Campus de São Carlos

ESTUDOS DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

FERNANDO DAS GRAÇAS BRAGA DA SILVA

Orientadora : Prof^a Dr^a LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

ESTUDOS DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

Fernando das Graças Braga da Silva

DEDALUS - Acervo - EESC

31100043088

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

ORIENTADOR: Prof^a Dr^a Luisa Fernanda Ribeiro Reis

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 07/05/03

Ass.:

São Carlos
2003

✓

Class.	TESE-EESC
Cutt.	55 44
Tombo	T116/03
Sysno	1314919

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

S586e

Silva, Fernando das Graças Braga da
Estudos de calibração de redes de distribuição de
água através de algoritmos genéticos / Fernando das
Graças Braga da Silva. -- São Carlos, 2003.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.

Área : Hidráulica e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luisa Fernanda Ribeiro
Reis.

1. Redes de distribuição de água. 2. Calibração.
3. Algoritmos genéticos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FERNANDO DAS GRAÇAS BRAGA DA SILVA**

Tese defendida e julgada em 27-03-2003 perante a Comissão Julgadora:

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

Aprovado

Prof. Tit. **HANS GEORGE ARENS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

Prof. Assoc. **PAULO SÉRGIO FRANCO BARBOSA**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

aprovado

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

Aprovado

Prof. Dr. **MARIO THADEU LEME DE BARROS**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO

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

Dedico a minha família em especial a
avó Maria Panza, que nos deixou recentemente.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta oportunidade oferecida.

A FAPESP pela bolsa concedida e por todo apoio técnico ao longo do trabalho.

À FINEP, 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 infra-estrutura deu suporte ao desenvolvimento de presente trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro 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.

Ao SAAE - SÃO CARLOS, em especial ao Eng. André Fiorentino então diretor, aos diversos gerentes, chefes de setores, encarregados e funcionários em geral e colegas da equipe da USP pela contribuição na fase de coleta de dados.

Lembro aqui também dos professores Rodrigo de Melo Porto e Fazal Hussain Chaudhry pelo auxílio na orientação durante fase do trabalho.

Aos colegas do LABSIN por todo apoio e excelente convívio social.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho em especial ao Sr. Edson Cornetta durante a fase de aferição dos equipamentos.

Agradeço muito minha família: Armênio, Marlene, Armênio José e Maria (*in memoriam*) pelo incentivo e a minha namorada Ana Cláudia por todo amor e paciência ao longo destes anos.

Em especial agradeço a professora e orientadora Luisa Fernanda Ribeiro Reis pela brilhante orientação e apoio irrestrito durante toda a pesquisa, contribuindo de forma fundamental a minha formação de pesquisador.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos do trabalho	3
2 PROBLEMÁTICA DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO REAIS.....	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Modelos de calibração de redes de distribuição de água	7
2.3 Modelos de vazamentos.....	20
2.4 Rede de amostragem ótima em redes de distribuição de água.....	21
3 CONSIDERAÇÕES E REVISÃO DE CONCEITOS DE ENTROPIA	31
3.1 Fundamentos sobre o conceito de entropia.....	31

3.2 Entropia associada a incertezas de fluxos em redes de distribuição de água	33
 4 ALGORITMOS GENÉTICOS	 37
4.1 Introdução.....	37
4.2 Alfabeto para representação das variáveis de decisão	39
4.3 Seleção de parâmetros relacionados aos AGs.....	40
4.4 Operadores genéticos	41
4.5 Tipos de AGs	45
4.6 Principais vantagens do uso dos algoritmos genéticos (AGs)	46
 5 MATERIAIS E MÉTODOS	 47
5.1 Detalhes das etapas básicas de calibração.....	47
5.2 Principais redes utilizadas no estudo	49
5.3 Treinamento de uso de equipamentos e testes de laboratório realizados	53
5.4 Trabalhos de campo realizados	57
5.5 Escolha dos locais para obtenção dos parâmetros de pressão e vazão necessários para a calibração	66
5.6 Dados de consumo de água.....	72
5.7 Simulações computacionais realizadas para calibração	73
5.8 Modelo hidráulico utilizado.....	86
5.9 Parâmetros dos operadores dos algoritmos genéticos adotados para a maior parte das simulações	91
5.10 Critério de desempenho de modelo de calibração	92

6 RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO DE OPERADORES GENÉTICOS E ALGORITMOS MAIS EFICIENTES	93
6.1 Investigações no Setor Monte Carlo (menor porte)	94
6.2 Investigações no Setor São Carlos 3 (maior porte)	105
6.3 Estudos dos pesos associados à calibração de redes de distribuição de Água.....	120
7 RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO MODELO DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO.....	125
7.1 Resultados obtidos para a rede teórica	125
7.2 Resultados do modelo de calibração obtidos para o Setor de menor porte “Monte Carlo”	130
7.3 Resultados do modelo de calibração e de determinação de parâmetros de vazamentos aplicados conjuntamente para o Setor de maior porte “São Carlos 3”	137
8 RESULTADOS OBTIDOS DO ESTUDO DE DETERMINAÇÃO DA REDE DE AMOSTRAGEM ÓTIMA PARA CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA	157
8.1 Estudos preliminares de determinação do agrupamento de pontos de monitoramento	158
8.2 Aplicação de método de localização de pontos ótimos de monitoramento de parâmetros necessários a calibração em redes baseado no trabalho de De SCHAEZTEN (2000)	163
8.3 Aplicação de método de determinação de rede de amostragem ótima “Short path algorithms logic” modificado associado a considerações de entropia para otimização da determinação do caminhamento dos fluxos.....	170

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	184
9.1 Conclusões.....	185
9.2 Recomendações.....	191
9.3 Contribuições originais e relevantes do trabalho.....	193
 ANEXOS	 197
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 223
 APÊNDICES	 I

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Esquema geral de calibração via modelos inversos.....	12
FIGURA 02 - Fluxograma dos algoritmos de “Shortest Path algorithms Logic” utilizados por De SCHAETZEN (2000)	26
FIGURA 03 - Recombinação de 1 ponto de corte.....	43
FIGURA 04 - Recombinação de 2 pontos de corte	43
FIGURA 05 - Recombinação uniforme.....	44
FIGURA 06 - Esquema de mutação	45
FIGURA 07 - Esquema da rede hipotética (JOWITT & XU (1990)).....	49
FIGURA 08 - Esquema da rede hipotética (De SCHAETZEN (2000))	50
FIGURA 09 - Esquema do Setor “Monte Carlo” – Cidade de São Carlos – S.P. – Brasil	51
FIGURA 10 - Caixa de inspeção na entrada do setor “Monte Carlo”	51
FIGURA 11 - Setor “São Carlos 3 ” – Cidade de São Carlos, S.P, Brasil.....	52
FIGURA 12 - Reservatório de abastecimento do Setor “São Carlos 3 ” – Cidade de São Carlos, S.P, Brasil	53
FIGURA 13 - Funcionário SAAE São Carlos em treinamento de uso de geofones mecânicos e eletrônico usado na aferição (foto- geofone mecânico)	54
FIGURA 14 - Treinamento do uso de equipamentos utilizados: (a) Computador Portátil e módulo de armazenamento de informações de vazão e (b) medidor armazenador de informações de pressão	54
FIGURA 15 - Detalhe de manômetro de peso morto utilizado na aferição do medidor de pressão	55
FIGURA 16 - Ensaio realizado para aferição de equipamento de vazão em Laboratório da Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos –USP	56
FIGURA 17 - Vertedor e balança utilizada durante ensaio de determinação de vazão utilizado na aferição no Laboratório da Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos -USP.....	56

FIGURA 18 - Modelo de questionário aplicado no Setor Monte Carlo	58
FIGURA 19 - Equipamento de GPS utilizado para levantamentos de campo.....	59
FIGURA 20 - (a) Operação com haste para verificação de ocorrência de vazamento em cavalete de morador (b) Operação com geofône eletrônico utilizado	61
FIGURA 21 - Geofône eletrônico.....	61
FIGURA 22 - Registro de pressão durante manobras sucessivas de fechamento da válvula - Setor São Carlos 3	62
FIGURA 23 - Medidor de pressão instalado em cavalete do Setor São Carlos 3	62
FIGURA 24– Monitoramento de vazão em ponto localizado no interior da rede no Setor São Carlos 3 (a) Equipamento instalado (b) Equipe durante instalação de equipamento na madrugada.....	63
FIGURA 25 - Medidor de vazão instalado na entrada do Setor São Carlos 3	63
FIGURA 26 Membros da equipe do SAAE durante a manobras na madrugada no Setor Monte Carlo	63
FIGURA 27 - Fechamento do registro na entrada do Setor São Carlos 3 durante ensaio de determinação da curva Pressão x vazamento.....	64
FIGURA 28 - Curva com a variação da vazão para distintos fechamentos da válvula de controle.....	64
FIGURA 29 - Medidor de pressão (armazenador) instalado em cavalete residencial	65
FIGURA 30 - Medidor de pressão (armazenador) instalado em rede de distribuição.....	65
FIGURA 31–Medidor de vazão ultrasônico: (a) módulo de aquisição de dados (b) régua com sensor instalada na tubulação.....	66
FIGURA 32 - Locação de pontos de monitoramento de pressão e vazão no Setor Monte Carlo	68

FIGURA 33 - Esquema do abastecimento do Setor São Carlos 3.....	70
FIGURA 34 - Localização de todos os conjuntos de pontos para obtenção de parâmetros necessários para calibração – Setor São Carlos 3	71
FIGURA 35 - Rede fictícia para estimativas de demandas nos nós	72
FIGURA 36 - Algoritmo geracional elitista utilizado	77
FIGURA 37 - Algoritmos genéticos <i>Steady State</i>	78
FIGURA 38 - Algoritmo de dois passos utilizado	80
FIGURA 39 - Cadeia representativa de solução –Módulo 1	82
FIGURA 40 - Algoritmo para determinação dos parâmetros de vazamentos utilizado por (Caliman 2002)	85
FIGURA 41 - Cadeia representativa de solução –Módulo 2.....	86
FIGURA 42 - Módulo do cálculo do fator de demanda.....	90
FIGURA 43 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com e sem a implementação do elitismo	95
FIGURA 44 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com e sem a introdução de logaritmos as variáveis de decisão	96
FIGURA 45 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com quantidades de características recombinadas fixas e aleatórias	97
FIGURA 46 - Evolução da função de aptidão com e sem elitismo (a) seleção aleatória (b) seleção por roleta	97
FIGURA 47 - Evolução da função de aptidão com e sem elitismo (a) seleção por torneio (b) seleção proporcional.....	98
FIGURA 48 - Comparação da evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs para os diversos tipos de seleção implementados.....	98
FIGURA 49 - Comparação da evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs para os diversos tipos de recombinação	99
FIGURA 50 - Testes comparativos para diferentes taxas de mutação.....	100
FIGURA 51 - Evolução da função de aptidão com a variação do número de trechos com grandes rugosidades	101

FIGURA 52 - Frequência de rugosidades com valores acima das atribuídas aos setores – Monte Carlo	104
FIGURA 53 - Rugosidades atribuídas para o setor a partir de 10 populações iniciais aleatórias distintas – Setor 1	105
FIGURA 54 - Rugosidades atribuídas para o setor a partir de 10 populações iniciais aleatórias distintas – Setor 2	105
FIGURA 55 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com o uso de todos os dados – condição de demanda mínima, média e máxima – São Carlos 3	106
FIGURA 56 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs – todos os conjuntos de pontos– condição de demanda máxima – com e sem logaritmo – São Carlos 3	107
FIGURA 57 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs todos os conjuntos – condição de demanda máxima – 2 e 3 setores	108
FIGURA 58 - Variação da maior aptidão da população em relação a aptidão média e a variância	109
FIGURA 59 - Pressões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – <i>Steady State</i> – Critério de convergência 1	113
FIGURA 60 - Pressões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – <i>Steady State</i> – Critério de convergência 2.....	114
FIGURA 61 - Pressões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – geracional.....	115
FIGURA 62 - Vazões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – <i>Steady State</i> – Critério de convergência 1	116
FIGURA 63 - Vazões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – <i>Steady State</i> – Critério de convergência 2.....	117

FIGURA 64 - Vazões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – geracional.....	117
FIGURA 65 - Rugosidades nos dois setores (várias seqüências aleatórias). (a) <i>Steady State</i> – critério de convergência 1, (b) <i>Steady State</i> – critério de convergência 2, (c) geracional.....	118
FIGURA 66 - Frequências de rugosidades com grandes valores (várias seqüências aleatórias). (a) <i>Steady State</i> – critério de convergência 1 (b) <i>Steady State</i> – critério de convergência 2, (c) geracional	119
FIGURA 67 - Desvios da função de aptidão para as diversas simulações relativas pesos realizadas	123
FIGURA 68 - Soma dos desvios quadrados da função de aptidão para as diversas simulações ao longo das iterações de AGs (gerações)	124
FIGURA 69 - Evolução da função de aptidão máxima e média ao longo das iterações de AGs para 7 populações aleatórias distintas.....	127
FIGURA 70 - Formato geral da evolução da função de aptidão ao longo das iterações	131
FIGURA 71 - Maiores valores de aptidões obtidas as população aleatória iniciais distintas – Setor Monte Carlo	131
FIGURA 72 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 39 para todas as populações aleatórias iniciais distintas.....	132
FIGURA 73 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 46 para todas as populações aleatórias iniciais distintas.....	132
FIGURA 74 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 59 para todas as populações aleatórias iniciais distintas.....	133
FIGURA 75 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 61 para todas as populações aleatórias iniciais distintas.....	133
FIGURA 76 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 70 para todas as populações aleatórias iniciais distintas.....	133
FIGURA 77 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 77 para todas as populações aleatórias iniciais distintas.....	133

