo (aptidão), a comparação entre valores simulados e observados de pressões e vazões, e os valores calibrados das variáveis de decisão.

Novamente, para o AG geracional elitista, a função objetivo *FO1* apresentou picos proporcionalmente maiores que aqueles produzidos pela *FO2*. Já para o AG *Steady-State*, o comportamento das duas funções objetivo foi praticamente o mesmo para cada tipo de função objetivo, sendo a convergência alcançada, mais uma vez, em pouco mais de 5 gerações.

FIGURA 5.33 - Função de aptidão (geracional elitista e *FO1*).

FIGURA 5.34 - Função de aptidão (geracional elitista e *FO2*).

FIGURA 5.35 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO1*).

FIGURA 5.36 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO2*).

TABELA 5.56 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FOI*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,25	42,25	42,26	42,26	0,01	0,01	0,00
	3	42,30	42,31	42,31	42,31	0,01	0,00	0,00
	6	36,83	36,82	36,83	36,83	0,00	0,01	0,00
	11	41,20	41,21	41,20	41,20	0,00	0,01	0,00
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,13	28,14	28,14	28,14	0,01	0,00	0,00
	3	31,16	31,17	31,17	31,17	0,01	0,00	0,00
	6	25,55	25,54	25,55	25,55	0,00	0,01	0,00
	11	28,60	28,61	28,61	28,60	0,00	0,01	0,01
3	1	12,16	12,16	12,17	12,16	0,00	0,00	0,01
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,72	13,73	13,73	0,00	0,01	0,00
	11	14,97	14,98	14,98	14,98	0,01	0,00	0,00

TABELA 5.57 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FOI*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,24	49,15	49,21	49,25	0,0	-0,2	-0,1
	3	54,83	54,81	54,77	54,80	0,1	0,0	-0,1
	22	83,11	83,21	83,20	83,12	0,0	0,1	0,1
2	1	76,38	76,31	76,32	76,37	0,0	-0,1	-0,1
	3	75,72	75,66	75,70	75,73	0,0	-0,1	0,0
	22	115,13	115,25	115,21	115,14	0,0	0,1	0,1
3	1	103,78	103,73	103,73	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	96,99	96,92	96,97	97,00	0,0	-0,1	0,0
	22	146,66	146,77	146,74	146,67	0,0	0,1	0,0

TABELA 5.58 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,25	42,25	42,26	42,26	0,01	0,01	0,00
	3	42,30	42,30	42,31	42,31	0,01	0,01	0,00
	6	36,82	36,83	36,83	36,83	0,01	0,00	0,00
	11	41,21	41,20	41,20	41,20	0,01	0,00	0,00
2	1	25,59	25,60	25,60	25,60	0,01	0,00	0,00
	2	28,13	28,13	28,14	28,14	0,01	0,01	0,00
	3	31,16	31,16	31,17	31,17	0,01	0,01	0,00
	6	25,54	25,54	25,55	25,55	0,01	0,01	0,00
	11	28,61	28,60	28,61	28,60	0,01	0,00	0,01
3	1	12,15	12,16	12,16	12,16	0,01	0,00	0,00
	2	12,64	12,65	12,65	12,65	0,01	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,72	13,73	13,73	13,73	0,01	0,00	0,00
	11	14,97	14,97	14,98	14,98	0,01	0,01	0,00

TABELA 5.59 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e FO2).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,20	49,23	49,20	49,25	-0,1	0,0	-0,1
	3	54,85	54,84	54,79	54,80	0,1	0,1	0,0
	22	83,13	83,11	83,19	83,12	0,0	0,0	0,1
2	1	76,36	76,37	76,33	76,37	0,0	0,0	-0,1
	3	75,69	75,71	75,69	75,73	-0,1	0,0	-0,1
	22	115,18	115,14	115,21	115,14	0,0	0,0	0,1
3	1	103,78	103,78	103,74	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	96,95	96,98	96,96	97,00	-0,1	0,0	0,0
	22	146,70	146,67	146,74	146,67	0,0	0,0	0,0

Para o AG geracional elitista, não houve uma diferença significativa quanto à função objetivo, na comparação entre os valores simulados e observados, com erros muito próximos de zero.

TABELA 5.60 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (Steady-State e FO1).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,25	42,25	42,27	42,26	0,01	0,01	0,01
	3	42,30	42,31	42,31	42,31	0,01	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,19	41,20	0,00	0,00	0,01
2	1	25,60	25,60	25,61	25,60	0,00	0,00	0,01
	2	28,13	28,13	28,15	28,14	0,01	0,01	0,01
	3	31,16	31,16	31,17	31,17	0,01	0,01	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,61	28,60	0,00	0,00	0,01
3	1	12,16	12,16	12,17	12,16	0,00	0,00	0,01
	2	12,64	12,65	12,66	12,65	0,01	0,00	0,01
	3	19,37	19,38	19,38	19,38	0,01	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,74	13,73	0,00	0,00	0,01
	11	14,97	14,97	14,98	14,98	0,01	0,01	0,00

TABELA 5.61 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (Steady-State e FO1).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,28	49,26	49,23	49,25	0,1	0,0	0,0
	3	54,85	54,83	54,73	54,80	0,1	0,1	-0,1
	22	83,05	83,09	83,22	83,12	-0,1	0,0	0,1
2	1	76,41	76,39	76,32	76,37	0,1	0,0	-0,1
	3	75,75	75,73	75,70	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,07	115,11	115,21	115,14	-0,1	0,0	0,1
3	1	103,81	103,79	103,72	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,01	97,00	96,97	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,61	146,64	146,72	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.62 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,14	38,15	0,00	0,00	0,01
	2	42,26	42,25	42,26	42,26	0,00	0,01	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,18	41,20	0,00	0,00	0,02
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,14	28,13	28,13	28,14	0,00	0,01	0,01
	3	31,17	31,16	31,16	31,17	0,00	0,01	0,01
	6	25,55	25,55	25,56	25,55	0,00	0,00	0,01
	11	28,61	28,60	28,60	28,60	0,01	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,37	19,38	0,00	0,00	0,01
	6	13,73	13,73	13,74	13,73	0,00	0,00	0,01
	11	14,98	14,97	14,97	14,98	0,00	0,01	0,01

TABELA 5.63 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,22	49,26	49,36	49,25	-0,1	0,0	0,2
	3	54,81	54,83	54,79	54,80	0,0	0,1	0,0
	22	83,15	83,09	83,04	83,12	0,0	0,0	-0,1
2	1	76,35	76,39	76,43	76,37	0,0	0,0	0,1
	3	75,71	75,73	75,78	75,73	0,0	0,0	0,1
	22	115,17	115,11	115,02	115,14	0,0	0,0	-0,1
3	1	103,76	103,79	103,81	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	96,98	97,00	97,06	97,00	0,0	0,0	0,1
	22	146,70	146,64	146,57	146,67	0,0	0,0	-0,1

Também não há uma diferença significativa entre as duas funções objetivo no AG *Steady-State*, com os valores simulados muito próximos dos valores observados.

TABELA 5.64 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
Cota ₁₀ (m)	1,0	38,0	22,3	24,8	20,1	22,4	20,0	2,4	12,0
Cota ₁₂ (m)	1,0	38,0	27,5	26,8	26,3	26,9	27,0	-0,1	-0,5

TABELA 5.65 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
Cota ₁₀ (m)	1,0	38,0	25,5	22,8	21,7	23,3	20,0	3,3	16,7
Cota ₁₂ (m)	1,0	38,0	27,7	27,5	26,6	27,3	27,0	0,3	1,0

TABELA 5.66 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO1*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
Cota ₁₀ (m)	1,0	38,0	21,4	21,0	18,1	20,2	20,0	0,2	0,8
Cota ₁₂ (m)	1,0	38,0	27,9	27,5	25,9	27,1	27,0	0,1	0,4

TABELA 5.67 - Valores calibrados e reais (*Steady-State* e *FO2*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
Cota ₁₀ (m)	1,0	38,0	21,4	21,0	17,1	19,8	20,0	-0,2	-0,8
Cota ₁₂ (m)	1,0	38,0	26,9	27,5	27,6	27,3	27,0	0,3	1,2

Quanto à solução final em termos das variáveis de decisão, o melhor resultado foi alcançado pelo AG *Steady-State*, com erro médio próximo de zero para as duas variáveis de decisão, com pequena preferência para a função objetivo *FO1*. Já a solução encontrada pelo AG geracional elitista apresentou erros próximos de zero para a variável *Cota₁₂*, mas a variável *Cota₁₀* não conseguiu valores satisfatórios e apresentou erros maiores.

Evidencia-se a faixa de variação dos valores das variáveis de decisão (1,0 m a 38,0 m) permitida para este caso, cujo valor máximo é crítico na avaliação hidráulica, podendo haver pressão negativa no nó de avaliação se o valor da cota deste nó for maior que a carga hidráulica do nó de montante subtraída da perda de carga no trecho.

5.2.6 - Calibração em termos das rugosidades absolutas, parâmetros do modelo pressão x vazamento, diâmetros e cotas topográficas

Com o objetivo de estudar a capacidade do algoritmo de calibração no tratamento de parâmetros de naturezas distintas, consideramos neste item a calibração em termos das rugosidades absolutas, parâmetros do modelo pressão x vazamento (coeficiente θ e expoente β), diâmetros e cotas topográficas, para a rede da Figura 4.4. Para o caso da calibração em termos dos diâmetros, foi escolhida apenas uma tubulação (diâmetro de 250 mm, trecho 10, zona 2, denominada *D₂*) e, no caso do ajuste em termos das cotas topográficas, um nó (cota de 20 m, nó 10, denominado *Cota₁₀*).

A investigação de diferentes tipos de parâmetros na calibração pode ser útil na tentativa de estabelecer valores iniciais dos parâmetros desconhecidos para a calibração do modelo. Em uma rede real, dificilmente os valores ajustados refletem a natureza física, e, assim, a consideração de diversas variáveis de decisão de diferentes naturezas pode ser considerada um passo muito grande na tentativa de se ter uma maior precisão da calibração do modelo. Embora os AGs sejam muito eficientes neste tipo de problema, ele é de natureza indeterminada.

Os resultados são apresentados a seguir, em que foram considerados dois tipos de AGs (geracional elitista e *Steady-State*) e duas funções objetivo (*FO1* – eq. (4.1) e *FO2* – eq. (4.4)). São realizadas três simulações para cada tipo de AG e função objetivo a partir de diferentes sementes aleatórias, descritas na Tabela 5.68.

TABELA 5.68 - Dados das simulações.

AG	Simulações	População	Gerações	Semente Aleatória	
				<i>FO1</i>	<i>FO2</i>
Geracional elitista	1	100	500	1000	1000
	2	100	500	2000	1500
	3	100	500	3000	2000
<i>Steady-State</i>	1	100	50	1	1
	2	100	50	1500	1500
	3	100	50	2000	2000

FIGURA 5.37 - Função de aptidão (geracional elitista e *FO1*).

FIGURA 5.38 – Função de aptidão (geracional elitista e *FO2*).

FIGURA 5.39 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO1*).

FIGURA 5.40 - Função de aptidão (*Steady-State* e *FO2*).