FIGURA 78 – Pressões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – demanda máxima.....	134
FIGURA 79 – Pressões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – demanda média.....	135
FIGURA 80 – Pressões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – demanda mínima.....	135
FIGURA 81 – Vazões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – 3 condições de demanda	136
FIGURA 82 – Evolução da função de aptidão para rotina do módulo 1 - populações aleatórias distintas	137
FIGURA 83 – Evolução da função de aptidão para rotina do módulo 2 - populações aleatórias distintas	138
FIGURA 84 – Rugosidades dos setores– população aleatória 1	139
FIGURA 85 – Rugosidades dos setores– população aleatória 2	139
FIGURA 86 – Rugosidades dos setores– população aleatória 3	139
FIGURA 87 – Rugosidades dos setores– população aleatória 4	139
FIGURA 88 – Rugosidades dos setores– população aleatória 5	139
FIGURA 89 – Rugosidades dos setores– população aleatória 6	139
FIGURA 90 – Rugosidades dos setores– população aleatória 7	140
FIGURA 91 – Rugosidades dos setores– população aleatória 8	140
FIGURA 92 – Rugosidades dos setores– população aleatória 9	140
FIGURA 93 – Rugosidades dos setores– população aleatória 10	140
FIGURA 94 – Variação da rugosidade atribuída ao Setor 1 para todas as populações aleatórias distintas.....	141
FIGURA 95 – Variação da rugosidade atribuída ao Setor 2 para todas as populações aleatórias distintas.....	141
FIGURA 96 – Frequência de rugosidades com valores acima das atribuídas aos setores – Setor São Carlos 3.....	142
FIGURA 97 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 76 para todas as populações aleatórias distintas	142

FIGURA 98 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 101 para todas as populações aleatórias distintas	143
FIGURA 99 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 109 para todas as populações aleatórias distintas	143
FIGURA 100 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 133 para todas as populações aleatórias distintas	143
FIGURA 101 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 136 para todas as populações aleatórias distintas	143
FIGURA 102 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 138 para todas as populações aleatórias distintas	144
FIGURA 103 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 152 para todas as populações aleatórias distintas	144
FIGURA 104 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 153 para todas as populações aleatórias distintas	144
FIGURA 105 – Valores de C1 e N1 finais para todas as populações aleatórias – Área 1	148
FIGURA 106 – Valores de C1 e N1 finais para todas as populações aleatórias – Área 2	148
FIGURA 107 – Valores de C1 e N1 finais para todas as populações aleatórias – Área 3	149
FIGURA 108 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 1	149
FIGURA 109 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 2	149
FIGURA 110 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 3	150
FIGURA 111 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 4	150
FIGURA 112 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 5	150
FIGURA 113 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 1	151

FIGURA 114 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 2	151
FIGURA 115 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 3	151
FIGURA 116 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 4	152
FIGURA 117 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 5	152
FIGURA 118 - Vazões medidas e simuladas - todos os conjuntos – população aleatória 1 – Módulo 1.....	153
FIGURA 119 - Vazões medidas e simuladas – todos os conjuntos – população aleatória 1.....	153
FIGURA 120- Pressões medidas e simuladas para iterações do método – pressão –máxima -população aleatória 1 – módulo 2.....	154
FIGURA 121- Pressões medidas e simuladas para iterações do método – pressão –média-população aleatória 1 – módulo 2.....	154
FIGURA 122 - Pressões medidas e simuladas para iterações do método – pressão –mínima -população aleatória 1 – módulo 2.....	155
FIGURA 123 - Pressões medidas e simuladas – patamar 1	155
FIGURA 124 - Pressões medidas e simuladas – patamar 2.....	156
FIGURA 125 - Pressões medidas e simuladas – patamar 3.....	156
FIGURA 126 - Vazões medidas e simuladas – população aleatória 1 – Módulo 2.....	156
FIGURA 127 - Locação de pontos de acordo com suas faixas de correlações	162
FIGURA 128 - Desenvolvimento de aptidão ao longo das iterações para 5 populações aleatórias – Rede teórica.....	166
FIGURA 129 - Desenvolvimento de aptidão ao longo das iterações para 5 populações aleatórias – Rede real São Carlos 3	167
FIGURA 130 - Locação de pontos selecionados através do método 3 –Setor de Maior Porte	169
FIGURA 131 - Algoritmo para numeração dos nós da rede baseado no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993) implementado.....	171

FIGURA 132 - Algoritmo para determinação dos pesos nos nós baseado no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993) implementado	172
FIGURA 133 - Algoritmo determinação das vazões nos trechos da rede baseado no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993) implementado	174
FIGURA 134 - Algoritmo para determinação do cenário de sentidos de fluxos na rede com a minimização das incertezas.....	176
FIGURA 135 - Rede de distribuição utilizada (De SCHAEETZEN (2000))	177
FIGURA 136 - Rede de distribuição utilizada com o sentido dos fluxos determinados pela rotina do algoritmo da Figura 134	178
FIGURA 137 - Função de aptidão com e sem o uso de entropia variando o número de pontos de monitoramento.....	179
FIGURA 138 - Comparação da função de aptidão com e sem o uso de entropia.....	180
FIGURA 139 - Desvio de valores da comparação de rugosidades reais e calculadas - com e sem o uso de entropia associada aos “ <i>Shortest Path Algorithms Logic</i> ”	183
FIGURA 140 - Desvio acumulado de valores da comparação de rugosidades reais e calculadas - com e sem o uso de entropia associada aos “ <i>Shortest Path Algorithms Logic</i> ”	183

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Procedimentos de calibração iterativos (De Schaetzen (2000))	8
TABELA 02 - Procedimentos de calibração explícitos (De Schaetzen (2000))	9
TABELA 03 - Procedimentos de calibração implícitos (adaptado de De Schaetzen (2000))	13
TABELA 04 - Taxas de probabilidades de ocorrência de acessórios determinadas – Monte Carlo	75
TABELA 05 - Taxas de probabilidades de ocorrência de acessórios determinadas – São Carlos 3	82
TABELA 06 - Critérios de desempenho de modelos de calibração segundo a Water Reserch Centre (1989)	92
TABELA 07 - Rugosidades sem a introdução da setorização – 10 populações aleatórias	103
TABELA 08 - Comparação de tempo computacional e eficiência para os tipos de algoritmos genéticos utilizados para diversas populações aleatórias	110
TABELA 09 - Descrição das simulações realizadas para o estudo dos pesos	122
TABELA 10 - Valores de pressões e vazões medidos e obtidos pelo modelo de simulação	124
TABELA 11 - Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de simulação para diferentes populações aleatórias	130
TABELA 12 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 1	145
TABELA 13 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 2	145
TABELA 14 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 3	145
TABELA 15 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	

População aleatória 4	146
TABELA 16 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	
População aleatória 5	146
TABELA 17 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	
População aleatória 6	146
TABELA 18 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	
População aleatória 7	146
TABELA 19 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	
População aleatória 8	146
TABELA 20 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	
População aleatória 9	147
TABELA 21 - Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –	
População aleatória 10	147
TABELA 22 - Pressões nos nós da rede hipotética sob diferentes condições de demanda	159
TABELA 23 - Coeficientes de correlação para os nós da rede	160
TABELA 24 - Determinação das cargas nos nós com e sem perturbação nas rugosidades (Cargas em mH ₂ O e rugosidades em mm)	164
TABELA 25 - Matriz de sensibilidade ou Jacobiana	165
TABELA 26 - Classificação de pontos de monitoramento com e sem a determinação do sentido dos fluxos	178
TABELA 27 - Valores dos parâmetros pressões e vazões calculados e medidos – com uso de entropia – condição de demanda máxima	180
TABELA 28 - Valores dos parâmetros pressões e vazões calculados e medidos – com uso de entropia – condição de demanda média	181
TABELA 29 - Valores dos parâmetros pressões e vazões calculados e medidos – com uso de entropia – condição de demanda mínima	181
TABELA 30 - Valores dos parâmetros pressões e vazões	

calculados e medidos – sem entropia – condição de demanda máxima..... 181

TABELA 31 - Valores dos parâmetros pressões e vazões

calculados e medidos – sem entropia – condição de demanda média 182

TABELA 32 - Valores dos parâmetros pressões e vazões

calculados e medidos – sem entropia – condição de demanda mínima 182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG - algoritmo genético

AGs - algoritmos genéticos

BBL - Empresa que participa em parceria no projeto - Bureau Brasileiro s/c Ltda

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

EESC - Escola de Engenharia de São Carlos

FINEP - Financiadora Nacional de Estudos e Pesquisas

HGA - algoritmos genético híbrido

IPOP - Melhores soluções que garante a passagem para a iteração seguinte

LM - método de busca Levenberg- Marquardt

SAAE - Serviço Autônomo de Água e Esgoto

SHS - Departamento de hidráulica e saneamento

UK - United Kingdom

VRP - Válvula redutora de pressão

WRc - Water Research Centre- UK

LISTA DE SIMBOLOS

- c_i - é uma constante da rede
 C_j - rugosidade de tubo j
 C_j - rugosidade de tubo j perturbada
 C - número de condições de demanda
 C_1 - constante da relação pressão vazamento
 C_{ref} - consumo básico proporcional a distribuição de consumo para cada nó
 $C_{ref.setor}$ - soma dos C_{ref} de todos os nós do setor em estudo
 C_{setor} - consumo total do setor
 $F_1(x)$ - função relacionada ao uso de sensibilidades
 $F_2(x)$ - função relacionada ao uso de entropia
 $F(x)$ - função de aptidão
Fator - fator multiplicador relativo a horários de consumo
 $H_i(C_j)$ - carga calculada do nó i assumindo a rugosidade C_j
 $H_i(C_j^*)$ - carga calculada do nó i assumindo a rugosidade C_j^*
 H_i^0 - carga observada para o nó i
 H_i^p - carga calculada para o nó i
 K - constante arbitrária positiva
 l - comprimento da rede
 L - vazamento da rede
 L_{ij} - comprimento do tubo limitado pelos nós i e j
 m - número de condutos relacionados a matriz
 M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão
 n - número de nós relacionados a matriz
 n_n - conjunto de nós de monitoramento dos valores de pressão
 n_c - conjunto de condutos de monitoramento dos valores de vazão
 n_{po} - número de padrões de observação
 N - conjunto de pontos de observação de valores de pressão
 N_{Dn} - consiste de todas as vazões de saída

NP - peso associado a um nó

N_1 - expoente da relação pressão-vazamento

p - distribuição de probabilidades

P_{ij} - valor medido j de vazão ou pressão durante a condição de demanda i

p_{oi} - proporção do fornecimento total para a rede relativo ao reservatório i

$\bar{P}_{OBS}$ - média dos valores de pressão observados

P_n - probabilidade do fluxo chegar ao nó n

P - carga de pressão

P_r - probabilidade de recombinação

P_m - probabilidade de mutação

P - carga de pressão média no trecho considerado

P_{ijSIM} - pressão simulada para o nó j e padrão de observação i

P_{ijOBS} - pressão observada respectivamente, para o nó j e padrão de observação i

P_{ij}^{av} - pressão média ao longo do tubo

q_{0i} - entrada de vazão interna

Q - vazão

Q_e - vazão abastecida total em setor

Q_{ij} - valor observado j de vazão ou pressão durante a condição de demanda i

Q_i^0 - vazão observada no tubo i

Q_i^p - vazão calculada no tubo i

$\bar{Q}_{OBS}$ - média dos valores de vazão observados

Q_{ikSIM} - vazão simulada para o conduto k e padrão de observação i

Q_{ikOBS} - vazão observada para o conduto k e padrão de observação i

Q_{ij} - é a vazão no elemento hidráulico que conecta os nós i e j

Q_k - vazão em determinado trecho para o passo k

Q_{sk} - vazamento em determinado trecho para o passo k

$S(p)$ - função de entropia

S - entropia de Shannon

S_o - entropia relativa a uma entrada externa corresponde

S_n - entropia da vazão de saída

S_{ij} - vazamento da tubulação que liga os nós i e j

T_o - fornecimento ou demanda total

T_n - vazão externa total

V_{setor} - vazamento total do setor

w_H, w_Q - pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão

θ - coeficiente de perda por vazamento

ε - rugosidade absoluta da tubulação

r_{ij} - correlação entre o nós i e j .

RESUMO

SILVA, F.G.B. (2003) Estudo de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos. São Carlos, 2003. 234 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

As mudanças físicas ocorridas ao longo do tempo requerem que os modelos hidráulicos de previsão de comportamento das redes de distribuição de água para abastecimento tenham seus parâmetros reavaliados periodicamente via calibração. Diversas são as dificuldades inerentes ao processo de calibração de redes reais, dentre as quais aquelas resultantes da precariedade dos cadastros, como a incerteza quanto à localização e condição de abertura de válvulas na rede. Muitos métodos de calibração foram propostos na literatura, geralmente com base em equações analíticas e técnicas de otimização diversas. Reconhece-se, entretanto, a necessidade de estimativas dos parâmetros da rede em termos das rugosidades e dos parâmetros locais da relação entre pressão e vazamento, para sistemas sujeitos a vazamentos expressivos. Propõe-se aqui um método de calibração em duas etapas em que os AGs (algoritmos genéticos) são empregados como ferramenta na resolução dos problemas inversos correspondentes, sendo os estudos realizados para setores de rede da Cidade de São Carlos, SP, sobre os quais extensivos trabalhos de campo foram realizados. Foram desenvolvidos também estudos de investigação da melhor representação do problema via AGs e de localização de pontos ótimos de monitoramento. Os resultados demonstraram-se robustos em identificar rugosidades e trechos dotados de válvulas, bem como os parâmetros do modelo de vazamentos, além de indicar possibilidades de melhorias na eficiência dos AGs. Resultados obtidos a partir de considerações sobre técnicas de localização de pontos ótimos de monitoramento também foram considerados bons.

Palavras-chave: Redes de distribuição de água, calibração, Algoritmos Genéticos.

ABSTRACT

SILVA, F.G.B. (2003) Study of calibration of water supply networks through genetic algorithms, 2003. 234 p. Thesis (Doctor's degree)- Engineering School of São Carlos, University of São Paulo.

Continuous physical changes that occur in water supply networks along the years require their calibration in order to guarantee realistic forecasts through hydraulic models. There are many difficulties involved in water supply network calibration in terms of their parameters as results of many factors, amongst which the lack or uncertainty on data like location and status of valve openings in the network. Several calibration methods have been proposed in the literature, usually based on many analytical equations and optimization techniques. However, it was known the need of estimative of network parameters in proper form of roughnesses and local parameters of relation between pressure and leakage, for systems submitted to expressive leakages. This work proposes a method of calibration in two phases in which the GAs (genetic algorithms) are used as tools in the resolution of corresponding inverse problems, being the studies performed for sectors of the network of the city of São Carlos, SP, about which extensive field work had been done. It was developed, also, studies investigating of the best representation of problem through GAs and the localization of optimal points for monitoring. The results have showed themselves robust in the identification of roughnesses and sections having valves, as well as the parameters of leakage model, besides to indicate possibilities of improvements in GA's efficiency. The results that have been obtained from considerations about localization techniques of optimal points for monitoring were considered good as well.