TABELA 5.69 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO1*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,17	37,51	38,27	38,15	0,02	0,64	0,12
	2	42,27	40,95	42,32	42,26	0,01	1,31	0,06
	3	42,30	41,92	42,32	42,31	0,01	0,39	0,01
	6	36,86	36,75	36,85	36,83	0,03	0,08	0,02
	11	41,14	40,42	41,15	41,20	0,06	0,78	0,05
2	1	25,68	24,93	25,73	25,60	0,08	0,67	0,13
	2	28,20	26,75	28,13	28,14	0,06	1,39	0,01
	3	31,17	30,80	31,15	31,17	0,00	0,37	0,02
	6	25,59	25,45	25,56	25,55	0,04	0,10	0,01
	11	28,60	27,75	28,51	28,60	0,00	0,85	0,09
3	1	12,28	11,85	12,29	12,16	0,12	0,31	0,13
	2	12,74	11,99	12,55	12,65	0,09	0,66	0,10
	3	19,41	19,07	19,31	19,38	0,03	0,31	0,07
	6	13,80	13,63	13,73	13,73	0,07	0,10	0,00
	11	14,99	14,27	14,73	14,98	0,01	0,71	0,25

TABELA 5.70 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO1*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	50,14	57,25	49,89	49,25	1,8	16,2	1,3
	3	54,57	50,56	55,21	54,80	-0,4	-7,7	0,7
	22	82,47	79,21	82,10	83,12	-0,8	-4,7	-1,2
2	1	76,76	81,87	76,90	76,37	0,5	7,2	0,7
	3	75,79	72,23	76,26	75,73	0,1	-4,6	0,7
	22	114,69	113,12	114,08	115,14	-0,4	-1,8	-0,9
3	1	103,92	107,27	104,55	103,77	0,1	3,4	0,8
	3	97,19	94,95	97,46	97,00	0,2	-2,1	0,5
	22	146,31	145,18	145,40	146,67	-0,2	-1,0	-0,9

O comportamento das duas funções objetivo (*FO1* e *FO2*) foi praticamente o mesmo para cada tipo de AG, sendo que no *Steady-State* a convergência é alcançada em pouco menos de 20 gerações.

TABELA 5.71 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,22	38,09	38,12	38,15	0,07	0,06	0,03
	2	42,22	41,95	42,26	42,26	0,04	0,31	0,00
	3	42,29	42,27	42,31	42,31	0,02	0,04	0,00
	6	36,85	36,67	36,84	36,83	0,02	0,16	0,01
	11	41,10	41,18	41,16	41,20	0,10	0,02	0,04
2	1	25,68	25,50	25,57	25,60	0,08	0,10	0,03
	2	28,04	27,69	28,13	28,14	0,10	0,45	0,01
	3	31,12	31,11	31,17	31,17	0,05	0,06	0,00
	6	25,57	25,37	25,56	25,55	0,02	0,18	0,01
	11	28,48	28,45	28,59	28,60	0,12	0,15	0,01
3	1	12,29	12,08	12,13	12,16	0,13	0,08	0,03
	2	12,55	12,28	12,64	12,65	0,10	0,37	0,01
	3	19,32	19,24	19,37	19,38	0,06	0,14	0,01
	6	13,75	13,56	13,74	13,73	0,02	0,17	0,01
	11	14,74	14,59	14,98	14,98	0,24	0,39	0,00

TABELA 5.72 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (geracional elitista e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	50,51	47,10	49,23	49,25	2,6	-4,4	0,0
	3	54,86	55,54	54,69	54,80	0,1	1,4	-0,2
	22	81,82	84,56	83,26	83,12	-1,6	1,7	0,2
2	1	77,35	75,14	76,27	76,37	1,3	-1,6	-0,1
	3	75,90	76,15	75,80	75,73	0,2	0,6	0,1
	22	113,97	115,95	115,15	115,14	-1,0	0,7	0,0
3	1	104,82	103,77	103,63	103,77	1,0	0,0	-0,1
	3	97,16	97,33	97,13	97,00	0,2	0,3	0,1
	22	145,43	146,32	146,66	146,67	-0,8	-0,2	0,0

Para o AG geracional elitista, a função objetivo *FO2* apresentou resultados melhores quanto à comparação entre os valores simulados e observados de pressão e vazão.

Como exemplo, o maior erro apresentado pela função objetivo *FO1* para as pressões foi de 1,39 m.c.a. para o nó 2, padrão de consumo 2 e simulação 2 (Tabela 5.69), enquanto que o maior erro apresentado quando utilizada a função objetivo *FO2* foi de 0,45 m.c.a. para o mesmo nó e padrão de consumo (Tabela 5.71). Os dois casos estão dentro dos limites admitidos para a análise da calibração (item 4.8).

No caso das vazões, o maior erro relativo quando a função objetivo *FOI* é utilizada foi de 16,2% no trecho 1, padrão de consumo 1 na simulação 2 (Tabela 5.70), estando fora dos limites aceitáveis para a calibração (item 4.8). No entanto, quando utilizada a função objetivo *FO2*, o erro máximo diminui para 4,4% (Tabela 5.72).

Não há uma diferença significativa entre as duas funções objetivo no AG *Steady-State*, com os valores simulados sendo muito próximos dos valores observados. Há, apenas, uma ligeira vantagem para o uso da função objetivo *FOI*, quando comparamos os valores apresentados nas Tabelas 5.73 a 5.76.

TABELA 5.73 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FOI*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,11	38,10	38,18	38,15	0,04	0,05	0,03
	2	42,18	42,22	42,36	42,26	0,08	0,04	0,10
	3	42,29	42,30	42,32	42,31	0,02	0,01	0,01
	6	36,82	36,83	36,84	36,83	0,01	0,00	0,01
	11	41,17	41,15	41,24	41,20	0,03	0,05	0,04
2	1	25,57	25,55	25,61	25,60	0,03	0,05	0,01
	2	28,09	28,10	28,23	28,14	0,05	0,04	0,09
	3	31,16	31,16	31,18	31,17	0,01	0,01	0,01
	6	25,53	25,55	25,55	25,55	0,02	0,00	0,00
	11	28,58	28,58	28,63	28,60	0,02	0,02	0,03
3	1	12,15	12,12	12,14	12,16	0,01	0,04	0,02
	2	12,64	12,64	12,66	12,65	0,01	0,01	0,01
	3	19,38	19,37	19,37	19,38	0,00	0,01	0,01
	6	13,72	13,75	13,71	13,73	0,01	0,02	0,02
	11	14,97	14,99	14,98	14,98	0,01	0,01	0,00

TABELA 5.74 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FOI*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,56	49,29	49,19	49,25	0,6	0,1	-0,1
	3	54,56	54,62	54,84	54,80	-0,4	-0,3	0,1
	22	83,04	83,26	83,16	83,12	-0,1	0,2	0,0
2	1	76,39	76,33	76,28	76,37	0,0	-0,1	-0,1
	3	75,53	75,69	75,74	75,73	-0,3	-0,1	0,0
	22	115,30	115,20	115,21	115,14	0,1	0,1	0,1
3	1	103,62	103,65	103,65	103,77	-0,1	-0,1	-0,1
	3	96,96	97,04	97,01	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,87	146,73	146,76	146,67	0,1	0,0	0,1

TABELA 5.75 - Comparação entre valores de pressão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,00	38,18	38,18	38,15	0,15	0,03	0,03
	2	42,00	42,28	42,17	42,26	0,26	0,02	0,09
	3	42,24	42,30	42,29	42,31	0,07	0,01	0,02
	6	36,74	36,83	36,84	36,83	0,09	0,00	0,01
	11	41,06	41,22	41,21	41,20	0,14	0,02	0,01
2	1	25,30	25,64	25,79	25,60	0,30	0,04	0,19
	2	27,64	28,19	28,28	28,14	0,50	0,05	0,14
	3	31,05	31,18	31,22	31,17	0,12	0,01	0,05
	6	25,38	25,55	25,63	25,55	0,17	0,00	0,08
	11	28,31	28,63	28,74	28,60	0,29	0,03	0,14
3	1	11,74	12,21	12,56	12,16	0,42	0,05	0,40
	2	12,11	12,69	13,04	12,65	0,54	0,04	0,39
	3	19,11	19,40	19,59	19,38	0,27	0,02	0,21
	6	13,45	13,73	13,94	13,73	0,28	0,00	0,21
	11	14,51	14,99	15,27	14,98	0,47	0,01	0,29

TABELA 5.76 - Comparação entre valores de vazão simulados e observados (*Steady-State* e *FO2*).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,49	49,43	49,61	49,25	0,5	0,4	0,7
	3	54,59	54,76	54,60	54,80	-0,4	-0,1	-0,4
	22	83,09	82,99	82,98	83,12	0,0	-0,2	-0,2
2	1	76,37	76,41	76,57	76,37	0,0	0,1	0,3
	3	75,55	75,63	75,47	75,73	-0,2	-0,1	-0,3
	22	115,31	115,19	115,21	115,14	0,1	0,0	0,1
3	1	103,82	103,75	103,84	103,77	0,0	0,0	0,1
	3	97,18	96,93	96,71	97,00	0,2	-0,1	-0,3
	22	146,41	146,77	146,88	146,67	-0,2	0,1	0,1

Quanto ao tipo de AG, o que apresentou melhores resultados nas comparações entre valores simulados e observados de pressão e vazão foi o *Steady-State*, apresentando erros menores do que os erros obtidos nas simulações feitas com o AG geracional elitista.

TABELA 5.77 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e *FOI*).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,119	3,160	3,293	3,191	3,153	0,038	1,2
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,303	0,806	0,932	1,014	0,750	0,264	35,2
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,855	2,008	1,950	2,271	1,909	0,362	19,0
β	0,1	1,3	1,136	1,239	1,271	1,215	1,253	-0,038	-3,0
D ₂ (mm)	200,0	300,0	229,80	265,70	278,00	257,83	250,00	7,83	3,1
Cota ₁₀ (m)	10,0	30,0	34,70	15,40	13,00	21,03	20,00	1,03	5,2

TABELA 5.78 - Valores calibrados e reais (geracional elitista e FO2).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,201	3,412	3,170	3,261	3,153	0,108	3,4
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,735	0,653	0,740	0,709	0,750	-0,041	-5,4
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	1,594	1,915	2,008	1,839	1,909	-0,070	-3,7
β	0,1	1,3	1,297	1,242	1,239	1,259	1,253	0,006	0,5
D2 (mm)	200,0	300,0	278,4	269,2	265,7	271,1	250,0	21,1	8,4
Cota10 (m)	10,0	30,0	28,5	13,0	10,0	17,2	20,0	-2,8	-14,2

TABELA 5.79 - Valores calibrados e reais (Steady-State e FO1).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,182	3,146	3,232	3,187	3,153	0,034	1,1
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,091	0,653	1,085	0,943	0,750	0,193	25,7
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,821	1,915	2,236	2,324	1,909	0,415	21,7
β	0,1	1,3	1,130	1,242	1,230	1,201	1,253	-0,052	-4,2
D2 (mm)	200,0	300,0	249,8	269,2	257,4	258,8	250,0	8,8	3,5
Cota10 (m)	10,0	30,0	23,2	10,0	29,6	20,9	20,0	0,9	4,7

TABELA 5.80 - Valores calibrados e reais (Steady-State e FO2).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,770	3,146	2,663	3,193	3,153	0,040	1,3
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,049	1,077	0,504	0,877	0,750	0,127	16,9
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,821	2,428	2,180	2,476	1,909	0,567	29,7
β	0,1	1,3	1,130	1,189	1,168	1,162	1,253	-0,091	-7,2
D2 (mm)	200,0	300,0	249,8	238,8	216,6	235,1	250,0	-14,9	-6,0
Cota10 (m)	10,0	30,0	22,3	30,3	15,8	22,8	20,0	2,8	14,0

Quanto à solução final em termos das variáveis de decisão, o melhor resultado alcançado nas simulações empregando o AG geracional elitista foi aquele que utilizou a função objetivo FO2. Neste caso, apenas a cota topográfica do nó 10 apresentou erro consideravelmente elevado (14,2%), com os outros parâmetros sendo considerados calibrados. No entanto, com o uso da função objetivo FO1, os coeficientes de perda θ_1 e θ_2 não apresentaram resultados satisfatórios, com erros de 35,2% e 19,0%, respectivamente.

Se na comparação entre valores simulados e observados de pressão e vazão o melhor tipo de AG foi o Steady-State, o mesmo não se pode dizer quando analisamos a solução final, mostrada nas Tabelas 5.79 e 5.80. Os coeficientes de perda θ_1 e θ_2 não apresentaram resultados tão satisfatórios quando utilizamos a função objetivo FO1 quanto no caso em que é utilizada a função objetivo FO2. A cota topográfica no nó 10 também não atingiu resultado satisfatório com o uso da função objetivo FO2.

Uma dificuldade encontrada nas simulações foi quanto aos limites máximos dos valores das variáveis de decisão, que para diversas combinações dos valores não resultava em convergência no modelo hidráulico. Especial atenção foi dada aos valores máximos dos parâmetros de vazamento.

5.3 – Modelo Híbrido na Calibração

Como foi comentado no capítulo 3, os AGs possuem inúmeras vantagens, mas a grande desvantagem é o elevado tempo computacional consumido quando comparado com outras técnicas de busca (Newton-Raphson, Levenberg-Marquardt e outras) e, também, a falta de refinamento das soluções. Assim, a combinação dos AGs com um método de busca local convencional pode ser vantajosa, pois alia a capacidade dos AGs em “varrer” o espaço de busca de maneira eficiente, fornecendo uma solução inicial próxima do ótimo, com a rapidez do método de busca local, no caso o método Simplex.

Portanto, neste item, apresentamos os resultados obtidos com a aplicação do fluxograma da Figura 4.3 para a calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos, além das demandas de referência nos nós, ainda não abordada.

Adotamos nas simulações apenas o AG geracional elitista, pois a principal vantagem dos AGs no método híbrido é a “varredura” do espaço de busca, feita de maneira mais eficiente neste tipo, pois, além de aplicar os operadores genéticos em maior número de soluções, preserva as melhores soluções através do elitismo.

A função objetivo adotada é a *FO1* que, além de apresentar desvios adimensionais, não produziu valores finais muito diferentes daqueles da *FO2*.

5.3.1 - Calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento

Uma das dificuldades quando aplicamos o método híbrido foi adotar o número de iterações para os AGs. Portanto, uma análise do número de gerações, antes que o

método Simplex seja utilizado, é realizada. Adotamos os valores de 1, 5, 10, 30 e 50 gerações e avaliamos os resultados obtidos nas simulações visando a calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos (coeficiente θ e expoente β), para a rede da Figura 4.4. Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de 10 gerações no AG, tanto na comparação entre valores simulados e observados de pressão e vazão quanto na solução final das variáveis de decisão.

Para o método Simplex, adotamos uma tolerância de 10^{-6} como critério de convergência para a equação (3.13). Já os dados do AG são apresentados na Tabela 5.81, sendo os valores das sementes aleatórias os mesmos utilizados na calibração com os AGs somente (item 5.2.3).

TABELA 5.81 – Dados do AG nas simulações.

AG	Simulações	População	Semente Aleatória
Geracional elitista	1	100	800
	2	100	3200
	3	100	5600

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para o uso de 10 gerações nas Tabelas 5.82 a 5.84. Os demais resultados são mostrados no Apêndice A.

TABELA 5.82 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (10 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,26	49,21	49,21	49,25	0,0	-0,1	-0,1
	3	54,77	54,83	54,82	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,14	83,15	83,14	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,31	76,33	76,35	76,37	-0,1	-0,1	0,0
	3	75,74	75,76	75,75	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,19	115,13	115,13	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,69	103,75	103,77	103,77	-0,1	0,0	0,0
	3	97,04	97,03	97,01	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,69	146,66	146,66	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.83 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (10 gerações).

Padrão de Consumo	Nº	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,16	38,15	38,15	0,00	0,01	0,00
	2	42,26	42,28	42,27	42,26	0,00	0,02	0,01
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,19	41,20	41,20	41,20	0,01	0,00	0,00
2	1	25,60	25,61	25,60	25,60	0,00	0,01	0,00
	2	28,14	28,15	28,14	28,14	0,00	0,01	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,61	28,61	28,60	0,00	0,01	0,01
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,97	14,98	14,98	14,98	0,01	0,00	0,00

TABELA 5.84 – Valores calibrados e reais (10 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,175	3,158	3,152	3,162	3,153	0,009	0,3
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,869	0,769	0,737	0,792	0,750	0,042	5,6
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,190	1,917	1,872	1,993	1,909	0,084	4,4
β	0,1	1,3	1,216	1,256	1,260	1,244	1,253	-0,009	-0,7

O número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex e o valor final da função objetivo são mostrados na Tabela 5.85.

TABELA 5.85 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (10 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	78	1221	1,82E-06
2	59	764	2,46E-06
3	66	659	9,77E-07

Nota-se, na Tabela 5.85, que o número de avaliações da função objetivo é elevado devido às restrições impostas quanto aos valores máximo e mínimo das variáveis de decisão.

A proposição do modelo híbrido foi vantajosa, pois além da melhor precisão atingida da função objetivo e dos valores finais das variáveis de decisão, poupamos esforço computacional. Quando utilizamos apenas os AGs como ferramenta de busca, o tempo computacional médio para o AG geracional elitista era cerca de 12

minutos e para o AG *Steady-State* de 60 segundos. A utilização do modelo híbrido (AG geracional elitista e método Simplex) consumiu, em média, 40 segundos, no caso de 10 gerações. Para o caso de 50 gerações, este tempo sobe para cerca de 100 segundos, em média.

5.3.2 - Calibração em termos das demandas

A estimativa dos valores das demandas nos nós é, historicamente, um dos passos mais difíceis da calibração (ORMSBEE & LINGIREDDY, 1997). Baseada geralmente na distribuição demográfica da população, essa estimativa pode não representar o consumo médio real de um nó ou de um setor. Assim, de posse da vazão total abastecida na rede ou setor da rede, pode ser desejável estimar a distribuição espacial do consumo total, através do processo de calibração.

No entanto, quando se altera a demanda de um nó, os demais nós devem sofrer uma adequação para somar a vazão de referência total. Esta adequação resultará em uma nova distribuição espacial da vazão total de referência.

Como exemplo, suponhamos que temos o sistema da Figura 5.41. Com uma vazão total de referência TS^* e a demanda de referência (baseada na média mensal) conhecida para os nós 1, 2 e 3, precisamos determinar a demanda de referência D' no nó 4 através do processo da calibração. Assim, a cada valor avaliado pelo AG para D' , a distribuição espacial é alterada através de um fator multiplicador FE para cada nó i , dado pela seguinte equação:

$$FE_i = \left(\frac{TS^* - D'}{TS^* - d_i^*} \right) \quad (5.1)$$

onde d_i^* é a demanda de referência do nó i .

FIGURA 5.41 – Sistema exemplo para a determinação da demanda.

Um cuidado que devemos tomar quando precisamos determinar a demanda para alguns nós, é a consideração de consumidores especiais, como indústrias, escolas e outros do tipo, pois estes possuem um padrão de demanda diferenciado. Neste caso, o consumo deste consumidor especial deve ser subtraído da vazão total abastecida.

Nas simulações realizadas, a rede da Figura 4.4 não possui consumidores especiais e, a seguir, apresentamos os resultados obtidos visando a calibração em termos das demandas. A rede possui 5 nós com demandas e foram escolhidos 2 nós para as simulações, sejam eles nó 6, denominado DEM_6 , e nó 11, denominado DEM_{11} , cujo valor total da vazão de referência TS^* é de 180 l/s e o fator de distribuição espacial para cada nó é 0,20 (36 l/s para cada nó).

Neste caso, também fizemos um estudo do número de iterações de AG, adotando-se 1, 5, 10 e 20 gerações.

Para o método Simplex, adotamos uma tolerância de 10^{-10} como critério de convergência para a equação (3.13), que foi diminuída devido o menor número de variáveis de decisão e, também, por se tratarem de mesma natureza. Já os dados do AG são apresentados na Tabela 5.86.

TABELA 5.86 – Dados do AG nas simulações.

AG	Simulações	População	Semente Aleatória
Geracional elitista	1	30	200
	2	30	400
	3	30	600

A adoção de uma população menor nesse caso é devida ao menor número de variáveis de decisão do problema.

Os melhores resultados foram obtidos com a utilização de 5 gerações no AG, tanto na comparação entre valores simulados e observados de pressão e vazão quanto na solução final das variáveis de decisão. A seguir, são apresentados os resultados obtidos para o uso de 5 gerações nas Tabelas 5.87 a 5.89. Os demais resultados são mostrados no Apêndice B.

TABELA 5.87 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (5 gerações).

Padrão de Consumo	Nº	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,14	28,14	28,14	28,14	0,00	0,00	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,98	14,98	14,98	14,98	0,00	0,00	0,00

TABELA 5.88 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (5 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,25	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,37	76,37	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,73	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,14	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,77	103,77	103,77	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,00	97,00	97,00	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,67	146,67	146,67	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.89 – Valores calibrados e reais (5 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
DEM 6 (l/s)	20,00	50,00	35,55	33,37	42,31	37,08	36,00	1,08	3,0
DEM 11 (l/s)	20,00	50,00	36,32	38,52	38,55	37,80	36,00	1,80	5,0

O número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex e o valor final da função objetivo são mostrados na Tabela 5.90.

TABELA 5.90 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (5 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	57	451	5,30E-09
2	123	1055	4,86E-09
3	63	693	6,02E-09

Os resultados indicam que praticamente não houve diferença entre os valores simulados e observados de pressão e vazão.

A utilização do modelo híbrido para a calibração em termos das demandas consumiu, em média, 14 segundos, no caso de 5 gerações. Para o caso de 20 gerações, este tempo sobe para cerca de 20 segundos, em média.

5.4 – Utilização de Pesos na Função Objetivo

As imprecisões nos dados das variáveis de estado coletados em campo e a localização dos pontos de coleta desses dados podem originar erros no processo de calibração. Uma forma de incluir as imprecisões causadas no modelo por esses erros é a aplicação de pesos na função objetivo.

No presente trabalho, a adoção de pesos é feita na base da tentativa, adotando-se pesos fixos para cada conjunto de medidas de tipos diferentes, ou seja, um peso para o conjunto de medidas de pressão e outro peso para o conjunto de medidas de vazão, sendo o somatório deles igual a 1.

Para elucidação da aplicação de pesos, adotamos o caso da calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo de vazamentos, na mesma forma do item 5.3.1.

Foram utilizados os mesmos parâmetros da Tabela 5.81 e 10 gerações para o AG para cada conjunto de pesos adotados, já que, neste caso, também utilizamos o modelo híbrido.

Os pesos foram adotados de acordo com a Tabela 5.91 e utilizada a função objetivo *FOI* (equação 4.1).

Os desvios apresentados entre os valores simulados e observados de pressão e vazão para cada conjunto de pesos são mostrados na Figura 5.42, onde observamos que os menores desvios são decorrentes da utilização de $w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$. Portanto, os melhores resultados foram obtidos com a utilização deste conjunto de pesos, e são mostrados nas Tabelas 5.92 a 5.94. Os demais resultados com outras combinações de pesos são mostrados no Apêndice C.

TABELA 5.91 – Pesos adotados para cada conjunto de medidas.

w^Q	w^P
0,1	0,9
0,2	0,8
0,3	0,7
0,4	0,6
0,6	0,4
0,7	0,3
0,8	0,2
0,9	0,1

Obs.: $w^P = 1,0 - w^Q$

FIGURA 5.42 – Desvios apresentados entre valores simulados e observados de pressão e vazão para cada conjunto de pesos.

Os valores finais das variáveis de decisão alcançadas pela utilização de pesos na função objetivo foram melhores do que aqueles valores resultantes da utilização do método híbrido sem pesos (Tabela 5.84) e aqueles resultantes da aplicação dos AGs apenas (Tabelas 5.38 a 5.41).