Keywords: water distribution networks, calibration, Genetic Algorithms.

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

Apesar das redes de distribuição de água para abastecimento representarem uma característica comum aos núcleos populacionais urbanos do mundo todo, as práticas atuais de monitoramento das redes de abastecimento muitas vezes seguem critérios empíricos e primitivos, por diversas razões. Dentre elas a inexistência total ou parcial de cadastros das redes e a operação muitas vezes ficar a cargo de pessoas pouco qualificadas para a tarefa, no caso do Brasil. Esse quadro colabora com diversos problemas de ordem prática, como a insuficiência de abastecimento, apesar da disponibilidade hídrica, os elevados custos relativos à manutenção do sistema, que incluem mão de obra e energia elétrica, e o elevado nível de perdas por vazamento. Tais fatos associados à crescente urbanização e consequente aumento da demanda de água para abastecimento, tornam o projeto, a construção, a operação e a manutenção de milhões de quilômetros de redes um desafio para os engenheiros do mundo todo.

A operação e manutenção de uma rede existente atendendo ao critério da sustentabilidade deve, portanto, contemplar aspectos como: minimização de energia, redução das perdas de água a níveis aceitáveis, minimização do número e consequências das ocorrências de falhas nos tubos, uso eficiente do sistema existente e o atendimento das necessidades dos usuários de forma satisfatória, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo. Do ponto de vista quantitativo, o planejamento e a tomada de decisões requerem um

modelo de simulação como ferramenta básica para análise e previsão do comportamento hidráulico das redes, face a diferentes situações passíveis de ocorrer. Como as decisões a serem tomadas dependem das previsões do modelo, ele deve ser eficiente e realístico.

Para assegurar que um modelo vá realizar previsões com precisão adequada, antes de utilizá-lo faz-se necessária a etapa de calibração:

- **do modelo**, no caso de redes novas, que consiste na determinação das rugosidades, posto que diâmetros, comprimentos e materiais são conhecidos; e
- **da rede**, em se tratando de redes antigas ou com cadastro desatualizado, que consiste na determinação de variáveis como diâmetros, comprimentos e rugosidades.

Recentemente, SAVIC & WALTERS (1997), WALTERS et al. (1998) e De SCHAETZEN (2000) aplicaram Algoritmos Genéticos (AGs), técnicas numéricas baseadas no princípio da evolução natural especialmente eficientes no tratamento de problemas grandes e complexos, para determinar as rugosidades em redes de distribuição de água, obtendo bons resultados. Este método de busca é adotado aqui, por incluir vantagens como a possibilidade de investigação de superfícies de resposta altamente complexas.

O presente estudo realizou a calibração de modelos de rede de distribuição de água, em que os parâmetros da rede são estimados conjuntamente com os parâmetros do modelo de vazamento. Possíveis registros (válvulas) são localizados e suas condições de funcionamento determinadas, tendo-se como indicativo as informações obtidas junto à companhia de distribuição de água local. A aproximação proposta possibilitou que os dados obtidos durante os testes de vazamentos noturnos fossem utilizados diretamente no procedimento de calibração.

O estudo visa analisar também outras maneiras de codificar e desenvolver os operadores genéticos no sentido de torná-los computacionalmente mais eficientes e investigar técnicas de determinação da

rede de amostragem ótima de monitoramento com vistas à calibração, das quais a investigação considerada original constitui em determinar os sentidos de caminhamento de fluxos em trechos da rede mais prováveis minimizando a incerteza com o uso de conceitos de entropia.

Os estudos foram conduzidos em redes teóricas e principalmente em dois setores de redes da Cidade de São Carlos, das quais os dados de campo foram levantados por uma pequena equipe contendo o autor. Destaca-se aqui o fato de que os setores eleitos para estudo apresentam características distintas em termos de dimensões, materiais, idade, etc., apresentando como característica comum níveis elevados de vazamentos.

1.2- Objetivos do trabalho

Constituem objetivos do presente trabalho de pesquisa:

- Realização de campanhas de campo intensivas para aquisição de dados diretamente úteis ao modelo hidráulico;
- Estudo de técnicas metodológicas com considerações originais úteis para identificação dos pontos da rede ótima de amostragem onde as informações de pressão e vazão foram obtidas para tornar a calibração mais eficiente;
- Investigação de algoritmos genéticos mais eficientes visando a melhor implementação para o problema prático de calibração via AGs e
- A elaboração de uma rotina computacional para implementação dos algoritmos genéticos com o propósito de calibração de redes reais com vazamentos expressivos. Propõe-se aqui um modelo baseado em um processo iterativo de duas etapas em que os parâmetros de calibração e de vazamentos são determinados conjuntamente. Também são determinadas localizações e condições de operação de possíveis válvulas, tendo como indicativo as informações obtidas junto à companhia de distribuição de água local (SAAE - São Carlos, S.P.)

2- PROBLEMÁTICA DE CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO REAIS

2.1-) Introdução

As concessionárias de água brasileiras demonstram atualmente uma grande preocupação com o controle das perdas físicas, por implicar diretamente em receita e preservação de um recurso natural. O sucesso na redução dessas perdas pode ser obtido por exemplo mediante o emprego de válvulas redutoras de pressão (VRPs), que consiste em uma tecnologia de custo relativamente baixo. As dificuldades na identificação da melhor localização para as VRPs bem como das estratégias operacionais mais adequadas para elas são reflexos diretos do grau de desconhecimento dos sistemas e da conseqüente dificuldade envolvendo a simulação hidráulica dos mesmos.

Apesar do reconhecimento dos modelos matemáticos como ferramentas úteis à análise hidráulica das redes de distribuição de água para abastecimento, na prática, eles são pouco utilizados. Mesmo com aperfeiçoamentos e até sofisticacões dos modelos hoje existentes, de maneira a reduzir as hipóteses simplificadoras sobre os sistemas físicos reais e introduzir dispositivos de cálculo cada vez mais eficientes, diversas são as razões para que os profissionais da área requeguem-nos a segundo plano. Dentre elas, figura a inexistência de cadastros atualizados de maneira a refletir a realidade de campo; a falta de setorização ou setorização inadequada, muitas vezes pelo simples desconhecimento dos registros existentes ou a da condição operacional

dos mesmos; e o desconhecimento de grandezas características tais como níveis de reservatórios e demandas.

As redes existentes podem ser consideradas sistemas resultantes de intervenções de várias naturezas. Desde a implantação das mesmas, alterações substanciais das demandas ocorrem principalmente devido ao crescimento e à redistribuição da população ao longo de seu traçado, muitas vezes já submetida a expansões e ações de reabilitação (substituições, adições e limpeza); fatores como envelhecimento, desgaste e ocorrência de incrustações fazem com que características como as rugosidades e os diâmetros internos dos condutos sofram alterações substanciais; pressões internas excessivas e tráfego intenso promovem o surgimento de aberturas nos condutos, acessórios e junções, que passam a apresentar vazamentos.

Além das redes sofrerem as citadas intervenções, geralmente não se pode contar com o cadastro fidedigno de tais sistemas, dado que a atualização de informações pelas equipes de campo nem sempre é realizada. Assim, é muito comum não se dispor, por exemplo, de informações completas sobre a localização dos registros existentes e suas condições de funcionamento. Inspeções de campo podem complementar tais informações, mas é usual que os acessos aos registros desapareçam como consequência da execução de obras como o asfaltamento de vias públicas.

As evidências apontam, portanto, para a necessidade de calibração periódica de sistemas de distribuição, em termos de seus parâmetros mais relevantes do ponto de vista da sua avaliação hidráulica através de modelo matemático: diâmetros, comprimentos, rugosidades, demandas e parâmetros do modelo de vazamento. O processo de determinação de tais parâmetros, denominado calibração, é realizado minimizando-se os desvios entre os valores de pressão e vazão observados em campo e simulados via modelo matemático, embora alguns profissionais possam não reconhecê-lo

imediatamente, uma vez que costumam realizar tal tarefa fazendo uso do processo convencional de tentativa e erro.

A calibração de redes de distribuição de água é problema de grau de complexidade considerável, uma vez que muitas são as combinações potenciais de valores para os parâmetros a serem investigadas para que se possa obter um modelo considerado realístico.

Diversas são as dificuldades envolvidas no processo de calibração, dentre as quais destacam-se:

- A representação do sistema físico real e a identificação dos parâmetros a serem determinados pela calibração;
- A identificação dos locais de observação dos dados de campo mais adequada também chamada projeto de amostragem, para assegurar que sejam coletados dados efetivos ao propósito de calibração. Também pode ser considerado um problema de otimização, uma vez que visa a identificação de um número limitado de pontos de amostragem que produza parâmetros mais precisos, reduzindo o esforço da amostragem a um mínimo;
- Coleta de dados de campo e análise de consistência de tais informações.
- A formulação do problema de otimização com propósito de calibração; modelo hidráulico, maneira de enquadrar os vazamentos e função objetivo a ser otimizada, o grau de importância a ser atribuído aos dados relativos a diversos padrões de demanda e os requisitos que o modelo calibrado deve atender;
- A escolha da técnica de otimização mais adequada aos propósitos de calibração
- Calibração propriamente dita.

Com relação à calibração dos sistemas propriamente dita, a literatura especializada revela lacunas diversas, como, por exemplo, de que maneira estabelecer os pontos representativos do sistema para os quais informações de pressão e vazão devem ser levantadas para confronto com os respectivos

valores simulados, uma vez que os estudos já realizados não são conclusivos. A localização otimizada das VRPs e a estratégia de acionamento das bombas do sistema são conseqüências de um modelo hidráulico de previsão de comportamento. Serão, portanto, tão realísticas quanto o modelo empregado.

Neste trabalho, esforços foram concentrados na calibração propriamente dita visando enfocar os principais aspectos do problema, a literatura será revisitada com ênfase nos modelos de calibração e no estabelecimento da rede ótima de amostragem, nos seguintes itens.

2.2-) Modelos de calibração de redes de distribuição de água

O reconhecimento da necessidade de calibração faz com que esse assunto receba atenção especial na literatura, desde o trabalho clássico de SHAMIR & HOWARD (1977), em que se define calibração como sendo a determinação de características físicas e operacionais de um sistema existente e obtenção de dados tais que, quando aplicados ao modelo matemático da rede, produzam resultados realísticos.

Os procedimentos de calibração podem ser divididos basicamente em 3 categorias: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos, conforme hifenização adotada.

2.2.1-) Procedimento iterativo

O procedimento iterativo geralmente é baseado em tentativa e erro. Os parâmetros de calibração são ajustados a cada iteração usando comparações entre pressões e vazões medidas e simuladas. Os principais trabalhos que adotaram tal procedimento são indicados na Tabela 1.

Autor (ano)	Parâmetros	Redes testada
Rahal et al. (1980)	coeficiente de atrito	11 nós e 16 trechos e 27 nós e 39 trechos
Walski (1983)	rugosidades e demandas	7 nós e 9 trechos
Walski(1986)	rugosidades e demandas	271 nós e 307 trechos
Bhave (1988)	rugosidades e demandas	13 nós e 23 trechos

Tabela 1 – Procedimentos de calibração iterativos (De Schaetzen (2000))

O procedimento proposto por RAHAL et al. (1980) usa a análise de sensibilidades e foi aprimorado por WALSKI (1983) e BHAVE (1988). Ambos os procedimentos iterativos são conduzidos para ajustar rugosidades dos trechos e demandas dos nós. Na aproximação proposta por WALSKI (1983), a demanda total é variável, enquanto que na aproximação de BHAVE (1988), ela é constante.

O trabalho de WALSKI (1983) deu novo impulso aos estudos de calibração, estabelecendo alguns parâmetros práticos quanto à concordância entre o desempenho real e aquele simulado pelos modelos. Ele estabeleceu níveis aceitáveis para discordância entre os valores observados e simulados, que dependem da qualidade dos dados de pressão e nível e do esforço computacional do modelo. Fez recomendações de como proceder para calibrar modelos de redes, apresentando fórmulas para melhorar os valores de C (fator de Hazen - Wiliams).

WALSKI (1986) concluiu que se deve dar grande importância nos modelos de calibração em coletar dados bons e de qualidade para se ter um bom modelo de calibração

A proposta de BHAVE (1988) consiste em uma modificação da aplicação feita por WALSKI (1983) sendo utilizado um procedimento de calibração ajustando-se simultaneamente demandas nos nós e coeficientes de resistências das tubulações simultaneamente.

A Tabela 1 indica que a maioria das aplicações do procedimento iterativo são realizadas para redes de pequeno porte da literatura.

2.2.2-) Procedimento Explícito

Os métodos explícitos são também chamados analíticos ou diretos, e resolvem um conjunto de equações que descrevem o comportamento hidráulico da rede. Alguns dos mais importantes trabalhos da literatura usando procedimentos explícitos encontram-se resumidos na Tabela 2.

Autor (ano)	Parâmetro	Rede testada
Ormsbee & Wood (1986)	rugosidades e demandas	14 nós e 21 trechos
Boulos & Wood (1990)	rugosidades	3 nós e 5 trechos 19 nós e 30 trechos
Boulos & Ormsbee (1991)	rugosidades	13 nós e 21 trechos
Ferreri et al. (1994)	rugosidades	17 nós e 35 trechos

Tabela 2 – Procedimentos de calibração explícitos (De Schaetzen (2000))

ORMSBEE & WOOD (1986) apresentaram um método de calibração baseado em modelos de simulação, considerando o fator de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós idealizados constantes. Seguindo as recomendações de WALSKI (1986), eles apresentam uma aproximação que aparenta produzir bons resultados para uma extensa faixa de aplicações. Para demonstrar a viabilidade desta aproximação, duas formulações foram propostas. Na primeira formulação, as equações hidráulicas são escritas em termos do diâmetro da tubulação. Na segunda formulação, as equações hidráulicas são expressas em termos do diâmetro da tubulação e vazão global. Esta permite a introdução de restrições de continuidade ou energia na resolução do problema.