TABELA 5.92 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,14	38,15	38,15	0,00	0,01	0,00
	2	42,24	42,26	42,25	42,26	0,02	0,00	0,01
	3	42,30	42,31	42,30	42,31	0,01	0,00	0,01
	6	36,82	36,83	36,83	36,83	0,01	0,00	0,00
	11	41,20	41,19	41,20	41,20	0,00	0,01	0,00
2	1	25,59	25,59	25,60	25,60	0,01	0,01	0,00
	2	28,11	28,13	28,12	28,14	0,03	0,01	0,02
	3	31,16	31,16	31,16	31,17	0,01	0,01	0,01
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,16	12,15	12,16	12,16	0,00	0,01	0,00
	2	12,64	12,64	12,65	12,65	0,01	0,01	0,00
	3	19,37	19,37	19,38	19,38	0,01	0,01	0,00
	6	13,73	13,72	13,74	13,73	0,00	0,01	0,01
	11	14,97	14,96	14,98	14,98	0,01	0,02	0,00

TABELA 5.93 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,16	49,31	49,29	49,25	-0,2	0,1	0,1
	3	54,84	54,76	54,80	54,80	0,1	-0,1	0,0
	22	83,17	83,11	83,08	83,12	0,1	0,0	0,0
2	1	76,38	76,33	76,45	76,37	0,0	0,0	0,1
	3	75,70	75,74	75,69	75,73	0,0	0,0	-0,1
	22	115,14	115,16	115,09	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,83	103,70	103,85	103,77	0,1	-0,1	0,1
	3	96,94	97,04	96,94	97,00	-0,1	0,0	-0,1
	22	146,65	146,67	146,63	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.94 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,6$ e $w^P = 0,4$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,133	3,192	3,132	3,152	3,153	-0,001	0,0
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,596	0,902	0,643	0,714	0,750	-0,036	-4,8
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	1,617	2,224	1,667	1,836	1,909	-0,073	-3,8
β	0,1	1,3	1,296	1,212	1,287	1,265	1,253	0,012	1,0

5.5 – Localização de Componentes Hidráulicos

A topologia real de uma rede de distribuição de água nem sempre é a mesma da que é apresentada nos mapas das companhias, normalmente mapas datados do período de projeto e implantação do sistema. Assim, durante a operação do sistema e obras nas vias de trânsito, acessórios, como válvulas ou registros, podem ser instalados, ter seu *status* de funcionamento alterado, ou mesmo abandonados, sem a

conseqüente atualização da topologia da rede junto ao cadastro. Neste último caso, a presença do acessório sem o seu prévio conhecimento altera as condições de escoamento e pode causar discrepâncias nos valores de perda de carga obtidos nas simulações do modelo.

Para verificação do algoritmo proposto quanto à possibilidade de existência de componentes hidráulicos na rede, realizamos testes considerando duas maneiras de enquadrar a perda de carga localizada devido à presença do mesmo. Uma delas é a adoção de uma rugosidade absoluta maior ao respectivo trecho, de maneira a incorporar a perda de carga localizada. A outra possibilidade é a consideração de um *comprimento equivalente*, que consiste em substituir cada componente por comprimento de tubulação retilínea, de igual diâmetro e vazão, sendo a perda de carga igual à perda provocada pelo componente. Assim, o comprimento equivalente é adicionado ao comprimento real da tubulação e o problema é transformado no cálculo de perda de carga distribuída.

Para efeito dos testes aqui realizados, supôs-se a existência de 3 registros de gaveta nas tubulações 2, 8 e 14 da rede mostrada na Figura 4.4. Os dados sintéticos foram gerados a partir de uma rede com os comprimentos das tubulações 2, 8 e 14 aumentados dos respectivos comprimentos equivalentes.

De um modo geral, o comprimento equivalente pode ser obtido pela igualdade das expressões de perda de carga localizada (equação 5.2) e perda de carga distribuída (equação 5.3).

$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad (5.2)$$

onde ΔH é a perda de carga localizada, K é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds (geralmente constante para número de Reynolds maior que 10^5) e da rugosidade absoluta, v é a velocidade média de referência e g a aceleração da gravidade.

$$\Delta h = f \frac{Le}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (5.3)$$

onde Δh é a perda de carga distribuída, f o fator de atrito (dependente do número de Reynolds e da rugosidade absoluta), Le o comprimento equivalente e D o diâmetro da tubulação.

Assim, o valor do comprimento equivalente é dado por:

$$Le = \frac{K.D}{f} \quad (5.4)$$

Os valores do coeficiente K foram adotados com o auxílio da Tabela 5.95, que contém coeficientes de perda de carga localizada para registros de gaveta em função do grau de fechamento a/D .

TABELA 5.95 – Valores de K para registro de gaveta parcialmente fechado.

a/D	0	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
K	0,15	0,26	0,81	2,06	5,52	17,0	97,8

Fonte: PORTO (1998).

Para os três registros, foi adotado que cada um deles possuía um grau de fechamento de $3/4$, resultando no valor 17,0 para o coeficiente K . Assim, os valores do comprimento equivalente para as tubulações 2, 8 e 14 foram de 103, 51 e 102 metros, respectivamente.

Os pontos de observação dos valores sintéticos de pressão e vazão foram os mesmos do item 5.2 e foram simuladas 10 sementes aleatórias para cada tipo de AG (geracional elitista e *Steady-State*): 1, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 e 9000. A população foi de 100 soluções e o número de gerações para o AG geracional elitista foi de 500 e para o AG *Steady-State* de 40.

Uma desvantagem do método Simplex é não considerar valores inteiros para as variáveis de decisão que, neste caso, identificaria as tubulações dotadas de registro. Portanto, o modelo híbrido não pôde ser utilizado.

A faixa admitida para as variáveis de decisão tem valor mínimo igual a zero e valor máximo igual ao comprimento real da tubulação candidata à existência de um registro, na consideração do comprimento equivalente como variável de decisão do problema. No caso da utilização do acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão, a faixa é de 0,01 a 10 mm, valor máximo duas vezes maior que o valor utilizado para a calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros de vazamentos (item 5.2.3).

Os resultados são apresentados nas Figuras 5.43 a 5.46, considerando o número de vezes que cada tubulação dotada de registro (2, 8 e 14) foi localizada pelo algoritmo, dentre as 10 simulações realizadas para cada caso.

FIGURA 5.43 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o comprimento equivalente como variável de decisão (AG geracional elitista).

FIGURA 5.44 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o comprimento equivalente como variável de decisão (AG *Steady-State*).

FIGURA 5.45 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão (AG geracional elitista).

FIGURA 5.46 – Ocorrência da presença de registro nas tubulações 2, 8 e 14 dentre as dez simulações considerando o acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão (AG *Steady-State*).

Os melhores resultados foram alcançados com o uso do acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão e do AG *Steady-State*, sendo a única combinação que conseguiu localizar a tubulação 8, mesmo assim uma única vez. A tubulação 2 foi localizada em todas as simulações para todas as combinações e a

tubulação 14 teve maior número ocorrências também com o uso do acréscimo da rugosidade absoluta, tanto para o AG geracional elitista quanto para o AG *Steady-State*.

Pode-se considerar que os registros das tubulações 2 e 14 foram localizados, mas que o registro da tubulação 8 não. Assim, um estudo mais aprofundado deve ser realizado para que o problema da localização de componentes hidráulicos tenha sucesso. Um dos fatores a ser considerado neste estudo futuro é o de localização de componentes hidráulicos no esqueleto da rede, sem a consideração total da rede, como feito neste trabalho.

VI – Conclusões

Um estudo da calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão foi realizado no presente trabalho. O algoritmo produzido utiliza a tecnologia dos AGs, bem como de procedimento híbrido (AGs e Simplex) como ferramentas de busca. As investigações realizadas possibilitaram diversas conclusões, aqui apresentadas de forma sintética.

O algoritmo de avaliação hidráulica proposto considera vazamentos e demandas dependentes da pressão e determina o fator temporal da demanda de maneira iterativa, utilizando o simulador hidráulico EPANET. Eliminou-se, assim, a necessidade de intervenção direta sobre o código fonte do *software*, embora tal procedimento eleve o tempo de processamento computacional das simulações.

O modelo de vazamentos empregado foi o proposto por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999), que apresenta uma formulação baseada na perda de água por área de superfície de tubo, ao invés da consideração de vazamentos por comprimento de tubulação, proposta por GERMANOPOULOS & JOWITT (1989).

Uma análise das diferentes relações pressão x demanda apresentadas na literatura foi feita com base no número de iterações necessárias para a convergência no modelo hidráulico proposto. O modelo apresentado por TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) foi o que consumiu menor tempo de processamento computacional, sendo adotado para as simulações de calibração em termos das rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas e parâmetros do modelo pressão x vazamento. No entanto, análises em sistemas reais fazem-se necessárias para conhecimento da variação das demandas com a pressão.

Uma das dificuldades encontradas no desenvolvimento do presente trabalho diz respeito à faixa de variação dos valores das variáveis de decisão, principalmente quando diferentes tipos de parâmetros são considerados na calibração, como coeficiente e expoente de vazamento, rugosidade absoluta, diâmetro e cota topográfica. A combinação dos valores dos parâmetros resultou em não convergência do modelo hidráulico, especialmente quando os valores dos parâmetros do modelo de vazamentos eram elevados. O expoente de perda foi considerado a variável de

decisão mais sensível quanto à convergência. Nas simulações, o valor máximo admitido foi de 1,3 quando outros parâmetros também eram considerados na calibração.

Dois tipos de AGs foram testados na calibração realizada através de duas funções objetivo, sendo dada em algumas simulações preferência para uma ou outra função objetivo. O AG geracional elitista consumiu maior tempo de processamento, computacional na medida em que o nível de dificuldade da calibração aumentava (maior número de parâmetros na calibração). O mesmo comportamento não foi verificado em relação ao AG *Steady-State*, que requereu poucas gerações para que a convergência fosse atingida. Os melhores valores da função objetivo foram encontrados pelo AG *Steady-State*, o que, não necessariamente, implicava em uma melhor solução final em termos das variáveis de decisão, cujos valores foram identificados com maior precisão pelo AG geracional elitista. Os operadores genéticos de seleção e recombinação disponíveis na biblioteca *GAlib C++* foram comparados, sendo que o algoritmo de calibração mostrou-se sensível apenas ao tipo de seleção adotado, notadamente a utilização da seleção *Stochastic Remainder Sampling* (SRS), que produziu melhores resultados na calibração, tanto em termos dos desvios da função objetivo, quanto dos valores finais das variáveis de decisão. Todos os tipos de recombinação revelaram o mesmo comportamento nos testes realizados.

Os AGs revelaram dificuldades quanto à precisão dos valores das variáveis de decisão em termos da solução final, principalmente à medida que o número de variáveis de decisão era ampliado. Neste caso, a solução foi a hibridização do modelo de otimização, combinando um método de busca global (Algoritmos Genéticos) com um método de busca local (Simplex – NELDER & MEAD, 1965). Devido à limitação dos valores máximos das variáveis de decisão, uma variante do método proposta por SUBRAHMANYAM (1989), que incorpora restrições na formulação original, foi utilizada, aumentando o esforço computacional das simulações quando o valor limite das variáveis de decisão era excedido. Os Algoritmos Genéticos foram utilizados nas primeiras iterações do problema e depois, para poupar esforço computacional e refinar a solução final, era aplicado o método Simplex no término do processo de otimização. Um estudo do número ótimo de

iterações de AGs foi realizado, mostrando que um número reduzido de iterações é suficiente. No entanto, este número de iterações mostrou-se dependente do número de variáveis de decisão do problema, sendo necessárias mais iterações à medida que a complexidade da calibração aumentava, ou seja, um número maior de variáveis de decisão e de naturezas distintas eleva o número de iterações necessárias de AGs.

A utilização do modelo híbrido mostrou-se vantajosa, por poupar esforço computacional e refinar a solução final em termos da função objetivo e das variáveis de decisão em relação à solução final obtida pelos AGs somente. Além disso, o número de padrões de demanda utilizados para a calibração pode ser aumentado, dependendo do sistema (esforço computacional), ao invés de apenas três padrões (mínimo, médio e máximo) como utilizado neste trabalho. Entretanto, o ideal seria conduzir testes de vazão de incêndio nas redes.

A adoção de pesos na função objetivo em conjunto com o uso do modelo híbrido determinou, em termos das variáveis de decisão, resultados ainda melhores do que aqueles obtidos com o modelo híbrido apenas. No entanto, um estudo mais abrangente quanto ao emprego de pesos no processo de calibração, deve ser realizado, com vistas às análises de métodos populacionais como os AGs, de erros em medidas de pressão e vazão em campo e da sensibilidade dos pontos de amostragem.

Na determinação da presença de singularidades (como componentes hidráulicos e tubos com incrustação) provocando perdas de carga localizadas na rede, não foram alcançados resultados satisfatórios, sendo o algoritmo pouco sensível quanto às mudanças de pressão e vazão para a rede hipotética utilizada. A consideração do acréscimo da rugosidade absoluta como variável de decisão na calibração produziu resultados melhores do que aqueles apresentados pelo uso do comprimento equivalente como variável de decisão. Uma das dificuldades foi quanto à consideração de valores inteiros para as variáveis de decisão relativas às identificações das tubulações com singularidades, impedindo o uso do modelo híbrido. Assim, apenas os AGs foram empregados na identificação de singularidades e o melhor tipo foi o *Steady-State*, que conseguiu determinar as tubulações que continham registro com maior frequência.

De maneira geral, o algoritmo de calibração apresentou bons resultados, determinando parâmetros de diversas naturezas simultaneamente, embora a rede de amostragem não fosse otimizada e o problema seja indeterminado por natureza.

Todas as avaliações reportadas neste trabalho tomaram por base rede hipotética da literatura, embora, na prática, as redes reais sejam os alvos desse tipo de investigação.

Recomenda-se, portanto, o emprego do algoritmo para a calibração de modelos de redes reais como trabalhos futuros. Em cima de tal modelo, testes quanto à determinação de componentes hidráulicos no esqueleto da rede e a consideração de diferentes naturezas das variáveis de decisão no processo de calibração poderão ser realizados. Análises da rede de amostragem, apontando os pontos mais sensíveis à calibração, e um estudo mais profundo dos pesos utilizados são também considerações para trabalhos futuros.

Referências Bibliográficas

- AINOLA, L.; KOPPEL, T.; TIITER, K.; VASSILJEV, A. (2000). Water Network Model Calibration Based on Grouping Pipes with Similar Leakage and Roughness Estimates. *Proceedings of the Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management*, Minneapolis, MN.
- ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; HERNÁNDEZ, V.; RUIZ, P. A.; VIDAL, A. M.; MARTÍNEZ, F.; VERCHER, J.; ULANICKI, B. (2000). Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4, p. 251-260, July/Aug.
- ARREGUÍN-CORTES, F. I.; OCHOA-ALEJO, L. H. (1997). Evaluation of Water Losses in Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 5, p. 284-291, Sept/Oct.
- BHAVE, P. R. (1988). Calibrating Water Distribution Network Models. *Journal of Environmental Engineering*, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb.
- BOULOS, P. F.; ORMSBEE, L. E. (1991). Explicit Network Calibration for Multiple Loading Conditions. *Civil Engineering Systems*, v. 8, p. 153-160.
- BOULOS, P. F.; WOOD, D. J. (1990). Explicit Calculation of Pipe-Network Parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, Nov.
- BRDYS, M. A.; DUZINKIEWICZ, K.; GROCHOWSKI, M.; RUTKOWSKI, T. (2001). Robust Estimation of Integrated Hydraulics and Parameters in Water Distribution Systems. *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, Florida.
- BURROWS, R.; TANYIMBOH, T. T.; TABESH, M. (2000). Some Reflections on the Building and Calibration of Useful Network Models. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Network Modeling for Optimal Design and Management*, p. 33-42, Sept.
- CALIMAN, R. O. (2002). Determinação dos Parâmetros do Modelo Pressão x Vazamento para Sub-setores da Rede de Distribuição de Água de São Carlos -

- SP. São Carlos. 110 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- CHANDAPILLAI, J. (1991). Realistic Simulation of Water Distribution System. *Journal of Transportation Engineering*, v. 117, n. 2, p. 258-263, Mar/Apr.
- CHEUNG, P. B. (2001). Investigação dos Métodos Clássicos de Calibração de Redes Hidráulicas. Campo Grande. 132 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.
- DANDY, G. C.; ENGELHARDT, M. (2001). Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement Using Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 4, p. 214-223, July/Aug.
- DANDY, G. C.; SIMPSON, A. R.; MURPHY, L. J. (1996). An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization. *Water Resources Research*, v. 32, n. 2, p. 449-458, Feb.
- DATTA, R. S. N.; SRIDHARAN, K. (1994). Parameter Estimation in Water-Distribution Systems by Least Squares. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 4, p. 405-422, July/Aug.
- De SCHAETZEN, W.; RANDALL-SMITH, M.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (1999). Optimal Logger Density in Water Distribution Network Calibration. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications*, vol. 1, p. 301-307.
- De SCHAETZEN, W.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A.; ROUSSEAU, M. (2000). Analysis of the Sensitivity of the Calibration Optimization Problem. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, p. 43-54, Sept.
- De SCHAETZEN, W.; WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A. (2000). Optimal Sampling Design for Model Calibration Using Shortest Path, Genetic and Entropy Algorithms. *Urban Water*, v. 2, n. 2, p. 141-152.
- DIXON, L. C. W. (1972). *Nonlinear Optimisation*. The English Universities Press, London.
- FERRERI, G. B.; NAPOLI, E.; TUMBILOLO, A. (1994). Calibration of Roughness in Water Distribution Networks. In: MILLER, D. S. (ed.): *2nd International*

- Conference on Water Pipeline Systems*, BHR Group Conference Series, p. 379-396, Edinburgh, Scotland.
- FOX, R. L. (1971). *Optimization Methods for Engineering Design*. Addison-Wesley Inc., California.
- FUJIWARA, O.; LI, J. (1998). Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand. *Water Resources Research*, v. 34, n. 7, p. 1843-1850, July.
- GAMBALE, S. R. (2000). Aplicação de Algoritmo Genético na Calibração de Redes de Água. São Paulo. 266 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil.
- GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P. W. (1989). Leakage Reduction by Excess Pressure Minimization in a Water Supply Network. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 2 (June), p. 195-214.
- GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass.
- GRECO, M.; DEL GIUDICE, G.; (1999). New Approach to Water Distribution Network Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 8, p. 849-854, Aug.
- GUELI, R.; PEZZINGA, G. (1998). Algoritmi Genetici per la Regolazione di Valvole ai Fini della Riduzione delle Perdite. *Atti, XXVI CONV. DI IDRAULICA E COSTRUZIONI IDRAULICHE*, Catania, Italy.
- GUPTA, R.; BHAVE, P. R. (1996). Comparison of Methods for Predicting Deficient-Network Performance. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 3, p. 214-217, May/June.
- HALHAL, D.; WALTERS, G. A.; OUAZAR, D.; SAVIC, D. A. (1997). Water Network Rehabilitation with Structured Messy Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 3, p. 137-146, May/June.
- HERNÁNDEZ, V.; MARTÍNEZ, F.; VIDAL, A. M.; ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; RUIZ, P. A.; VERCHER, J. (1999). HIPERWATER: A High Performance Computing EPANET – Based Demonstrator for Water Network Simulation and Leakage Minimization. In:

- SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications*, vol. 1, p. 141-153.
- HINDI, K. S.; HAMAM, Y. M. (1991a). Pressure Control for Leakage Minimization in Water Supply Networks. Part 1. Single Period Models. *International Journal of Systems Science*, v. 22, n. 9, p. 1573-1585.
- HINDI, K. S.; HAMAM, Y. M. (1991b). Pressure Control for Leakage Minimization in Water Supply Networks. Part 2. Multi-Period Models. *International Journal of Systems Science*, v. 22, n. 9, p. 1587-1598.
- JOWITT, P. W. (1995). Effects of Pipe Failures on Water Distribution Networks. In: CABRERA, E. (ed.); VELA, A. F. (ed.): *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*, p. 283-302.
- JOWITT, P. W.; XU, C. (1990). Optimal Valve Control in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 116, n. 4, p. 455-472, July/Aug.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2000). Inverse Transient Analysis in Pipe Networks for Leakage Detection and Roughness Calibration. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, p. 143-159, Sept.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2002). Hybrid GA for Calibration of Water Distribution Hydraulic Models. *Proceedings of the 2002 Conference on Water Resources Planning and Management*, Roanoke, Virginia.
- KHADAM, M. A.; SHAMMAS, N. K.; AL-FERAIHEEDI (1991). Water Losses from Municipal Utilities and their Impacts. *Journal of the International Water Resources Association*, IWRA, v. 16, n. 4, p. 254-261.
- LACERDA, E. G. M.; CARVALHO, A. C. P. L. F. (1999). Introdução aos Algoritmos Genéticos. In: GALVÃO, C. O. (org.); VALENÇA, M. J. S. (org.): *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais*. Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, p. 99-150. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.)

- LAMBERT, A. O.; HIRNER, W. H. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. *IWA Blue Pages*.
- LAMBERT, A. O.; BROWN, T. G.; TAKIZAWA, M.; WEIMER, D. (2000). A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. *IWA/AQUA*, vol. 48, n. 6 (corrected version).
- LAMBERT, A. O. (2001). What Do We Know About Pressure: Leakage Relationships in Distribution Systems? *Proceedings of the International Specialized IWA Conference on System Approach to Leakage Control and Water Distribution Management*, Czech Republic.
- LANSEY, K. E.; BASNET, C. (1991). Parameter Estimation for Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 117, n. 1, p. 126-144, Jan/Feb.
- LANSEY, K. E.; EL-SHORBAGY, W.; AHMED, I.; ARAUJO, J.; HAAN, C. T. (2001). Calibration Assessment and Data Collection for Water Distribution Networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127, n. 4, p. 270-279, Apr.
- LINGIREDDY, S.; ORMSBEE, L. E. (2002). Hydraulic Network Calibration Using Genetic Optimization. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 19, n. 1, p. 13-39.
- LUVIZOTTO Jr., E. ; SOLIANI, R.; PIZZO, H. S.; JAQUIÊ, L. C. L. (2000). Análise de Técnicas de Busca para um Modelo de Detecção de Fugas. In: *ANAIS DO XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*, Córdoba, Argentina.
- MALLICK, K. N.; AHMED, I.; TICKLE, K. S.; LANSEY, K. E. (2002). Determining Pipe Groupings for Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 128, n. 2, p. 130-139, Mar/Apr.
- MARTÍNEZ, F.; CONEJOS, P.; VERCHER, J. (1999). Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands. *Proceedings of the 26th ASCE Water Resources Planning and Management Division Conference*, Tempe, Arizona.

- MARTÍNEZ, F.; SIGNES, M.; SAVALL, R.; ANDRÉS, M.; PONZ, R.; CONEJOS, P. (1999). Construction and Use of Dynamic Simulation Model for the Valencia Metropolitan Water Supply and Distribution Network. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications*, vol. 1, p. 155-174.
- MEIER, R. W.; BARKDOLL, B. D. (2000). Sampling Design for Network Model Calibration Using Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4, p. 245-250, July/Aug.
- MICHALEWICZ, Z. (1994). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. 2^a ed., Springer-Verlag, USA.
- MORLEY, M. S.; ATKINSON, D. A.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (2001). GAnet: Genetic Algorithm Platform for Pipe Network Optimisation. *Advances in Engineering Software*, v. 32, p. 467-475.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer Journal*, v. 7, n. 4, p. 308-313.
- OBRADOVIC, D. (2000). Modelling of Demand and Losses in Real-Life Water Distribution Systems. *Urban Water*, v. 2, n. 2, p. 131-139, June.
- ORMSBEE, L. E. (1989). Implicit Network Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 115, n. 2, p. 243-257, Mar.
- ORMSBEE, L. E.; LINGIREDDY, S. (1997). Calibrating Hydraulic Network Models. *Journal of the American Water Works Association*, v. 89, n. 2, p. 42-50.
- ORMSBEE, L. E.; WOOD, D. J. (1986). Explicit Pipe Network Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 112, n. 2, p. 166-182, Apr.
- PEZZINGA, G. (1994). Modelli per la Regolazione della Piezometria ai Fini della Riduzione delle Perdite in Rete. *Atti, XXIV CONVEGNO DI IDRAULICA E COSTRUZIONI IDRAULICHE*, v. 2, n. T3b, p. 25-38, Napoli, Italy.
- PORTO, R. M. (1998). *Hidráulica Básica*. 1^a ed., Edusp, São Carlos.
- QUARTERONI, A.; SACCO, R.; SALERI, F. (2000). *Numerical Mathematics*. Springer-Verlag, New York.