No procedimento explícito de ORMSBEE & WOOD (1986) os parâmetros a serem estimados são resolvidos diretamente como parte de um sistema não linear de equações que descreve a rede hidráulica. O sistema completo de equações consiste em equações de conservação de massa e de energia e equações adicionais baseadas em testes de campo. Este sistema complexo é resolvido explicitamente usando o método de Newton Raphson. O número de parâmetros desconhecidos é limitado ao número de medidas de campo disponíveis. Os parâmetros são normalmente agrupados se o seu número for maior que o número de dados de campo.

BOULOS & WOOD (1990) introduzem equações adicionais de conservação de massa e energia, estabelecendo restrições sobre as vazões em seções críticas dos condutos e as pressões mínimas em nós específicos. Um algoritmo explícito é apresentado para determinar diretamente uma variedade de parâmetros de projeto, operação e calibração para redes de distribuição de água. A solução do problema é baseada na reformulação das equações de equilíbrio da rede em regime permanente em termos dos parâmetros do sistema de tubulações considerado. Desde que estas equações são não-lineares, o método incremental de Newton Raphson é usado como procedimento básico de solução; procedimento que lineariza os termos não lineares e resolve o sistema de equações lineares simultâneas resultantes.

BOULOS & ORMSBEE (1991) propuseram um método de calibração semi-analítico capaz de manusear observações de testes de incêndio para condições distintas, visto que este trabalho parte do apresentado por ORMSBEE & WOOD (1986), onde determinam-se os parâmetros do problema com base em testes de incêndio realizados sob determinada condição operacional. Considerando-se a grande falha desta aproximação, visto que os testes de vazamentos devam ser realizados simultaneamente; o algoritmo testou um modelo de rede e mostrou eficiência computacional. Finalmente FERRERI et al. (1994) desenvolveram um método alternativo que ajusta

somente as rugosidades das tubulações, utilizando dados de pressões e vazões em diversos pontos de observação. Este trabalho é apresentado em maiores detalhes na revisão de rede de amostragem ótima, pois enfoca especialmente a problemática da localização de pontos ótimos de monitoramento para calibração.

Observou-se que os modelos de calibração explícitos somente foram testados para pequenas redes hidráulicas da literatura. Pode-se afirmar que algumas limitações dos procedimentos de calibração explícitos incluem o fato deles não avaliarem a confiabilidade dos parâmetros e requererem um número de parâmetros estimados igual ao número de medidas. Essa terceira restrição nem sempre é possível de ser respeitada. Surgiram então os métodos implícitos, para superar essa dificuldade.

2.2.3-) Procedimento implícitos ou inversos

Os procedimentos implícitos, mais conhecidos como métodos inversos, realizam a estimativa de valores para os parâmetros a partir da minimização dos desvios entre valores simulados hidráulicamente e dados observados de pressão e ou vazão, no caso específico de calibração de redes.

A Figura 1 ilustra o esquema geral do processo de inverso de calibração, onde se mostra a comparação entre respostas observadas e calculadas pelo modelo. Se as diferenças entre os valores atenderem critérios estabelecidos, considera-se o modelo calibrado, caso contrário modificam-se os parâmetros e obtêm-se novas respostas calculadas para serem comparadas.

Figura 1 - Esquema geral de calibração via modelos inversos

Para as redes de distribuição de água para abastecimento, a calibração pode ser realizada ajustando-se parâmetros como, por exemplo, rugosidades, diâmetros e comprimentos dos trechos, demandas nos nós, embora muitas referências consultadas da literatura.

A cada conjunto de parâmetros, o modelo fornece como respostas valores para grandezas que normalmente são vazões nos trechos e pressões nos nós da rede, os quais devem ser aproximados ao máximo das medidas realizadas em campo. A Tabela 3 ilustra alguns dos principais métodos de calibração implícitos apresentados na literatura.

Autor (ano)	Método de otimização	Parâmetro	Rede testada
Ormsbee (1989)	Método de Box	rugosidades e demandas	16 nós e 40 trechos
Lansey & Basnet (1991)	Método baseado no gradiente	rugosidades, demanda e aberturas de válvulas	- 13 nós e 21 trechos - 13 nós e 17 trechos - 16 nós e 40 trechos
Datta & Sridharan (1994)	Técnicas de análise de sensibilidades	rugosidades	87 nós e 94 trechos
Ligget & Chen (1994)	Levenberg-Marquardt	rugosidades, coeficiente de vazamento "Lumped" e velocidade acústica	7 nós e 11 trechos
Savic & Walters (1995)	Algoritmos genéticos	rugosidades	197 nós e 242 trechos
Reddy et al. (1996)	Gauss – Newton	demanda e coeficiente de atrito	- 7 nós e 11 trechos - 57 nós e 73 trechos - 87 nós e 94 trechos
Vitkovsky & Simpson (1997)	Algoritmos genéticos	rugosidades coeficiente de vazamento "Lumped"	- 7 nós e 11 trechos - 10 nós e 14 trechos
Walters et. al (1998)	Algoritmos genéticos	rugosidades	700 nós e 1043 trechos
Greco et al.(1999)	Programação linear	rugosidades	14 nós e 16 trechos
Todini et al. (1999)	Filtro de Kalman	rugosidades	9 nós e 12 trechos

Tabela 3 – Procedimentos de calibração implícitos (adaptado de De Schaetzen (2000))

ORMSBEE (1989) apresentou um procedimento que considera condições múltiplas de demanda, através de um algoritmo implícito para calibração de redes de distribuição de água. O modelo de calibração usa um modelo de otimização não linear para resolver uma rede genérica, ajustando os parâmetros rugosidades e demandas. O problema de calibração foi expresso como a minimização da diferença total entre os valores observados e previstos para vários pontos da rede, criteriosamente escolhidos, sob diferentes condições de carga. Tais valores podem incluir pressões, vazões ou níveis de

reservatórios. Matematicamente a função objetivo do problema a ser resolvido foi representada pela equação 1.

$$\min imize \sum_j \sum_i \left| \frac{O_{ij} - P_{ij}}{O_{ij}} \right| \quad (1)$$

Sendo que O_{ij} é o valor observado j durante a condição de demanda i e P_{ij} é o valor previsto para as mesmas condições. As variáveis de decisão básicas do problema incluem: demandas nos nós, rugosidades nos tubos, carga hidráulica nos nós de entrada da rede e dispositivos de controle de pressão.

O procedimento implícito proposto por LANSEY & BASNET (1991) constitui uma aproximação similar à apresentada por ORMSBEE (1989), onde parâmetros são estimados, minimizando uma função objetivo que representa uma diferença entre valores observados e simulados pelo modelo. Duas formulações não lineares para a função de erros foram desenvolvidas. A calibração é realizada para as variáveis : rugosidades, demandas e aberturas de válvulas.

Um método de análise de sensibilidades para calibração é apresentado por DATTA & SRIDHARAN (1994), na calibração dos fatores de atrito de Hazen-Willians para os trechos da rede. A função objetivo utilizada considera a minimização da soma do quadrado das diferenças entre valores de parâmetros computados e observados. A inclusão de pesos é feita nos desvios da função de aptidão. A aplicação é feita para uma rede de sistema de região metropolitana da Índia.

Os trabalhos mais recentes têm visado o problema do controle de vazamentos, que requer informações apuradas a respeito dos parâmetros físicos do modelo.

PUDAR & LIGGETT (1992) explicam que a calibração não substitui as mais tradicionais inspeções de vazamento, mas serve-lhe de guia suplementar. A detecção de vazamentos em redes de distribuição de água pode ser

executada resolvendo um problema inverso, usando medidas de pressão e vazão. O problema é formulado supondo-se áreas de orifícios equivalentes de possíveis fendas desconhecidas. A minimização das diferenças entre energias medidas e calculadas produz soluções por áreas. A qualidade dos resultados depende da localização das medidas. Ambos, localização e magnitude dos vazamentos são sensíveis à quantidade e à qualidade das medidas de pressão.

Recentemente, simulações em regime transiente de escoamento tem sido usadas para calibrar modelos hidráulicos. LIGGET & CHEN (1994) afirmam que dados transientes apresentam-se promissores, especialmente quando se dispõe de pouca informação, do sistema em estudo, permitindo simultaneamente a calibração do sistema e a determinação de vazamentos. LIGGET & CHEN (1994) aplicaram o método de Levenberg-Marquardt, que consiste um procedimento de busca local.

SAVIC & WALTERS (1995 e 1997) e WALTERS et al (1998) aplicaram Algoritmos Genéticos (AGs), para determinar as rugosidades em redes de distribuição de água, obtendo bons resultados. Eles empregaram uma função objetivo básica (equação 2) para um problema de calibração de redes de distribuição de água em regime permanente.

$$\min_k f(H, Q) = p_1 \sum_i (H_i^0 - H_i^p)^2 + p_2 \sum_j (Q_j^0 - Q_j^p)^2 \quad (2)$$

Onde: p_1 e p_2 são pesos associados a função de aptidão, H_i^0 e H_i^p são as cargas observadas e previstas para o nó i , respectivamente, e Q_i^0 e Q_i^p são os fluxos observado e previsto no tubo i .

REDDY et al. (1996) propuseram um método de calibração utilizando pesos na função objetivo com base no trabalho de DATTA & SRIDHARAN (1994). De acordo com as definições apresentadas no trabalho, as diferenças entre os valores observados e simulados das variáveis de decisão adotadas em problemas de redes de distribuição de água ocorrem principalmente por duas razões: o modelo não representa exatamente o sistema real ou ocorrem erros

de medida. Presumindo que o modelo represente corretamente o sistema real e somente erros de medidas sejam considerados, os autores propõem um método e determinação de pesos baseado na variância dos valores de pressões e vazões observados e simulados, através de uma sistemática de dois passos.

VITKOVSKY & SIMPSON (1997) apresentaram técnicas de determinação conjunta de parâmetros de calibração e áreas de tubulação em que ocorrem vazamentos em regime de transiente hidráulico. A ferramenta de busca utilizada são os algoritmos genéticos.

GRECO et al. (1999) propôs uma fórmula original de função erro. Este procedimento minimiza as diferenças entre rugosidades estimadas e calibradas sujeitas a restrições de pressão.

TODINI (1999) apresenta uma técnica de calibração para determinação de coeficientes de rugosidades baseada em um procedimento inverso. A formulação apresentada converte o problema em linear, para que a aproximação do Filtro de Kalman seja desenvolvida. A aplicação é realizada para uma rede pequena para mostrar as propriedades de convergência do método proposto.

Um trabalho importante e não acrescentado originalmente na Tabela 3 é o de TUCCIARELLI et al. (1999), que propuseram a estimativa da perda de água em redes de distribuição através de um processo iterativo realizado em duas etapas. A primeira etapa consiste na estimativa dos parâmetros do modelo de simulação da rede. Essa estimativa é realizada através da minimização do somatório dos quadrados das diferenças entre os valores observados e calculados de carga hidráulica e vazão, tendo como dados conhecidos o número de nós e as características principais da rede em questão como comprimentos e diâmetros. Dentre os parâmetros estimados estão o fator e o expoente de vazamentos. A segunda etapa corresponde à identificação das aberturas das válvulas da rede. O modelo empregado assume que os vazamentos ocorram nas vizinhanças dos nós, admitindo que as perdas de água

sejam proporcionais às áreas de superfície dos condutos onde ocorram vazamentos.

As variáveis de decisão do problema de otimização são: a demanda total P , o expoente de perda a e o fator de perda θ_i ; e os coeficientes de rugosidade ε_{ij} . Admite-se que a distribuição espacial da demanda pode ser estimada com algum grau de confiança, a partir do conhecimento da população e dos fatores fornecidos para cada nó.

Reduziu-se o nível de parametrização do sistema, assumindo que os fatores de rugosidades e de perdas por vazamentos seja homogêneas para determinadas áreas.

A aplicação foi feita para duas redes uma hipotética e uma real da Cidade de Palermo na Itália.

2.2.4-) Algumas aplicações de modelos de calibração recentes

Os principais trabalhos de calibração foram mencionados. Entretanto, considera-se relevante apresentar aqui alguns trabalhos mais recentes.

GAMBALE (2000) estudou a calibração de redes de distribuição de água utilizando os AGs como ferramenta de busca. As variáveis do problema a serem determinadas foram os coeficientes de rugosidades dos trechos da rede de forma a minimizar as diferenças entre os valores de pressões observados e simulados. A aplicação foi realizada para uma rede hipotética com 8 nós e 10 trechos.

AINOLA et al. (2000) propuseram um método de calibração de rugosidades de redes de distribuição de água com o intuito de melhoria dos tradicionais métodos, onde as rugosidades são ajustadas através do processo de otimização linear e minimização do quadrado das diferenças entre valores de pressão e vazão simulados e medidos. Um algoritmo para distribuição de perdas é proposto, sendo que para o cálculo do vazamento da tubulação uma

fórmula empírica que considera o comprimento do tubo, a média das pressões e alguns coeficientes é usada. Os tubos com rugosidades similares são agrupados, o método foi aplicado para um modelo de rede da Cidade de Tallinn.

De SCHAETZEN (2000) trabalhou com calibração de redes de distribuição de água para abastecimento, usando Algoritmos genéticos. Investigou o problema de amostragem ótima, chegando a propor e desenvolver métodos de localização de pontos estratégicos para monitoramento de pressão. Este trabalho constitui uma das principais referências utilizadas aqui, pois se trata de uma obra atual e bastante completa relativa aos tópicos aqui tratados.

RIGHETTO (2001) apresentou um modelo hidráulico acoplado a um modelo de otimização baseado nos AGs para calibração de redes de distribuição de água. Os parâmetros ajustados foram às vazões nodais, os diâmetros e os coeficientes de rugosidades das tubulações de forma a minimizar as diferenças entre valores de pressão e vazão observados e simulados. A aplicação foi realizada para uma rede hipotética com 6 nós e 7 trechos.

CHEUNG (2001) investigou três métodos clássicos de calibração, que foram implementados e comparados utilizando redes hipotéticas. Os três métodos são os apresentados por: WALSKI (1983), BHAVE (1988) e o método de BOULOS & WOOD (1990). Como resultados concluiu-se que os dois primeiros métodos apresentaram os melhores resultados considerando o somatório das diferenças entre os valores observados e os valores calculados. O último método explícito apresentou os maiores desvios, porém permitiu incorporar outras variáveis de decisão no processo de calibração.

LANSEY et al. (2001) propõem um método heurístico baseado na sensibilidade que é desenvolvido para estudar a incerteza causada por erros de medidas na calibração de redes de distribuição de água. O procedimento considera três componentes do processo de modelagem: estimativa de

parâmetros, avaliação da calibração e coleta de dados. Considera a incerteza das medidas, seus impactos sobre os parâmetros do modelo e o efeito dessas incertezas sobre os dados de saída produzidos, sendo que a incerteza do parâmetro é propagada para a incerteza da previsão do modelo. A metodologia fornece assistência nas estratégias de coleção de dados.

LINGIREDDY & ORMSBEE (2002) propõem um modelo de otimização não linear para calibração de redes de distribuição de água com o uso dos algoritmos genéticos. A aplicação do modelo é feita para duas redes sintéticas. As variáveis a serem determinadas incluem as rugosidades, a distribuição espacial e temporal de demanda espacial e temporal. Um estudo é feito sobre as probabilidades de recombinação de mutação, constatando a necessidade de altas taxas de recombinação e baixas de mutação.

KAPELAN et al. (2002) apresentaram um método híbrido de calibração de redes de distribuição de água em que a combinação de dois métodos de busca é realizada. Os autores revisam que vários métodos usados para resolver o problema de calibração incluindo busca local, tipicamente métodos do tipo gradiente, Levenberg- Marquardt (LM), ou métodos de busca tais como os Algoritmos genéticos (AGs) são utilizados. Depois de identificar as vantagens e desvantagens dos métodos de busca LM e AGs, um novo método híbrido é desenvolvido utilizando as vantagens de ambos de forma combinada. O novo método, denominado HGA (Algoritmos genético híbrido) é então aplicado para um estudo de caso, para verificar a habilidade em determinar soluções ótimas e comparar o desempenho com os métodos dos AGs e LM convencionais. O artigo mostra que o desempenho do HGA é melhor que os dois métodos individualmente testados.

2.3-) Modelos de vazamentos

Dos principais modelos sugeridos para possibilitar que as perdas por vazamentos fossem incluídas explicitamente nos modelos hidráulicos das redes de abastecimento de água, podem-se destacar os trabalhos de GERMANOPOULOS & JOWITT (1989), JOWITT & XU (1990), TUCCIARELLI et al. (1999) e MARTINEZ et al. (1999).

A bibliografia apresenta diversos trabalhos (GERMANOPOULOS & JOWITT (1989); JOWITT & XU (1990); PEZZINGA (1994); REIS et al. (1997); PEZZINGA & GUELI (1998); VAIRAVAMOORTHY & LUMBERS (1998)) que se utilizam modelos de vazamentos, sobre a localização otimizada de válvulas de controle de pressão, visando minimizar as perdas por vazamentos, utilizando um modelo do tipo pressão x vazamento na forma:

Estes dois primeiros trabalhos são os mais utilizados na determinação de vazamentos, sendo sua formulação descrita nos modelos hidráulicos no capítulo de materiais e métodos.

MARTINEZ et al. (1999) analisaram o sistema de distribuição de água da Cidade de Valência, na Espanha, responsável por um fornecimento para 1500000 pessoas ao longo de 1500 Km de rede. O modelo de calibração dinâmico proposto foi explorado para diferentes objetivos: simulações sob diferentes condições de operação. O modelo proposto por MARTINEZ et al. (1999) apresentou progressos na medida em que incorporou vazamentos distribuídos ao longo dos condutos e localizados nas junções dos condutos.

PEZZINGA (1994) propôs ainda o uso de lógica *Fuzzy* para a determinação otimizada de válvulas redutoras de pressão, considerando incertezas nas demandas.

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.

VAIRAVAMOORTHY & LUMBERS (1998) otimizam as aberturas das válvulas em redes de distribuição de água. Esta metodologia envolve a técnica de solução baseada em uma solução quadrática seqüencial. Tal metodologia foi proposta para contornar as dificuldades inerentes à aplicação da teoria linear, conforme sugerida por GERMANOPOULOS & JOWITT (1989) e JOWITT & XU (1990).

2.4-) Rede de amostragem ótima em redes de distribuição de água

A calibração de redes de distribuição de água geralmente requer observações de campo, de parâmetros tais como pressão e vazão, com o intuito de comparação com os seus respectivos valores simulados, na determinação de características da rede como: rugosidades, diâmetros, demandas etc...

Em se tratando de redes já existentes, a aquisição de dados geralmente torna-se muito dispendiosa, havendo a necessidade de uma equipe de trabalho e dispositivos especiais para realização de medidas, além de harmonia com o órgão responsável pelo abastecimento municipal, para que eventuais interferências não prejudiquem o abastecimento hídrico local.

Diante de tais dificuldades, a rede de amostragem é constituída de um número reduzido de pontos de observação. Eles devem, portanto, ser escolhidos de maneira a captar o máximo de informações possível.

Alguns autores tentaram estabelecer uma sistemática de identificação da rede de monitoramento ótima e, embora não se tenha chegado a um consenso, grande parte das pesquisas já realizadas admitem a sensibilidade como uma medida de eficiência na resolução do problema.

Algumas experiências na determinação pontos de monitoramento para calibração em redes de distribuição de água para abastecimento são apresentadas no item 2.4.1., cujo principal trabalho que serviu de base foi a obra de De SCHAEZTEN (2000).

2.4.1-) Métodos de determinação de rede de amostragem ótima em redes de distribuição de água

Diversos pesquisadores investigaram os métodos de determinação da rede de amostragem ótima em redes de distribuição de água, ou seja, a localização ótima de pontos de monitoramento chamada projeto de amostragem. O problema geralmente consiste em definir o local e o número de pontos de monitoramento, sendo que o objetivo é coletar dados de campo mais reveladores a serem usados pelo modelo hidráulico de calibração.

Destaca-se que as aplicações de projetos de amostragem foram também realizadas em outras áreas como por exemplo, na hidrologia por KNOPMAN & VOSS (1987), sendo que em muitas das aplicações existentes baseadas na classificação dos locais de medidas decrescendo de acordo com o mérito do problema em estudo.

PUDAR & LIGGETT (1992) desenvolveram uma aproximação para detectar perdas em um sistema de distribuição de água usando medidas de campo. Eles concluíram que a localização e a magnitude dos vazamentos são sensíveis à qualidade e quantidade dos pontos de medida de pressão. Concluíram também que “uma matriz de sensibilidade é a chave para decidir onde fazer as medidas”. A matriz de sensibilidade é normalmente uma matriz composta das derivadas parciais de primeira ordem também chamada de jacobiana.

LEE & DEININGER (1992) desenvolveram um método de maximização da cobertura dos locais de pontos de monitoramento em sistema de distribuição de água por monitoramento da qualidade da água. O problema foi formulado como otimização de programação inteira e testado para duas redes.

YU & POWELL (1994) usaram a análise da matriz de covariância para seleccionar pontos de monitoramento. O problema de localização dos pontos de

medidas foi formulado como otimização multi-objetivo. O número e o custo total das medições foram minimizados, enquanto que a precisão das variáveis de estado foi maximizada. O método foi testado para duas redes, uma de 8 trechos e 6 nós e a segunda de 41 trechos e 34 nós.

FERRERI et al. (1994) propuseram uma aproximação baseada na matriz de sensibilidade para classificar trechos e nós mais apropriados para monitoramento de vazões e pressões. A aproximação foi testada em uma rede de 35 trechos e 16 nós .

BUSH & UBER (1998) propuseram três métodos baseados na sensibilidade derivados do critério “*D-optimality*”, para classificar locação de medidas de pressão e de traçadores em sistemas de distribuição de água para estimativa de valores de rugosidades. Este critério considera um volume de uma região de confiança onde é realizada a minimização deste volume, o que servirá de base para se ter precisão nos valores estimados. Eles propuseram o método Max sum, Max Min e Weight sum, usando a matriz de sensibilidade. Os métodos foram aplicados para uma pequena rede de 27 trechos e 16 nós.

De SCHAEZTEN et al. (1999) utilizaram dois modelos de calibração de redes de distribuição de água, com o propósito de verificar a localização e o número de pontos de monitoramento de pressão necessários para calibração. A ferramenta de busca utilizada foram os algoritmos genéticos e um estudo de caso foi realizado na Inglaterra.

A análise é realizada em dois estágios. No primeiro estágio, o conjunto completo de pontos de monitoramento é empregado para realização da calibração. Três condições de demanda foram consideradas, representando a noite, pico e condições médias durante o período de 24h. O modelo assim produzido é definido como de referência, e provê os valores para as cargas hidráulicas nos nós de referência, que totalizam 4 e 16 nós, para o primeiro e segundo modelo, respectivamente. Então, diferentes conjuntos de dados (cinco

conjuntos reduzidos) de campo reduzidos são usados para calibração através de AGs, e as respostas comparadas nos nós de referência.

Os desvios máximos e médios das previsões em relação às do modelo de referência foram determinados, permitindo conclusões importantes tais como a possibilidade de reduzir sensivelmente o número de pontos de monitoramento, sem comprometer a qualidade das previsões.

AHMED (1999) desenvolveu um método heurístico baseado na sensibilidade derivado do critério da “D-optimality”, para analisar o impacto dos testes de campo sobre os parâmetros de modelo. Um procedimento heurístico de três etapas é desenvolvido para previsão da variância em um modelo de previsão, dada a incerteza das medidas de campo. O método é aplicado a uma pequena rede de 16 trechos e 12 nós.

PILLER et al. (1999) apresentaram uma nova forma de definir os pontos ótimos de monitoramento e variáveis de estado. O método consiste em minimizar a influência dos erros de medidas. A solução é determinada usando um algoritmo denominado *Greedy Algorithm*. O método proposto foi testado para uma rede de distribuição real de 214 trechos e 163 nós.

MEIR & BARKDOOL (2000) também investigaram o problema de localização de pontos ótimos de monitoramento para calibração de redes de distribuição de água. Eles desenvolveram um método de busca baseado nos algoritmos genéticos para encontrar a combinação de abertura de hidrantes. A aplicação é feita para uma rede de 400 trechos e 350 nós. Os resultados obtidos foram validados por comparação com aqueles obtidos por enumeração completa.

Os métodos de determinação da rede de amostragem ótima que mais despertaram interesse do autor e que foram utilizados no estudo são os apresentados por De SCHAETZEN (2000) e descritos a seguir.

Três diferentes métodos são apresentados para selecionar localizações de pontos de monitoramento de pressão com vistas à calibração em termos dos coeficientes de rugosidades.

Os dois primeiros métodos são baseados nos Algoritmos “*Shortest Path algorithms Logic*” (algoritmos de menor caminho) para classificar localizações para monitoramento. Assume-se que qualquer nó da rede hidráulica possa ser selecionado para compor a rede de amostragem e o número total de pontos é conhecido. Estes métodos são baseados na teoria dos grafos. Para o caso de um único reservatório ou fonte, na primeira iteração ou para cada classificação são determinados todos os possíveis caminhos do fluxo do reservatório a cada nó, do qual o menor é determinado. Quando calculados os menores caminhos para todos os nós, determina-se qual nó tem maior distância até o reservatório. Este nó é o primeiro a ser classificado. Dois métodos são usados a partir da segunda iteração. No primeiro, a partir deste nó selecionado é adicionado um trecho imaginário de rede de comprimento zero que é unido ao reservatório. No segundo método, ao conjunto de trechos que conecta o reservatório ao primeiro nó selecionado são dados comprimentos zero. A partir daí todas as iterações são feitas e os nós são classificados de acordo como esquema da Figura 2 a seguir:

Figura 2 – Fluxograma dos algoritmos de “Shortest Path algorithms Logic” utilizados por De SCHAETZEN (2000)

Complementa-se que quando se trata de mais de um reservatório como fonte de alimentação, o autor utiliza o conceito de “super fonte”, ou seja, uma fonte única fictícia representativa das outras fontes é empregada.

O terceiro método apresentado por De SCHAETZEN (2000) para resolver o problema de determinação da rede de amostragem ótima pode ser expresso como um problema de otimização, segundo o qual os pontos a serem determinados devem atender ao critério de maximização da sensibilidade das pressões às rugosidades dos condutos e maximização de uma função de entropia, através das funções explicitadas a seguir.

- Critério da Sensibilidade (F_1)

A matriz jacobiana definida como uma matriz de variação das cargas com perturbação das rugosidades, mede a sensibilidade como uma medida de quanto a carga hidráulica no nó i varia devido à perturbação no valor do coeficiente de rugosidade no conduto j , a matriz correspondente é de ordem $n \times m$, onde n representa o número de nós e m indica o número de condutos. Cada elemento dessa matriz pode ser aproximado por diferenças finitas com base no valor C de rugosidade, como:

$$\left| \frac{\partial H_i}{\partial C_j} \right| \cong \left| \frac{H_i(C_j) - H_i(C_j^*)}{C_j - C_j^*} \right| \quad \forall i \in [1, n], \forall j \in [1, m] \quad (3)$$

onde: $H_i(C_j)$ = carga calculada do nó i assumindo a rugosidade C_j do tubo j ; $H_i(C_j^*)$ = carga calculada do nó i alterando a rugosidade C_j do tubo j para C_j^* . No estudo $C_j^* = C_j + 1$ é utilizado para todos os condutos (LIGGETT & CHEN (1995)).

As derivadas parciais representadas pela equação 3 expressam numericamente a variação da carga do nó i para dada variação da rugosidade do nó j , ou seja a sensibilidade de H_i com o respectivo C_j . O número de simulações hidráulicas

requerida para produzir a matriz de sensibilidade é $m+1$, sendo m o número total de condutos.