- REDDY, P. V. N.; SRIDHARAN, K.; RAO, P. V. (1996). WLS Method for Parameter Estimation in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 122, n. 3, p. 157-164, May/June.
- REIS, L. F. R.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. (1997). Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 6, p. 317-326, Nov/Dec.
- RIGHETTO, A. M. (2001). Calibração de Modelo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água. *Revista ABRH*, v. 6, n. 3, p. 33-44, Set.
- ROSSMAN, L. A. (2000). *EPANET 2 users manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- SALGADO, R.; ROJO, J.; ZEPEDA, S. (1993). Extended Gradient Method for Fully Non-linear Head and Flow Analysis in Pipe Networks. In: COULBECK, B. (ed.): *Integrated Computer Applications in Water Supply. Methods and Procedures for Systems Simulation and Control*, vol. 1, p. 49-60.
- SANTOS, A. (2000). Estudo das Perdas por Vazamento Aplicado a um Setor da Rede de Abastecimento de Água de São Carlos - SP. São Carlos. 114 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (1996). Stochastic Optimization Techniques in Hydraulic Engineering and Management. In: TICKLE, K. S.; GOULTER, I. C.; XU, C.; WASIMI, S. A.; BOUCHARTE, F. (eds.): *Stochastic Hydraulics '96*, Balkema Publishers, Rotterdam, p. 65-72.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (1997a). Evolving Sustainable Water Networks. *Hydrological Sciences Journal*, v. 42, n. 4, p. 549-564, Aug.
- SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. (1997b). Genetic Algorithms for Least-Cost Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 123, n. 2, p. 67-77, Mar/Apr.
- SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R.; CALIMAN, R. O.; CHAUDHRY (2002). Análise de Calibração de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Aplicada a Setor de Rede Real – Uma Aproximação que Contempla Vazamentos. *Revista ABRH*. /submetido/

- SIMPSON, A. R.; DANDY, G. C.; MURPHY, L. J. (1994). Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 120, n. 4, p. 423-443, July/Aug.
- SIMPSON, A. R.; VÍTKOVSKY, J. P.; LAMBERT, M. F. (2000). Transients for Calibration of Pipe Roughnesses Using Genetic Algorithms. In: *VIII INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRESSURE SURGES: Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems*, The Hague, The Netherlands. BHR Group 2000 Pressure Surges, Publications n. 39, p. 587-597.
- SOUZA, R. S. (1994). Aspectos Computacionais da Análise de Redes de Distribuição de Água com Componentes Hidráulicos em Regime Permanente. São Carlos. 236 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.
- SUBRAHMANYAM, M. B. (1989). An Extension of the Simplex Method to Constrained Nonlinear Optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, v. 62, n. 2, p. 311-319, Aug.
- TABESH, M.; KARIMZADEH, A. (2000). Optimum Design of Reliable Distribution Systems Considering Pressure Dependency of Outflows. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Network Modeling for Optimal Design and Management*, p. 211-220, Sept.
- TANG, K.; KARNEY, B. W.; PENDLEBURY, M.; ZHANG, F. (1999). Inverse Transient Calibration of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, vol. 1, p. 317-326.
- TANYIMBOH, T. T.; TABESH, M.; BURROWS, R. (2001). Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 4, p. 206-213, July/Aug.
- TANYIMBOH, T. T.; TEMPLEMAN, A. B. (1998). Calculating the Reliability of Single-Source Networks by the Source Head Method. *Advances in Engineering Software*, v. 29, n. 7-9, p. 499-505.

- TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. (1999). Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar.
- TUCCIARELLI, T.; TERMINI, D. (1998). Optimal Valves Regulation for Calibration of Pipe Network Models. *Proceedings, Hydroinformatics 98 Conf.*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, p. 1029-1036.
- VAIRAVAMOORTHY, K.; ALI, M. (2000). Optimal Design of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 15, n. 5, p. 374-382, Sept.
- VAIRAVAMOORTHY, K.; LUMBERS, J. (1998). Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 124, n. 11, p. 1146-1153, Nov.
- VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. (2000). Leak Detection and Calibration Using Transients and Genetic Algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 4, p. 262-265, July/Aug.
- WAGNER, J. M.; SHAMIR, U.; MARKS, D. H. (1988). Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 114, n. 3, p. 276-294, May.
- WALL, M. (1996). *Galib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology.
- WALSKI, T. M. (1983). Technique for Calibrating Network Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 109, n. 4, p. 360-372, Oct.
- WALSKI, T. M. (1986). Case Study: Pipe Network Model Calibration Issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 112, n. 2, p. 238-249, Apr.
- WALTERS, G. A.; LOHBECK, T. (1993). Optimal Layout of Tree Networks Using Genetic Algorithms. *Engineering Optimization*, v. 22, p. 27-48.
- WALTERS, G. A.; SAVIC, D. A.; MORLEY, M.; De SCHAETZEN, W.; ATKINSON, R. (1998). Calibration of Water Distribution Network Models Using Genetic Algorithms. In: BLAIN, W. R. (ed.): *Hydraulic Engineering Software VII*, p. 131-140.

WATER RESEARCH CENTRE (1989). *Network Analysis – A Code for Practice*.

Published by WRc, Swindon, UK.

WILLIAMS, M. F. (1993). *WESNET user's guide*. Poole, Dorset, UK: Wessex

Water Plc.

WRC plc TECHNICAL WORKING GROUP ON WASTE OF WATER (1980).

Leakage Control, Policy and Practice. *National Water Council Standing*

Technical Committee, Report n° 26, WRC plc, Swindon, UK.

Obras Consultadas

- CABRERA, E.; VELA, A. F. (eds.) (1995). *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- CARPENTIER, P.; COHEN, G. (1991). State Estimation and Leak Detection in Water Distribution Networks. *Civil Engineering Systems*, v. 8, n. 4, p. 247-257, Dec.
- CESARIO, A. L.; DAVIS, J. O. (1984). Calibrating Water System Models. *Journal of the American Water Works Association*, v. 76, n. 7, p. 66-69, July.
- CHEUNG, P. B.; SOARES, A. K.; SOUZA, R. S. (2000). Implementação e Investigação de um Método Analítico de Calibração de Redes Hidráulicas. In: *ANAIS DO XXVII CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL*, Porto Alegre/RS.
- GARCIA, J. G. (1988). *Estudio y Mejora de las Tecnicas de Calibracion de Modelos de Redes Hidraulicas*. Valencia. Tese (Doutorado) - Universidad Politecnica de Valencia, Espanha.
- GOMES, H. P. (2002). *Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico*. Ed. Universitária/UFPB, João Pessoa.
- LUVIZOTTO, E.; PIZZO, H. S. (1999). Acoplamento do TMA (Time Marching Approach) e do Método de Nelder-Mead em um Modelo para Detecção de Fugas. In: *ANAIS DO 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, Rio de Janeiro/RJ, p. 1079-1092.
- MAYS, L. W. (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill, New York.
- REIS, L. F. R.; CHAUDHRY, F. H. (1999). Hydraulic Characteristics of Pressure Reducing Valves for Maximum Reduction of Leakage in Water Supply Networks. In: SAVIC, D. A. (ed.); WALTERS, G. A. (ed.): *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications*, vol. 1, p. 259-267.
- SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R.; SOARES, A. K. (2002). Calibração de Rede de Distribuição de Água Considerando as Perdas por Vazamento Explicitamente no Modelo com uso de Algoritmos Genéticos – Aplicação para Rede da Cidade

- de São Carlos, SP. In: *ANAIS DO SEMINÁRIO PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, O ESTADO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS*, João Pessoa/PB.
- SKIPWORTH, P. J. (1997). *Leakage – A Literature Review*. University of Sheffield, Nov.
- SOARES, A. K.; REIS, L. F. R.; SILVA, F. G. B. (2002). Modelos de Simulação Hidráulica Dirigidos pela Pressão (MSHDP) com o Suporte do EPANET. In: *ANAIS DO SEMINÁRIO PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, O ESTADO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS*, João Pessoa/PB.
- SOLOMATINE, D. P. (1998). Genetic and Other Global Optimization Algorithms – Comparison and Use in Calibration Problems. *Proceedings, Hydroinformatics 98 Conf.*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- WALSKI, T. M. (1985). Assuring Accurate Model Calibration. *Journal of the American Water Works Association*, v. 77, n. 12, p. 38-41, Dec.
- WALSKI, T. M. (2001). The Wrong Paradigm – Why Water Distribution Optimization doesn't Work. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 127, n. 4, p. 203-205, July/Aug.

APÊNDICE A

APÊNDICE A – Calibração em termos das rugosidades absolutas e parâmetros do modelo pressão x vazamento – Resultados para o uso das demais gerações no modelo híbrido

TABELA A.1 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (1 geração).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,26	38,14	38,15	0,00	0,11	0,01
	2	42,29	42,55	42,26	42,26	0,03	0,29	0,00
	3	42,31	42,37	42,30	42,31	0,00	0,06	0,01
	6	36,83	36,88	36,83	36,83	0,00	0,05	0,00
	11	41,19	41,26	41,19	41,20	0,01	0,06	0,01
2	1	25,60	25,69	25,60	25,60	0,00	0,09	0,00
	2	28,18	28,40	28,15	28,14	0,04	0,26	0,01
	3	31,18	31,21	31,17	31,17	0,01	0,04	0,00
	6	25,54	25,59	25,54	25,55	0,01	0,04	0,01
	11	28,60	28,66	28,60	28,60	0,00	0,06	0,00
3	1	12,15	12,15	12,16	12,16	0,01	0,01	0,00
	2	12,65	12,66	12,65	12,65	0,00	0,01	0,00
	3	19,38	19,34	19,38	19,38	0,00	0,04	0,00
	6	13,71	13,71	13,72	13,73	0,02	0,02	0,01
	11	14,96	14,94	14,97	14,98	0,02	0,04	0,01

TABELA A.2 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (1 geração).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,34	49,21	49,34	49,25	0,2	-0,1	0,2
	3	54,69	55,06	54,71	54,80	-0,2	0,5	-0,2
	22	83,14	82,95	83,12	83,12	0,0	-0,2	0,0
2	1	76,16	76,19	76,27	76,37	-0,3	-0,2	-0,1
	3	75,81	76,28	75,74	75,73	0,1	0,7	0,0
	22	115,27	114,75	115,23	115,14	0,1	-0,3	0,1
3	1	103,45	103,63	103,58	103,77	-0,3	-0,1	-0,2
	3	97,21	97,52	97,09	97,00	0,2	0,5	0,1
	22	146,76	146,26	146,74	146,67	0,1	-0,3	0,0

TABELA A.3 – Valores calibrados e reais (1 geração).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,265	3,384	3,206	3,285	3,153	0,132	4,2
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,466	1,526	1,105	1,366	0,750	0,616	82,1
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	3,352	2,605	2,694	2,884	1,909	0,975	51,1
β	0,1	1,3	1,107	1,228	1,159	1,165	1,253	-0,088	-7,0

TABELA A.4 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (1 geração).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	73	1037	3,21E-05
2	345	3873	0,0003124
3	70	901	1,11E-05

TABELA A.5 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (5 gerações).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,16	38,15	38,15	0,00	0,01	0,00
	2	42,27	42,28	42,26	42,26	0,01	0,02	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,19	41,20	0,00	0,00	0,01
2	1	25,60	25,61	25,60	25,60	0,00	0,01	0,00
	2	28,15	28,15	28,15	28,14	0,01	0,01	0,01
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,61	28,61	28,60	0,00	0,01	0,01
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,97	14,98	14,98	14,98	0,01	0,00	0,00