Assim, a primeira função a ser maximizada é definida como:

$$F_1(x) = \sum_n^m a_j \quad \text{onde} \quad a_j = \text{Max}_{i \in X_k} \left| \frac{\partial H_i}{\partial C_j} \right| \forall j \in [1, m] \quad (4)$$

O limite superior de F_1 , definido como F_{1max} , é deduzido da matriz de sensibilidade, sendo definido por $k=n$; onde k é o número de pontos a serem monitorados. O limite inferior, definido como F_{1min} é assumido como 0.

- Critério da Entropia Máxima (F_2)

Shannon (1948) foi quem primeiro usou entropia como uma medida da incerteza relacionada à termodinâmica. De acordo com De SCHAETZEN (2000), no mesmo ano Shannon introduziu entropia como uma medida probabilística da incerteza, quando desenvolveu um novo meio de medir os níveis de informação ou incerteza relativos a diferentes distribuições probabilísticas. Ele encontrou que a única função matemática que poderia ser usada como uma medida geral de incerteza era:

$$S(p) = - \sum_{j=1}^m p_j \ln p_j \quad (5)$$

Onde $S(p)$ é a função de entropia e $p=(p_1, p_2, \dots, p_m)$ é uma distribuição de probabilidade tal que:

$$1 \geq p_j \geq 0 \quad \forall j \in [1, m] \quad \text{e}$$

$$\sum_{j=1}^M p_j = 1 \quad (6)$$

Recentemente a aplicação de entropia para problemas de otimização em engenharia vem ganhando popularidade.

O critério da entropia máxima pode ser posto através da equação 7.

$$F_2(x) = -\sum_{j=1}^m p_j \ln p_j \quad \text{onde} \quad p_j = \frac{a_j}{\sum_{j=1}^m a_j} \quad \forall \quad j \in [1, m] \quad (7)$$

O limite superior de F_2 , definido como $F_{2\max}$, é igual a $\ln(m)$, o limite inferior, definido como $F_{2\min}$ é assumido como 0.

FUNÇÃO DE APTIDÃO (F)

Uma vez que as equações F_1 e F_2 constituem objetivos conflitantes, elas podem ser combinadas para produzir uma solução de compromisso, definida como a solução mais próxima da ideal ($F_{1\max}$, $F_{2\max}$), na forma:

$$F(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 w_i \left(\frac{F_i(x) - F_{i\max}}{F_{i\min} - F_{i\max}} \right)^2} \quad (8)$$

onde w_i é o coeficiente de peso da função i , $F_i(x)$ o valor da função i e $F_{i\min}$ e $F_{i\max}$ os limites inferiores e superiores da função i , respectivamente.

A rotina de avaliação da função de aptidão inicialmente realiza a simulação hidráulica da rede obtendo-se a carga hidráulica em cada nó, utilizando as rugosidades esperadas para uma rede em estudo, sem alterações. Então à rugosidade de cada trecho da rede sofre uma perturbação unitária no seu valor original. A cada alteração da rugosidade original (tendo as rugosidades dos demais trechos os seus valores mantidos) uma simulação

hidráulica é realizada, determinando-se as cargas hidráulicas para cada nó da rede. De posse de tais valores, a matriz de sensibilidades tem seus valores calculados, bem como nas equações 4, 7 e 8 já explicitadas.

Os métodos são aplicados para uma rede de distribuição de água, que constituída de 511 trechos e 422 nós alimentada por uma única fonte. Foram estabelecidos 14 pontos de monitoramento de pressão distribuídos na rede.

Apesar de o trabalho de De SCHAETZEN (2000) constituir a principal referência utilizada, mais um trabalho atual com relação ao assunto aqui tratado são descritos a seguir.

WOO et al. (2001) apresentaram um novo método para se determinar pontos ótimos de monitoramento em sistemas de distribuição de água, em que a qualidade de água é incorporada ao modelo de otimização com um método diferente dos apresentados em pesquisas anteriores, aqui a qualidade da água nos nós é determinada utilizando o EPANET.

3- CONSIDERAÇÕES E REVISÃO DE CONCEITOS DE ENTROPIA

3.1-) Fundamentos sobre o conceito de entropia

Baseado em De SCHAEZTEN (2000), podemos fazer algumas considerações sobre entropia. Entropia é mais comumente associada com a segunda lei da termodinâmica, que define “a entropia ou quantidade de desordem em qualquer sistema termodinâmico conservativo fechado tende a ser máxima”.

Foi SHANNON (1948) quem primeiro usou entropia como uma medida de incerteza relacionada à termodinâmica, que conduziu ao Princípio da Entropia Máxima de JAYNES (1957), o qual abriu uma larga faixa de novas aplicações em todas as áreas da ciência, incluindo os problemas de distribuição de água.

- Função entropia de Shannon

Para melhor exemplificar, pode-se usar o exemplo do lançamento de uma moeda não viciada, definindo-se as probabilidades de se obter cara ou coroa por $p(ca)$ e $p(co)$ e ambas iguais a 0,5.

Mas, se a probabilidade de se ter cara é alta, por exemplo, $p(ca)=0,9$, então a ocorrência de cara é quase garantida. É, portanto, razoável dizer que a ocorrência de cara provê pouca informação e que a incerteza associada a ela é

pequena. Grande quantidade de informação será atribuída à observação de coroa e sua incerteza é grande.

A entropia como uma medida probabilística de incerteza foi introduzida por SHANNON (1948) quando ele desenvolveu uma nova maneira de medir os níveis de informação ou incerteza relativos às diferentes distribuições probabilísticas. Shannon encontrou que a única função matemática que poderia ser usada como uma medida geral de incerteza é a equação 9. Esta mesma equação é apresentada em um formato um pouco diferente nas equações 5 e 6 do capítulo anterior por um dos métodos propostos por De SCHAETZEN (2000) :

$$S(p) = -K * \sum_{j=1}^M p_j \ln p_j \quad (9)$$

Onde $S(p)$ é a função de entropia, K é uma constante positiva arbitrária e $p=(p_1, p_j, \dots, p_M)$ é uma distribuição de probabilidade tal que:

$$1 \geq p_j \geq 0 \quad \forall j \in [1, M]$$

$$\sum_{j=1}^M p_j = 1$$

Pode-se assumir que a constante K tem seu valor igual a 1.

A função entropia de Shannon representa a medida da quantidade de informação ou incerteza contida em uma distribuição probabilística $p=(p_1, p_j, \dots, p_M)$.

- Princípio da entropia máxima de Jaynes

Jaynes introduziu o princípio da entropia máxima. Para garantir que

nenhum erro seja introduzido ao tirar conclusões probabilísticas, Jaynes acrescentou que ao realizar inferência com base em informações parciais, devemos usar aquela distribuição probabilística que tem a máxima incerteza. Essa é a única suposição não errônea que podemos fazer; o uso de qualquer outra distribuição probabilística conduziria a uma suposição arbitrária de informação que por hipótese não temos.

Matematicamente o princípio da Máxima Entropia de Jaynes é similar ao de maximização de Shannon, ao qual são adicionadas outras restrições.

- Máxima entropia aplicada a redes de distribuição de água

O princípio da máxima entropia foi aplicado em muitos campos da ciência pela simplicidade de produzir soluções para problemas onde as informações disponíveis eram incompletas. As aplicações do conceito de entropia em redes de distribuição de água surgiram no início dos anos 90.

A aplicação da máxima entropia de Jaynes em redes de distribuição de água é descrita abaixo. Podem-se citar aplicações de TEMPLEMAN (1989), AWUMAH (1991) e TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993)

3.2-) Entropia associada a incertezas de fluxos em redes de distribuição de água

Um trabalho relativo a entropia que chamou a atenção foi o trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993). Eles propõem a determinação da estimativa da máxima entropia relativa à vazão para redes de distribuição de água considerando uma única fonte de alimentação.

Propõem que para redes malhadas, e todas as direções de fluxo especificadas, a entropia de Shannon pode ser escrita por:

$$S/K = S_0 + \sum_{n=1}^N P_n S_n \quad (10)$$

onde: S é a entropia de Shannon, K uma constante arbitrária positiva, e P_n , $n=1, \dots, N$, a probabilidade do fluxo chegar ao nó n , $n=1, \dots, N$, onde N é o número total de nós da rede. O valor de P_n deve ser obtido da equação (15). Os outros termos são definidos abaixo. A entropia relativa a uma entrada externa corresponde a S_0 , onde:

$$S_0 = \sum_{i \in I} p_{0i} \ln p_{0i} \quad (11)$$

Na equação acima, I é o conjunto de todos os nós reservatórios (ou fonte de abastecimento) e p_{0i} é a proporção do fornecimento total para a rede relativo ao reservatório i . Este valor é dado por:

$$p_{0i} = \frac{q_{0i}}{\sum_{i \in I} q_{0i}} = \frac{q_{0i}}{T_0}, \forall i \in I \quad (12)$$

onde q_{0i} , é a entrada de vazão interna do nó i e T_0 é o fornecimento ou demanda total. Na equação 10, S_n , $n=1, \dots, N$, é a entropia da vazão de saída, incluindo qualquer demanda do nó n , $n=1, \dots, N$. Esta é definida pelas equações (13) e (14) em que p_{nj} é a fração de T_n trazida do trecho n_j , onde T_n , $n=1, \dots, N$, é a vazão externa total, incluindo qualquer demanda, do nó n , $n=1, \dots, N$. Também p_{nj} , $\forall n, j=0$, representa a fração de T_n que satisfaz o consumo do nó n .

$$S_n = - \sum_{nj \in ND_n} p_{nj} \ln p_{nj}, \forall n \quad (13)$$

O conjunto ND_n , $n=1, \dots, N$, consiste de todas as vazões de saída, incluindo qualquer demanda do nó n , $n=1, \dots, N$

$$P_{nj} = \frac{q_{nj}}{\sum_{nj \in ND_n} q_{nj}} = \frac{q_{nj}}{T_n}, \forall n, \forall nj \in ND_n \quad (14)$$

O símbolo q é usado para a vazão de entrada interna ou externa e para a vazão de saída. Para uma vazão de entrada externa, o primeiro subscrito deverá ser zero e o segundo, o nó da fonte. Também o segundo subscrito para a demanda será zero enquanto que o primeiro número deverá corresponder ao nó. De outra forma q_{ij} , $i, j=1, \dots, N$, é a vazão do trecho ligado pelos nós i e j . Em outro trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (2) estabeleceu-se que a equação (15) é conveniente para as probabilidades nos nós P_n , $n=1, \dots, N$

$$P_n = T_n / T_o, \forall n \quad (15)$$

- Descrição dos algoritmos utilizados por TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993)

Abaixo são apresentados os algoritmos usados por TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993); ressalta-se que estes foram implementados servindo de base para o desenvolvimento trabalhos e são mostrados em maiores detalhes no capítulo 8 na forma de fluxogramas.

a-) Algoritmo de numeração de nós

- 1- Numerar a fonte com o valor $n = 1$;
- 2- Acrescentar ao valor de n o valor de 1 ($n=n+1$);
- 3- Selecionar qualquer nó na vizinhança do nó anterior já numerado e assumir o valor n ;
- 4- Se $n = N$, terminar, senão continuar até que todos os nós sejam numerados.

5- Volta para o passo 2.

Obs: N= número total de nós; n nó atual

b-) Algoritmo para determinação do peso em cada nó

1 - Atribuir ao nó n do reservatório (fonte) peso igual a 1;

2 - Passar para próximo nó $n=n+1$;

3 - Calcular NP_n :

$$NP_n = \sum NP_k$$

4 - Se $n= N$, finaliza, senão, continuar;

5 - Voltar ao passo 2.

Obs: NP é o peso associado aos nós; os índices n é o nó atual e k o nó conectado ao nó n.

c-) Algoritmo para determinação da vazão

1 - Iniciar com o nó n do total de nós N;

2 - Calcular T_n :

$$T_n = \sum q_{nj}$$

3 – Calcular $q_{k,n}$:

$$q_{k,n} = T_n * \frac{NP_k}{NP_n}$$

4 - Se $n=1$, ir para o passo 7, senão continuar.

5 – Assumir $n = 1$.

6 – Voltar ao passo 2.

7 – Calcular a entropia, se necessário. Finalizar.

4- ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1-) Introdução

Na tentativa de atender ao quesito robustez, ou, seja, eficiência e eficácia, das técnicas de análise de sistemas, observa-se uma crescente utilização de ferramentas matemáticas novas, nas mais diversas áreas do conhecimento, que têm em comum o objetivo de imitar matematicamente mecanismos da natureza, robustos por excelência. Tais métodos podem ser denominados técnicas de auto-aprendizagem, na medida em que tomam por base mecanismos naturais para extrair informações e produzir resultados superiores aqueles obtidos via métodos convencionais de modelagem causa-efeito, promovendo assim uma verdadeira revolução na descrição e controle de processos. Dentre as novas ferramentas matemáticas que vem revolucionando o conhecimento humano, pode-se destacar as redes neurais artificiais, a técnica de *simulated annealing* e as técnicas de programação evolucionária.

Os Algoritmos Genéticos (AGs), são provavelmente os algoritmos mais conhecidos da programação evolucionária desenvolvida por RECHENBERG (1973), na Alemanha, em paralelo com HOLLAND (1975) e seus colaboradores nos E.U.A., baseiam-se na seleção natural e genética populacional, onde são observados mecanismos como a sobrevivência e reprodução preferenciais dos indivíduos mais aptos da população, na manutenção de uma população com diversos membros, na herança de informação genética dos pais e na mutação ocasional dos genes.

A evolução natural ocorre nos cromossomos que são elementos microscópicos das células nucleares que transmitem informações hereditárias

em forma de genes. Os AGs imitam matematicamente tais mecanismos. Assim, em analogia com a natureza, um cromossomo, referido como *string*, representa uma possível solução do problema em mãos. Cada *string* é formado por uma série de caracteres ou traços, equivalentes aos genes biológicos, representando um código do conjunto de variáveis de decisão, sendo uma solução codificada dentro do conjunto de soluções denominado população.

A aplicação de AGs envolve a escolha apropriada do alfabeto de representação das variáveis de decisão do problema. Apesar das diversas possibilidades de codificação, GOLDBERG (1989) sugeriu que o desempenho de um AG é ótimo quando uma codificação binária é empregada. Entretanto muitos problemas requerem representações diferentes, incluindo a codificação em números reais para as suas variáveis.

Os AGs evoluem a partir de uma população inicial de *strings*, ou soluções representando um conjunto de possíveis soluções geradas aleatoriamente, sendo que uma geração ou iteração de algoritmos genéticos é a população (conjunto de soluções) em dado instante do processo de otimização.

A aplicação repetida de operadores genéticos busca soluções eficientes para o problema. Aquelas soluções com valores maiores para a função objetivo são mantidas, enquanto as de valores menores são descartadas. As vantagens dos AGs sobre os métodos de busca tradicionais incluem o fato de que eles retêm uma amostra “bem adaptada” da população, aumentando a chance de atingir o ótimo global. Eles podem tratar diferentes tipos de variáveis tais como variáveis discretas. Assim, por exemplo, os diâmetros das tubulações não necessitam de arredondamentos posteriores. Tais algoritmos consideram regras probabilísticas de transição de um conjunto de soluções para outro, e têm a flexibilidade de admitir muitos tipos de funções objetivo, sem exigir que elas sejam contínuas ou possuam derivadas.

Os AGs geralmente compreendem três operadores: reprodução, recombinação e mutação. A reprodução é o processo através do qual *strings*

são copiados na próxima iteração de AG de acordo com o valor da função de aptidão correspondente, um processo de seleção que resulta na sobrevivência dos indivíduos mais capazes. Na sua forma mais simples a recombinação realiza a troca parcial de segmentos correspondentes entre dois *strings* pais produzindo dois *strings* filhos. A mutação é a degeneração ocasional dos valores, permitindo a introdução de novas características às populações.

SIMPSON et al. (1994), MCKINNEY & LIN (1994), E RITZEL & EHEART (1994) são exemplos de estudos que empregaram com sucesso AGs para resolver problemas complexos de recursos hídricos. Os trabalhos pioneiros de que se tem notícia aplicando AGs no projeto e manejo de redes de água enfocaram o projeto de redes de distribuição de água foram CEMBROWICZ & KRAUTER, (1977); WALTERS & LOHBECK, (1993) com o uso de algoritmos similares para o projeto de sistemas de esgotos, outros trabalhos seguiram-se a estes, aplicando AGs, inclusive para realizar calibração de modelos de redes de distribuição de água conforme descrito nos capítulos 2,3 e 4.

Duas obras clássicas que abordam os algoritmos genéticos são os livros de GOLDBERG (1989) e MICHALEWICZ (1992); podemos também citar alguns livros mais recentes sobre o assunto tais como GEN & CHENG (1997) e GOLDBERG (2002).

4.2–) Alfabeto para representação das variáveis de decisão

Segundo SAVIC & WALTERS (1997), muitos estudos de calibração usaram a representação binária de AGs, requerendo um procedimento adicional de decodificação dos *strings* de bits para valores reais. Essa representação apresenta vantagens sobre outras codificações. É simples de criar e manipular, teoricamente tratável e largamente aplicável, pois muitos problemas podem ser codificados em *strings* binários.

Ao invés de trabalhar com códigos binários e aplicar operadores genéticos independentes do problema, em função do tamanho dos problemas de calibração do modelo de distribuição de água sugerem a representação direta de variáveis de decisão através de números reais. Isso é simplesmente conseguido gerando-se listas de números reais dentro da faixa limite para os parâmetros.

No trabalho adotou-se o alfabeto de representação real para as variáveis de decisão do problema, pois o custo computacional para o problema é relativamente elevado inviabilizando o uso da codificação binária.

4.3–) Seleção de parâmetros relacionados aos AGs

Para implementar a técnica dos AGs, valores para os parâmetros como tamanho da população (n), probabilidade de recombinação (P_c) e probabilidade de mutação (P_m) abaixo necessitam ser selecionados. Para um problema de otimização de redes de distribuição de água os seguintes valores foram indicados por SIMPSON et. al (1994):

- Tamanho da população (n) - usualmente de 30-200
- Probabilidade de recombinação (P_r) - usualmente entre 0,7-1,0
- Probabilidade de mutação (P_m) - usualmente entre 0,01-0,05

(De SCHAETZEN (2000) recomenda $P_m = 1 / N_{genes}$)

N_{genes} = quantidade de elementos de cada solução

(utilizado normalmente 0,05)

Linhas guia para computar P_m são: $P_m \geq 1/n$ e $P_m \leq 1 / L$ onde n = tamanho populacional e L = extensão da fila (*string*)

Obs: A variação de alguns destes parâmetros é estudada no próximo capítulo 6.

4.4 – Operadores genéticos

A-) Seleção

A seleção é o operador genético que determina os indivíduos (soluções) a sofrerem recombinação e mutação a cada iteração de AG. Diversos são os mecanismos de seleção reportados na literatura, tais como seleção proporcional, roleta, torneio, entre outras.

Adicionalmente, a escolha das soluções que passarão pelos operadores de recombinação e mutação pode ser feita por técnicas de substituição “*replacement*”, que não são propriamente uma forma de seleção e simplesmente a substituição de soluções de um conjunto (população).

Uma breve descrição das principais técnicas de seleção é feita a seguir:

Seleção aleatória: os indivíduos que irão passar pelos operadores de recombinação e mutação são escolhidos aleatoriamente;

Seleção por roleta: uma classificação dos indivíduos é feita em ordem decrescente da função de aptidão, faz-se a soma acumulada de todos. Sorteia-se um aleatório no intervalo de zero até o total da soma acumulada. Percebe-se que os indivíduos com melhores aptidões tem maiores chances de serem selecionados;

Seleção por torneio: a seleção por torneio faz os indivíduos competirem diretamente, com base nos respectivos valores da função de aptidão. A implementação foi realizada escolhendo aleatoriamente dois indivíduos e preservando o melhor deles para a iteração de AG, o processo é repetido até que uma nova geração de soluções seja formada;

Seleção proporcional: Os indivíduos “mais qualificados”, ou seja, que tiverem as maiores aptidões tem maiores probabilidades de serem copiados. Enquanto que os de menor valor têm grande chance de não serem copiados;

Técnicas de substituição “escolha das melhores”: Neste tipo de técnica IPOP melhores alternativas são selecionadas em cada iteração para serem mantidas para a próxima antes dos operadores de recombinação e mutação. Após estas etapas novamente são selecionados agora os NPOP-IPOP melhores indivíduos para completar os NPOP (total de indivíduos) da iteração, ou seja, o critério de seleção é totalmente elitista tanto antes quanto depois das etapas de recombinação e mutação.

B-) Recombinação ou cruzamento

Do ponto de vista da biologia, o cruzamento é o mecanismo através do qual são promovidas transferências de características genéticas dos indivíduos pais, na criação dos novos indivíduos (filhos).

O operador de recombinação constitui talvez o principal operador genético. De forma geral a população de pais é aleatoriamente formada por pares de forma que trocas de características entre estes pais são realizadas com o objetivo de gerar um mesmo número de filhos, preservando o tamanho original da população.

Em geral, a quantidade de características a serem trocadas é definida aleatoriamente e a probabilidade de recombinação (Pr) estabelecida determina se haverá ou não troca de características. De forma operacional, gera-se um número aleatório entre 0 e 1, se este número for inferior a Pr ocorrerá o cruzamento, caso contrário não.

Dentre as sistemáticas mais usuais pode-se citar as recombinações de um, dois, múltiplos pontos de corte e a recombinação uniforme. Os esquemas destes tipos de recombinação são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5.

Ao lado da recombinação de dois pontos, o esquema apresentado na Figura 3 de 1 ponto de corte é um dos principais esquemas adotados. Para este

último esquema de recombinação é feito 1 corte a partir de 1 ponto e as características da solução ou gene são trocadas.

- Um ponto de recombinação

Figura 3 – Recombinação de 1 ponto de corte

A recombinação de dois pontos de corte ilustrada na Figura 4 é um dos tipos recombinação muito utilizado em aplicações consultadas, sendo um dos mais utilizados em aplicações feitas. Ao invés de um ponto de corte conforme o esquema da Figura 3, dois pontos de corte são definidos, sendo que são trocadas as características entre estes dois pontos.

- Dois pontos de recombinação

Figura 4 – Recombinação de 2 pontos de corte

Esquema com mais pontos de corte tem sido propostos na literatura, sendo que basicamente consiste na troca de características da solução entre estes pontos.

Um esquema de recombinação também utilizado é o de recombinação uniforme, conforme ilustrado na Figura 5. Um número aleatório é gerado para cada característica da solução ou gene, conforme o esquema, se este número for zero não ocorrerá à mudança da característica do pai e se for 1 este gene é

trocado. Uma maneira prática é gerar um número aleatório entre 0 e 1, se este número for acima de 0,50 é realizado a troca caso contrário a característica não se altera.

- Recombinação uniforme

pai1 (1 1 1 1 1 1 1 1 1) → filho 1 (0 1 1 1 0 0 1 0 1)
 pai2 (0 0 0 0 0 0 0 0 0) → filho 2 (1 0 0 0 1 1 0 1 1 0)

sequência aleatória gerada (1 0 0 0 1 1 0 1 1 0)

Figura 5 – Recombinação uniforme

C-) Mutação

O operador mutação é responsável pela introdução de material genético novo para a população de soluções através da eventual substituição de genes dos indivíduos. Geralmente é realizada bit por bit (no caso de código binário) ou gene por gene (código real).

As duas aproximações básicas para mutação utilizando código real (escolhido no trabalho), pode ser mutação uniforme e não uniforme, sendo que a mutação uniforme é realizada de forma que cada elemento ou gene de uma cadeia representativa de solução possui exatamente a mesma chance de sofrer mutação foi à utilizada.

Um esquema de mutação mais simples é apresentado na Figura 6, cada gene de uma solução é percorrido gerando um aleatório entre 0 e 1 e comparando-se com a probabilidade P_m de mutação, se este valor aleatório for menor que P_m ocorrerá a perturbação no valor contido no gene dentro de faixa

estabelecida. As probabilidades de mutação geralmente são baixas para o problema não tornar-se aleatório.

- Mutação

indivíduo (1 1 1 1 1 1 1 0 0 0) → antes da mutação

indivíduo (1 1 1 1 0 1 1 0 0 0) → depois da mutação

Figura 6 – Esquema de mutação

4.5-) Tipos de AGs

Os AGs simples podem ser classificados basicamente em: geracionais, geracionais elitistas e *Steady State*.

Em síntese, nos algoritmos genéticos geracionais, a cada iteração todos as soluções são avaliadas com base no respectivo valor da função de aptidão, ao passo que geralmente o algoritmo é finalizado quando o número de iterações previamente estipulado é atingido.

Os AGs geracionais elitistas asseguram que um determinado número de melhores alternativas de soluções de cada iteração sejam preservados para a próxima.

Nos AGs *Steady State* somente algumas soluções são avaliadas a cada iteração de AG, escolhidas de acordo com critérios. Este procedimento confere maior velocidade ao processamento da rotina, pois com um menor número de soluções avaliadas o custo computacional torna-se bem menor principalmente se a avaliação das soluções envolver avaliações hidráulicas da rede, como geralmente é necessário no caso de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento.

Os maiores detalhes e fluxogramas representativos dos algoritmos de implementações destes tipos de AGs são apresentados no item 5.7 no capítulo de materiais e métodos.

4.6–) Principais vantagens do uso dos algoritmos genéticos (AGs)

Os métodos de resolução do problema de calibração geralmente são analíticos ou baseados em técnicas de otimização. Técnicas baseadas em modelos analíticos apresentam aplicabilidade restrita a redes muito pequenas, alternativamente requerem que uma rede de grande porte seja simplificada, considerando apenas as tubulações principais. Desta forma, os mais promissores procedimentos de resolução do problema inverso de calibração são baseados em métodos de otimização.

Entretanto, o sucesso da calibração face a complexidade da função objetivo geralmente depende de suposições linearizantes ou cálculo não realístico de derivadas parciais, através de procedimentos de otimização local, que tendem a tornar-se aprisionados em mínimos locais ou sofrer instabilidades numéricas associadas à inversão de matrizes, sendo que estas simplificações necessárias para a resolução do problema pode produzir resultados pouco realísticos.

Os Algoritmos genéticos (AGs) mostram-se adequados para dar tratamento a problemas de otimização cujas vantagens incluem o tratamento de funções descontínuas e complexas; facilidade de implementação; bons para tratamento de problemas grandes e complexos; avaliam populações de soluções ao invés de fazer com que a soluções iniciais evoluam iterativamente na busca do ótimo; usam regras de transição probabilísticas e não regras determinísticas. No trabalho de SIMPSON et al. (1994) é apresentado uma comparação de resultados obtidos pela aplicação de AGs e métodos clássicos de otimização a um estudo de caso em projetos de redes de distribuição de água.

No Anexo 1 apresenta-se uma terminologia dos termos de AGs para facilitar a compreensão do texto.

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho envolveu as diversas etapas do processo de calibração. São apresentados neste capítulo os métodos empregados para realização dos testes de laboratório, campo e de simulação computacional.

5.1-) Detalhes das etapas básicas de calibração

De acordo com SAVIC & WALTERS (1997), tomando-se como base o Reino Unido, as técnicas e procedimentos para construir os modelos de simulação de sistemas de distribuição de água podem ser resumidos nas seguintes atividades:

(i) Consulta as informações do sistema de distribuição de água, tais como: registros dos consumidores e mapas, dentre outras informações; (ii) Inspeção do local para instalação de equipamentos; (iii) Medidas de campo preliminares; (iv) Exercício de medidas de campo; (v) Uso dos dados da rede para análises via computador; e (vi) Calibração do modelo. Tal sequência de procedimentos foi considerada para as duas redes reais consideradas no estudo.

As atividades (i) e (ii) descritas acima constituem as mais importantes, pois se os dados de entrada não forem fidedignos, por mais sofisticados que sejam os modelos de simulação e as ferramentas de análise empregadas no seu tratamento, nunca produzirão resultados satisfatórios.

Estas duas etapas podem ser consideradas árduas, pois a maioria das companhias responsáveis pelos sistemas de distribuição de água ainda não incorporaram uma sistemática de organização e atualização rotineira de seus cadastros, exigindo um trabalho de investigação cauteloso na composição das informações das várias fontes disponíveis.