TABELA A.6 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (5 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,27	49,21	49,27	49,25	0,0	-0,1	0,0
	3	54,79	54,83	54,75	54,80	0,0	0,0	-0,1
	22	83,11	83,15	83,16	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,34	76,33	76,25	76,37	0,0	-0,1	-0,2
	3	75,75	75,76	75,76	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,13	115,13	115,22	115,14	0,0	0,0	0,1
3	1	103,73	103,75	103,61	103,77	0,0	0,0	-0,2
	3	97,03	97,03	97,08	97,00	0,0	0,0	0,1
	22	146,65	146,66	146,72	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA A.7 – Valores calibrados e reais (5 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,173	3,158	3,193	3,175	3,153	0,022	0,7
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,836	0,769	1,006	0,870	0,750	0,120	16,0
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,058	1,917	2,483	2,153	1,909	0,244	12,8
β	0,1	1,3	1,235	1,256	1,183	1,225	1,253	-0,028	-2,3

TABELA A.8 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (5 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	96	1229	9,53E-07
2	59	764	2,46E-06
3	81	930	6,95E-06

TABELA A.9 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (30 gerações).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,16	38,15	38,15	0,00	0,01	0,00
	2	42,28	42,28	42,27	42,26	0,02	0,02	0,01
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,19	41,20	41,20	41,20	0,01	0,00	0,00
2	1	25,60	25,61	25,60	25,60	0,00	0,01	0,00
	2	28,17	28,15	28,14	28,14	0,03	0,01	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,61	28,61	28,60	0,00	0,01	0,01
3	1	12,15	12,16	12,16	12,16	0,01	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,72	13,73	13,73	13,73	0,01	0,00	0,00
	11	14,96	14,98	14,98	14,98	0,02	0,00	0,00

TABELA A.10 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (30 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,36	49,21	49,21	49,25	0,2	-0,1	-0,1
	3	54,71	54,83	54,82	54,80	-0,2	0,0	0,0
	22	83,11	83,15	83,14	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,24	76,33	76,35	76,37	-0,2	-0,1	0,0
	3	75,79	75,76	75,75	75,73	0,1	0,0	0,0
	22	115,20	115,13	115,13	115,14	0,1	0,0	0,0
3	1	103,55	103,75	103,77	103,77	-0,2	0,0	0,0
	3	97,16	97,03	97,01	97,00	0,2	0,0	0,0
	22	146,71	146,66	146,66	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA A.11 – Valores calibrados e reais (30 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,239	3,158	3,152	3,183	3,153	0,030	1,0
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,252	0,769	0,737	0,919	0,750	0,169	22,6
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,893	1,917	1,872	2,227	1,909	0,318	16,7
β	0,1	1,3	1,145	1,256	1,260	1,220	1,253	-0,033	-2,6

TABELA A.12 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (30 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	73	921	1,79E-05
2	59	764	2,46E-06
3	66	659	9,77E-07

TABELA A.13 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (50 gerações).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,16	38,15	38,15	0,00	0,01	0,00
	2	42,28	42,28	42,27	42,26	0,02	0,02	0,01
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,19	41,20	41,20	41,20	0,01	0,00	0,00
2	1	25,60	25,61	25,60	25,60	0,00	0,01	0,00
	2	28,17	28,15	28,14	28,14	0,03	0,01	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,61	28,61	28,60	0,00	0,01	0,01
3	1	12,15	12,16	12,16	12,16	0,01	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,72	13,73	13,73	13,73	0,01	0,00	0,00
	11	14,96	14,98	14,98	14,98	0,02	0,00	0,00

TABELA A.14 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (50 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,36	49,21	49,21	49,25	0,2	-0,1	-0,1
	3	54,71	54,83	54,82	54,80	-0,2	0,0	0,0
	22	83,11	83,15	83,14	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,24	76,33	76,35	76,37	-0,2	-0,1	0,0
	3	75,79	75,77	75,75	75,73	0,1	0,0	0,0
	22	115,20	115,13	115,14	115,14	0,1	0,0	0,0
3	1	103,55	103,75	103,77	103,77	-0,2	0,0	0,0
	3	97,16	97,03	97,01	97,00	0,2	0,0	0,0
	22	146,71	146,66	146,66	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA A.15 – Valores calibrados e reais (50 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,239	3,158	3,152	3,183	3,153	0,030	1,0
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,252	0,769	0,737	0,919	0,750	0,169	22,6
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,893	1,917	1,872	2,227	1,909	0,318	16,7
β	0,1	1,3	1,145	1,256	1,260	1,220	1,253	-0,033	-2,6

TABELA A.16 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (50 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	73	921	1,79E-05
2	59	764	2,45E-06
3	66	659	9,76E-07

APÊNDICE B

APÊNDICE B – Calibração em termos das demandas – Resultados para o uso das demais gerações no modelo híbrido

TABELA B.1 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (1 geração).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,14	28,14	28,14	28,14	0,00	0,00	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,98	14,98	14,98	14,98	0,00	0,00	0,00

TABELA B.2 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (1 geração).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,25	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,37	76,37	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,73	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,14	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,77	103,77	103,77	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,00	97,00	97,00	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,67	146,67	146,67	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA B.3 – Valores calibrados e reais (1 geração).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
DEM 6 (l/s)	20,00	50,00	35,18	33,37	33,22	33,92	36,00	-2,08	-5,8
DEM 11 (l/s)	20,00	50,00	36,82	38,52	38,81	38,05	36,00	2,05	5,7

TABELA B.4 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (1 geração).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	62	554	5,46E-09
2	123	1055	4,86E-09
3	78	1114	5,56E-09

TABELA B.5 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (10 gerações).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,14	28,14	28,14	28,14	0,00	0,00	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,98	14,98	14,98	14,98	0,00	0,00	0,00

TABELA B.6 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (10 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,25	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,37	76,37	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,73	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,14	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,77	103,77	103,77	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,00	97,00	97,00	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,67	146,67	146,67	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA B.7 – Valores calibrados e reais (10 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
DEM 6 (l/s)	20,00	50,00	35,55	32,77	41,96	36,76	36,00	0,76	2,1
DEM 11 (l/s)	20,00	50,00	36,32	39,30	39,13	38,25	36,00	2,25	6,3

TABELA B.8 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (10 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	57	451	5,30E-09
2	83	513	5,01E-09
3	53	529	5,96E-09

TABELA B.9 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados (20 gerações).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,20	41,20	41,20	0,00	0,00	0,00
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,14	28,14	28,14	28,14	0,00	0,00	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,98	14,98	14,98	14,98	0,00	0,00	0,00

TABELA B.10 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados (20 gerações).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,25	49,25	49,25	49,25	0,0	0,0	0,0
	3	54,80	54,80	54,80	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,12	83,12	83,12	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,37	76,37	76,37	76,37	0,0	0,0	0,0
	3	75,73	75,73	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,14	115,14	115,14	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,77	103,77	103,77	103,77	0,0	0,0	0,0
	3	97,00	97,00	97,00	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,67	146,67	146,67	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA B.11 – Valores calibrados e reais (20 gerações).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
DEM 6 (l/s)	20,00	50,00	35,55	32,69	42,36	36,87	36,00	0,87	2,4
DEM 11 (l/s)	20,00	50,00	36,32	39,33	38,58	38,08	36,00	2,08	5,8

TABELA B.12 – Número de iterações e avaliações da função objetivo no método Simplex (20 gerações).

Simulação	Iterações	Avaliações da Função Objetivo	Valor da FO
1	56	430	4,89E-09
2	84	566	4,69E-09
3	53	588	5,60E-09

APÊNDICE C

APÊNDICE C – Utilização de Pesos na Função Objetivo – Resultados para o uso dos demais conjuntos de pesos

TABELA C.1 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,1$ e $w^P = 0,9$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,14	38,14	38,15	0,00	0,01	0,01
	2	42,27	42,25	42,24	42,26	0,01	0,01	0,02
	3	42,31	42,30	42,30	42,31	0,00	0,01	0,01
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,19	41,19	41,20	0,00	0,01	0,01
2	1	25,60	25,59	25,59	25,60	0,00	0,01	0,01
	2	28,15	28,14	28,13	28,14	0,01	0,00	0,01
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,61	28,60	28,60	28,60	0,01	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,65	12,65	12,65	0,00	0,00	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,73	13,73	13,73	0,00	0,00	0,00
	11	14,98	14,97	14,97	14,98	0,00	0,01	0,01

TABELA C.2 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,1$ e $w^P = 0,9$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,27	49,37	49,30	49,25	0,0	0,2	0,1
	3	54,78	54,73	54,75	54,80	0,0	-0,1	-0,1
	22	83,13	83,08	83,12	83,12	0,0	-0,1	0,0
2	1	76,33	76,37	76,33	76,37	-0,1	0,0	-0,1
	3	75,75	75,70	75,71	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,16	115,16	115,19	115,14	0,0	0,0	0,0
3	1	103,71	103,70	103,69	103,77	-0,1	-0,1	-0,1
	3	97,03	97,02	97,02	97,00	0,0	0,0	0,0
	22	146,67	146,69	146,71	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA C.3 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,1$ e $w^P = 0,9$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,168	3,175	3,172	3,172	3,153	0,019	0,6
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,847	0,907	0,874	0,876	0,750	0,126	16,8
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,107	2,249	2,227	2,194	1,909	0,285	14,9
β	0,1	1,3	1,228	1,206	1,208	1,214	1,253	-0,039	-3,1

TABELA C.4 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,2$ e $w^P = 0,8$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,14	38,15	38,14	38,15	0,01	0,00	0,01
	2	42,25	42,25	42,25	42,26	0,01	0,01	0,01
	3	42,30	42,31	42,30	42,31	0,01	0,00	0,01
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,18	41,20	41,20	41,20	0,02	0,00	0,00
2	1	25,59	25,60	25,60	25,60	0,01	0,00	0,00
	2	28,14	28,13	28,13	28,14	0,00	0,01	0,01
	3	31,17	31,16	31,17	31,17	0,00	0,01	0,00
	6	25,54	25,55	25,55	25,55	0,01	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,61	28,60	0,00	0,00	0,01
3	1	12,16	12,16	12,17	12,16	0,00	0,00	0,01
	2	12,65	12,65	12,66	12,65	0,00	0,00	0,01
	3	19,38	19,38	19,39	19,38	0,00	0,00	0,01
	6	13,72	13,74	13,74	13,73	0,01	0,01	0,01
	11	14,97	14,98	14,99	14,98	0,01	0,00	0,01

TABELA C.5 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,2$ e $w^P = 0,8$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,39	49,24	49,24	49,25	0,3	0,0	0,0
	3	54,69	54,81	54,78	54,80	-0,2	0,0	0,0
	22	83,10	83,13	83,15	83,12	0,0	0,0	0,0
2	1	76,28	76,38	76,34	76,37	-0,1	0,0	0,0
	3	75,73	75,71	75,70	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,23	115,13	115,19	115,14	0,1	0,0	0,0
3	1	103,57	103,79	103,73	103,77	-0,2	0,0	0,0
	3	97,10	96,97	96,99	97,00	0,1	0,0	0,0
	22	146,75	146,67	146,72	146,67	0,1	0,0	0,0

TABELA C.6 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,2$ e $w^P = 0,8$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,212	3,139	3,140	3,164	3,153	0,011	0,3
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,162	0,697	0,762	0,874	0,750	0,124	16,5
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,811	1,810	2,000	2,207	1,909	0,298	15,6
β	0,1	1,3	1,146	1,266	1,237	1,216	1,253	-0,037	-2,9

TABELA C.7 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,3$ e $w^P = 0,7$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,14	38,14	38,15	0,00	0,01	0,01
	2	42,27	42,23	42,25	42,26	0,01	0,03	0,01
	3	42,31	42,30	42,30	42,31	0,00	0,01	0,01
	6	36,83	36,82	36,83	36,83	0,00	0,01	0,00
	11	41,19	41,19	41,19	41,20	0,01	0,01	0,01
2	1	25,60	25,59	25,59	25,60	0,00	0,01	0,01
	2	28,16	28,12	28,14	28,14	0,02	0,02	0,00
	3	31,17	31,17	31,17	31,17	0,00	0,00	0,00
	6	25,55	25,54	25,54	25,55	0,00	0,01	0,01
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,16	12,16	12,16	12,16	0,00	0,00	0,00
	2	12,65	12,64	12,65	12,65	0,00	0,01	0,00
	3	19,38	19,38	19,38	19,38	0,00	0,00	0,00
	6	13,73	13,72	13,72	13,73	0,01	0,01	0,01
	11	14,97	14,97	14,97	14,98	0,01	0,01	0,01

TABELA C.8 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,3$ e $w^P = 0,7$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,39	49,23	49,29	49,25	0,3	0,0	0,1
	3	54,71	54,75	54,73	54,80	-0,2	-0,1	-0,1
	22	83,07	83,19	83,15	83,12	-0,1	0,1	0,0
2	1	76,32	76,27	76,26	76,37	-0,1	-0,1	-0,1
	3	75,75	75,71	75,73	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,17	115,25	115,24	115,14	0,0	0,1	0,1
3	1	103,63	103,65	103,60	103,77	-0,1	-0,1	-0,2
	3	97,09	97,03	97,07	97,00	0,1	0,0	0,1
	22	146,69	146,76	146,74	146,67	0,0	0,1	0,0

TABELA C.9 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,3$ e $w^P = 0,7$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,206	3,170	3,197	3,191	3,153	0,038	1,2
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,085	0,856	1,016	0,986	0,750	0,236	31,4
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,562	2,270	2,548	2,460	1,909	0,551	28,9
β	0,1	1,3	1,175	1,202	1,173	1,183	1,253	-0,070	-5,6

TABELA C.10 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,4$ e $w^P = 0,6$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	38,15	38,15	0,00	0,00	0,00
	2	42,26	42,26	42,26	42,26	0,00	0,00	0,00
	3	42,31	42,31	42,31	42,31	0,00	0,00	0,00
	6	36,83	36,83	36,83	36,83	0,00	0,00	0,00
	11	41,20	41,19	41,20	41,20	0,01	0,01	0,00
2	1	25,60	25,60	25,60	25,60	0,00	0,00	0,00
	2	28,14	28,14	28,13	28,14	0,00	0,00	0,01
	3	31,17	31,17	31,16	31,17	0,00	0,00	0,01
	6	25,54	25,55	25,55	25,55	0,01	0,00	0,00
	11	28,60	28,60	28,60	28,60	0,00	0,00	0,00
3	1	12,15	12,16	12,16	12,16	0,01	0,00	0,00
	2	12,64	12,65	12,64	12,65	0,01	0,00	0,01
	3	19,37	19,38	19,38	19,38	0,01	0,00	0,00
	6	13,72	13,73	13,73	13,73	0,01	0,00	0,00
	11	14,96	14,98	14,97	14,98	0,02	0,00	0,01

TABELA C.11 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,4$ e $w^P = 0,6$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,23	49,22	49,24	49,25	0,0	-0,1	0,0
	3	54,80	54,78	54,81	54,80	0,0	0,0	0,0
	22	83,16	83,18	83,12	83,12	0,0	0,1	0,0
2	1	76,30	76,26	76,38	76,37	-0,1	-0,1	0,0
	3	75,76	75,75	75,72	75,73	0,0	0,0	0,0
	22	115,18	115,22	115,12	115,14	0,0	0,1	0,0
3	1	103,70	103,64	103,79	103,77	-0,1	-0,1	0,0
	3	97,04	97,06	96,99	97,00	0,0	0,1	0,0
	22	146,67	146,72	146,66	146,67	0,0	0,0	0,0

TABELA C.12 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,4$ e $w^P = 0,6$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,187	3,179	3,152	3,173	3,153	0,020	0,6
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,850	0,912	0,716	0,826	0,750	0,076	10,1
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,130	2,311	1,832	2,091	1,909	0,182	9,5
β	0,1	1,3	1,225	1,202	1,264	1,230	1,253	-0,023	-1,8

TABELA C.13 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,7$ e $w^P = 0,3$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,07	38,14	38,15	0,00	0,08	0,01
	2	42,28	42,02	42,24	42,26	0,02	0,24	0,02
	3	42,31	42,26	42,30	42,31	0,00	0,05	0,01
	6	36,83	36,78	36,83	36,83	0,00	0,05	0,00
	11	41,20	41,15	41,19	41,20	0,00	0,05	0,01
2	1	25,61	25,54	25,60	25,60	0,01	0,06	0,00
	2	28,16	27,95	28,13	28,14	0,02	0,19	0,01
	3	31,17	31,14	31,17	31,17	0,00	0,03	0,00
	6	25,55	25,52	25,55	25,55	0,00	0,03	0,00
	11	28,61	28,57	28,60	28,60	0,01	0,03	0,00
3	1	12,17	12,19	12,16	12,16	0,01	0,03	0,00
	2	12,66	12,66	12,65	12,65	0,01	0,01	0,00
	3	19,38	19,41	19,38	19,38	0,00	0,03	0,00
	6	13,74	13,76	13,73	13,73	0,01	0,03	0,00
	11	14,99	15,02	14,98	14,98	0,01	0,04	0,00

TABELA C.14 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,7$ e $w^P = 0,3$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,23	49,19	49,29	49,25	0,0	-0,1	0,1
	3	54,79	54,57	54,76	54,80	0,0	-0,4	-0,1
	22	83,16	83,43	83,13	83,12	0,0	0,4	0,0
2	1	76,29	76,47	76,33	76,37	-0,1	0,1	0,0
	3	75,77	75,28	75,71	75,73	0,0	-0,6	0,0
	22	115,18	115,50	115,19	115,14	0,0	0,3	0,0
3	1	103,68	103,86	103,70	103,77	-0,1	0,1	-0,1
	3	97,05	96,57	97,02	97,00	0,1	-0,4	0,0
	22	146,69	146,97	146,72	146,67	0,0	0,2	0,0

TABELA C.15 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,7$ e $w^P = 0,3$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,167	2,968	3,162	3,099	3,153	-0,054	-1,7
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	0,878	0,204	0,836	0,639	0,750	-0,111	-14,8
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,178	1,332	2,150	1,887	1,909	-0,022	-1,2
β	0,1	1,3	1,220	1,298	1,218	1,245	1,253	-0,008	-0,6

TABELA C.16 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,8$ e $w^P = 0,2$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,14	38,14	38,15	0,00	0,01	0,01
	2	42,26	42,24	42,23	42,26	0,00	0,02	0,03
	3	42,31	42,30	42,30	42,31	0,00	0,01	0,01
	6	36,83	36,83	36,82	36,83	0,00	0,00	0,01
	11	41,19	41,19	41,19	41,20	0,01	0,01	0,01
2	1	25,60	25,60	25,59	25,60	0,00	0,00	0,01
	2	28,15	28,13	28,12	28,14	0,01	0,01	0,02
	3	31,17	31,17	31,16	31,17	0,00	0,00	0,01
	6	25,55	25,55	25,55	25,55	0,00	0,00	0,00
	11	28,61	28,60	28,60	28,60	0,01	0,00	0,00
3	1	12,17	12,17	12,17	12,16	0,01	0,01	0,01
	2	12,66	12,66	12,65	12,65	0,01	0,01	0,00
	3	19,39	19,39	19,38	19,38	0,01	0,01	0,00
	6	13,73	13,74	13,74	13,73	0,00	0,01	0,01
	11	14,98	14,99	14,98	14,98	0,00	0,01	0,00

TABELA C.17 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,8$ e $w^P = 0,2$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,32	49,27	49,24	49,25	0,1	0,0	0,0
	3	54,74	54,74	54,78	54,80	-0,1	-0,1	0,0
	22	83,12	83,16	83,15	83,12	0,0	0,1	0,0
2	1	76,29	76,29	76,38	76,37	-0,1	-0,1	0,0
	3	75,74	75,70	75,67	75,73	0,0	0,0	-0,1
	22	115,20	115,24	115,17	115,14	0,1	0,1	0,0
3	1	103,63	103,66	103,78	103,77	-0,1	-0,1	0,0
	3	97,07	97,01	96,95	97,00	0,1	0,0	-0,1
	22	146,72	146,75	146,71	146,67	0,0	0,1	0,0

TABELA C.18 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,8$ e $w^P = 0,2$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,182	3,152	3,129	3,154	3,153	0,001	0,0
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,007	0,862	0,678	0,849	0,750	0,099	13,2
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,474	2,268	1,835	2,192	1,909	0,283	14,8
β	0,1	1,3	1,183	1,201	1,258	1,214	1,253	-0,039	-3,1

TABELA C.19 – Comparação entre valores de pressão simulados e observados ($w^Q = 0,9$ e $w^P = 0,1$).

Padrão de Consumo	Nó	Pressão simulada (m.c.a.)			Pressão Observada (m.c.a.)	Erro Absoluto (m.c.a.)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	38,15	38,15	37,99	38,15	0,00	0,00	0,16
	2	42,26	42,28	41,87	42,26	0,00	0,02	0,39
	3	42,31	42,31	42,23	42,31	0,00	0,00	0,08
	6	36,83	36,83	36,74	36,83	0,00	0,00	0,09
	11	41,19	41,19	41,08	41,20	0,01	0,01	0,12
2	1	25,60	25,60	25,47	25,60	0,00	0,00	0,13
	2	28,15	28,16	27,82	28,14	0,01	0,02	0,32
	3	31,17	31,17	31,13	31,17	0,00	0,00	0,04
	6	25,55	25,55	25,47	25,55	0,00	0,00	0,08
	11	28,61	28,60	28,52	28,60	0,01	0,00	0,08
3	1	12,16	12,15	12,16	12,16	0,00	0,01	0,00
	2	12,66	12,65	12,61	12,65	0,01	0,00	0,04
	3	19,38	19,38	19,42	19,38	0,00	0,00	0,04
	6	13,73	13,72	13,72	13,73	0,00	0,01	0,01
	11	14,98	14,97	15,00	14,98	0,00	0,01	0,02

TABELA C.20 – Comparação entre valores de vazão simulados e observados ($w^Q = 0,9$ e $w^P = 0,1$).

Padrão de Consumo	Trecho	Vazão (l/s)			Vazão Observada (l/s)	Erro Relativo (%)		
		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3		Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
1	1	49,27	49,30	49,39	49,25	0,0	0,1	0,3
	3	54,75	54,75	54,17	54,80	-0,1	-0,1	-1,1
	22	83,15	83,13	83,61	83,12	0,0	0,0	0,6
2	1	76,25	76,25	76,17	76,37	-0,2	-0,2	-0,3
	3	75,76	75,79	75,09	75,73	0,0	0,1	-0,8
	22	115,22	115,19	115,98	115,14	0,1	0,0	0,7
3	1	103,61	103,60	103,36	103,77	-0,2	-0,2	-0,4
	3	97,08	97,13	96,63	97,00	0,1	0,1	-0,4
	22	146,73	146,69	147,41	146,67	0,0	0,0	0,5

TABELA C.21 – Valores calibrados e reais ($w^Q = 0,9$ e $w^P = 0,1$).

Variável de Decisão	Variação		Simulações				Real	Erro Absoluto Médio	Erro Relativo (%)
	Mínima	Máxima	1	2	3	Média			
ε (mm)	0,01	5,00	3,189	3,222	3,028	3,146	3,153	-0,007	-0,2
θ_1 (x10e-7)	0,05	3,00	1,012	1,110	0,090	0,737	0,750	-0,013	-1,7
θ_2 (x10e-7)	0,05	3,00	2,498	2,610	2,976	2,695	1,909	0,786	41,2
β	0,1	1,3	1,181	1,174	1,045	1,133	1,253	-0,120	-9,6