Algumas considerações sobre os problemas mais comuns notados na etapa de aquisição de dados junto à companhia podem ser listados abaixo:

- Em geral, quanto mais antiga for a rede de distribuição, piores são os seus cadastros sendo que muitas vezes existem dúvidas com relação ao material das tubulações, ao traçado da rede, às fontes de abastecimento etc.; muitas vezes, as informações necessárias para composição do banco de dados devem ser complementadas junto aos operadores do sistema ou através de inspeções na própria rede, quando possível;
- Muitas redes relativamente novas também apresentam problemas devido ao projeto inicial não ser seguido, como é o caso de substituição de determinado tipo de tubulação inicialmente prevista por tubulações disponíveis durante a execução da obra;
- Reparos realizados em campo, como: substituição de tubulações, mudanças de traçados e até mesmo união de redes pertencentes a setores distintos, muitas vezes não são informados a setor de controle de cadastros;
- Mapas e ou anotações perdidas;
- “Arquivos vivos de informações”, ou seja, uma determinada informação de importância para um gerente de recursos hídricos muitas vezes é somente detida por uma única pessoa. Em muitos casos existe a possibilidade desta pessoa não estar trabalhando mais na companhia de distribuição de água ou até mesmo não estar mais viva.

Nos setores em estudo, foram considerados os mapas, contendo informações tais como: comprimentos, materiais, topografia, diâmetros das tubulações.

Os bancos de dados do Serviço de autônomo de água de São Carlos (SAAE) forneceu a demanda mensal das diversas quadras componentes dos setores em estudo. Foram fornecidas as demandas mensais por ligação e também o total de ligações por quadra.

5.2 – Principais redes utilizadas no estudo

Para os estudos de calibração e de localização de pontos ótimos de monitoramento foram utilizadas as redes de distribuição de água da literatura, com o objetivo de estudos preliminares. Em seguida foram abordadas as redes de distribuição de água reais apresentadas nos itens 5.2.3 e 5.2.4.

5.2.1 – Rede hipotética (JOWITT & XU (1990))

A rede hipotética extraída do trabalho de JOWITT & XU (1990) ilustrada no esquema da Figura 7 tem 37 trechos e 25 nós, foi o primeiro sistema analisado com o propósito de calibração.

Figura 7 – Esquema da rede hipotética (JOWITT & XU (1990))

As informações desta rede encontram-se no Anexo 2.

5.2.2 – Rede hipotética (De SCHAETZEN (2000))

A rede mostrada na Figura 8 é composta de 12 nós e 15 trechos. A sua utilização foi realizada nos estudos de determinação da rede de amostragem ótima, principalmente pela possibilidade de comparação dos resultados obtidos por De SCHAETZEN com os obtidos no presente estudo.

Figura 8 – Esquema da rede hipotética (De SCHAETZEN (2000))

As informações desta rede encontram-se no Anexo 3

5.2.3 – Rede real de menor porte do estudo: Setor “Monte Carlo”

O segundo sistema alvo dos estudos de calibração foi à rede de distribuição do setor denominado “Monte Carlo” (Figura 9), da Cidade de São Carlos, S.P, Brasil. Este foi escolhido por ser um setor isolável, com vazamentos significativos e relativa confiabilidade de seu cadastro. A partir dos mapas originais da rede existente, foi estabelecido o seu traçado, dotado

de 58 nós, 83 trechos, com uma extensão de 9173 m em pvc e ferro fundido, com 1051 ligações (Dezembro de 1999). A população abastecida pela rede foi estimada em 5000 habitantes na época. O esquema indicado na Figura 9 encontra-se apresentado em tamanho maior no Anexo 4. O Anexo 5 contém informações relativas a rede, sendo que o nó 28 representa a entrada desta. No Anexo 9 são apresentadas as informações de pressões e vazões obtidas em campo.

Figura 9 – Esquema do Setor “Monte Carlo” – Cidade de São Carlos – S.P. – Brasil

Figura 10 – Caixa de inspeção na entrada do setor “Monte Carlo”

5.2.4 – Rede real de Maior porte do estudo: Setor “São Carlos 3”

O terceira e mais utilizada rede para o desenvolvimento dos trabalhos de calibração foi o setor denominado “São Carlos 3” (Figura 11) da Cidade de São Carlos, S.P., Brasil . Esta rede também foi utilizada para determinação da rede de amostragem ótima e, da mesma forma que o setor Monte Carlo, foi escolhida por se tratar de um setor isolável dotado de cadastro de qualidade relativamente boa e, principalmente, por apresentar um tamanho bem mais representativo. A partir dos mapas originais, estabelecem-se a rede composta de 146 nós, 193 trechos, com uma extensão de 23060 m de tubulações predominante de pvc, dotada de 2052 ligações (Dezembro de 2000), abastecendo uma população estimada em 10000 habitantes. O esquema da rede indicado na Figura 11 encontra-se apresentado em tamanho maior no Anexo 6, suas informações físicas são mostradas no Anexo 7. Nos Anexos 10 e 11 são apresentadas as informações de entrada de vazões e pressões respectivamente necessárias para o modelo de calibração e de determinação de parâmetros de vazamentos.

Figura 11 - Setor “São Carlos 3 ” – Cidade de São Carlos, S.P, Brasil

Figura 12 – Reservatório de abastecimento do Setor “São Carlos 3 ” – Cidade de São Carlos, S.P, Brasil

5.3 – Treinamento de uso de equipamentos e testes de laboratório realizados

Os principais equipamentos utilizados na fase de aquisição de dados de campo foram os seguintes:

- Geofones mecânicos e eletrônicos, sendo os primeiros mecânicos construídos artesanalmente e os eletrônicos de modelo FD-10 da *Fuji Tecom*; estes foram utilizados na detecção de vazamentos, pois eles amplificam o som;
- Hastes de escuta também utilizadas para detecção de vazamentos;
- Medidores de pressão com armazenadores de informações *Metrolog NA Data Logger da Technolog*;
- Medidores de vazão ultra-sônicos não intrusivos com armazenadores de informações *Porta Flow 300 da Micronics*

5.3.1 – Treinamento realizado

A fase de treinamento para utilização dos equipamentos é de grande importância, pois está vinculada ao melhor desempenho e durabilidade destes.

O treinamento para utilização do geofone (equipamento acústico para detecção de vazamentos) foi feito com o auxílio da equipe do Serviço

Autônomo de Água (Figura 13), responsável pela detecção de vazamentos grosseiros na Cidade de São Carlos.

A orientação na utilização dos equipamentos de medidas de pressão e vazão foi realizada por funcionários da empresa representante dos equipamentos no Brasil (BBL), durante ensaios realizados em laboratório, conforme ilustrações da Figura 14.

Figura 13 – Funcionário SAAE São Carlos em treinamento de uso de geofones mecânicos e eletrônico usado na aferição (foto- geofone mecânico)

(a)

(b)

Figura 14 – Treinamento do uso de equipamentos utilizados: (a) Computador Portátil e módulo de armazenamento de informações de vazão e (b) medidor armazenador de informações de pressão

5.3.2 – Aferição de equipamentos utilizados nas medições de pressões e vazões

A etapa de aferição de equipamentos é fundamental, pois com a comparação de suas medidas com as de equipamentos equivalentes confiáveis se tem uma garantia maior na veracidade das medidas.

No Laboratório de Mecânica dos Fluidos da EESC-SHS (Figura 15), foi feita a aferição dos medidores de pressão, com auxílio de um “manômetro de peso morto”. Os resultados mostraram que exatamente as mesmas medidas foram obtidas para os dois medidores utilizados.

Os medidores de vazão (Figuras 16 e 17), foram aferidos no Laboratório de Hidráulica da EESC-SHS. Foi notada uma diferença entre estes equipamentos e uma referência confiável (balança de precisão) de aproximadamente $\pm 2\%$, sendo que tal referência adotada foi no caso foi à determinação da vazão através do peso da água com o uso de uma balança e um cronômetro. Esta diferença de $\pm 2\%$ foi considerada aceitável tendo em vista a vantagem da portabilidade do equipamento e o fato de possibilidade de pequenos erros na precisão do equipamento padrão.

Figura 15 – Detalhe de manômetro de peso morto utilizado na aferição do medidor de pressão

Figura 16 – Ensaio realizado para aferição de equipamento de vazão em Laboratório da Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos –USP

Figura 17 – Vertedor e balança utilizada durante ensaio de determinação de vazão utilizado na aferição no Laboratório da Hidráulica da Escola de Engenharia de São Carlos -USP

Ambos os equipamentos foram utilizados para as duas redes reais em estudo, sendo que a etapa foi realizada periodicamente durante os trabalhos de campo.

5.4 – Trabalhos de campo realizados

5.4.1 – Levantamento Sócio Econômico realizado em setor de estudo

Objetivando-se conhecer melhor e quantificar elementos necessários à pesquisa no Setor Monte Carlo, tais como hábitos da população quanto ao uso da água, foi elaborado e aplicado um questionário aos moradores locais, conforme mostrado na Figura 18.

Com base no cadastro do SAAE São Carlos, amostrou-se aproximadamente 20% das ligações existentes, ou seja, de 1.051 ligações residenciais foram amostradas 219. As entrevistas aos moradores foram aplicadas com base na escolha aleatória das residências.

QUESTIONÁRIO PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MORADORES NOS BAIRROS MONTE CARLO, CONCEIÇÃO E MADRE CABRINI.

Entrevistador: Adilson () Fernando () Urandi ()

Data da pesquisa:

Endereço:

1) Identificação do Entrevistado

Nome:

Grau de parentesco:

Sexo:

Idade:

2) Perfil do Chefe da Família

Grau de parentesco:

Sexo:

Escolaridade:

Profissão:

Período em que trabalha:

3) Características dos Moradores

Período de ausência:

Nº de adultos (maiores de 18 anos):

() M () T () N

Nº de adolescentes (entre 12 e 18 anos):

() M () T () N

Nº de crianças (entre 5 e 11 anos):

() M () T () N

Nº de bebês (entre 0 e 4 anos):

() M () T () N

4) Há quanto tempo moram no local?

5) Quais as estações de rádio e TV mais ouvidas pela sua família? Qual o horário?

6) Você costuma passar os finais de semana em casa?

Sim () Não ()

Se Sim, o que você costuma fazer:

7) Qual o dia da semana em que se lava roupa?

8) Tem caixa d'água na residência? Qual a capacidade?

9) Tem carro? Lava em casa? Em que dia e período?

10) Tem hidrômetro?

11) Ocorre falta de água? Como é a pressão (torneiras, mangueiras)?

12) Você observa ocorrência de água de má qualidade na torneira?

13) Costuma pagar o mesmo valor da conta de água todos os meses?

14) Costuma pagar o mesmo valor da conta de luz todos os meses? Você tem a última conta para nos dar uma idéia de consumo?

15) O que você gostaria que fosse melhorado no serviço de água local?

16) O abastecimento de água em sua residência é feita através de:

() rede pública

() poço

() nascente (rio, lago, outros)

17) Quanto ao tratamento da água utilizada, ela é:

() filtrada

() fervida

() não faz nada

() comprada

18) Seu domicílio possui instalações sanitárias?

() sim

() não

Caso existam, elas estão localizadas

	Banheiro Completo	Somente o vaso sanitário
Dentro do domicílio:	()	()
Fora do domicílio:	()	()

19) O esgoto sanitário é coletado através de:

() fossa (séptica ou rudimentar)

() vala negra

() direto no curso d'água

() rede pública

20) Qual é o destino do lixo de seu domicílio?

() coleta por caminhão

() queimado

() enterrado

() simplesmente jogado em áreas vagas

() outros, qual?

21) Quantos dias por semana lava a área externa da casa? Quais os dias da semana?

22) Observações:

Figura 18 – Modelo de questionário aplicado no Setor Monte Carlo

Considera-se este trabalho importante principalmente tendo se em vista a previsão de demandas, que estão geralmente associadas a incertezas espaciais e temporais, dando se uma idéia do contexto geral do setor em estudo, embora este levantamento tenha sido realizado somente no setor de

menor porte Monte Carlo, pois para o setor de maior porte devido a questões de dimensões este estudo foi inviabilizado.

5.4.2 – Verificação de cotas topográficas de dados cadastrais

Com o objetivo de verificação das cotas constantes dos mapas, foram realizadas leituras com GPS de boa precisão, nos pontos de monitoramento. Os pontos cujas topografias levantadas em campo diferiram das informações de cadastro tiveram seus valores corrigidos. O GPS utilizado no estudo é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Equipamento de GPS utilizado para levantamentos de campo

A confirmação de cotas com o auxílio do GPS somente foi realizada para a rede de menor porte Monte Carlo, pois constatou-se que as informações na rede “São Carlos 3” relativas a topografia apresentavam melhor confiabilidade quando comparadas as do setor anterior.

5.4.3 – Detecção e reparos de vazamentos grosseiros da área de estudo

Os vazamentos podem ser divididos em “inerentes” e “grosseiros”. Os vazamentos inerentes são os pequenos vazamentos ao longo da rede provocados por falhas nas junções, normalmente “ponta e bolsa”. Já os vazamentos “grosseiros” são provocados por fendas na tubulação, ocasionadas por grandes falhas mecânicas, que normalmente são detectáveis e normalmente são comunicadas aos órgãos responsáveis para reparos.

O modelo hidráulico utilizado incorpora os vazamentos inerentes na forma (JOWITT & XU (1990)):

$$L = c_1 . l . P^{N_1} \quad (16)$$

Sendo: L= vazamento em L/s, l= comprimento do trecho da rede, em m, e P= carga de pressão média no trecho considerado, em mH₂O. Os parâmetros C₁ e N₁ são parâmetros de vazamentos inerentes a serem determinados na pesquisa para os setores em estudo, através de testes noturnos de vazamentos.

Com o propósito de eliminação dos vazamentos grosseiros não previstos no modelo, a equipe de alunos do projeto realizou a detecção de vazamentos através de equipamentos de detecção acústicos.

Na Figura 20 (a) observa-se a detecção em cavalete residencial através de haste de escuta, já as Figuras 20 (b) e 21 ilustram, respectivamente, o geofonamento realizado e o geofone eletrônico utilizado.

Figura 20 – (a) Operação com haste para verificação de ocorrência de vazamento em cavalete de morador (b) Operação com geofône eletrônico utilizado

Figura 21 – Geofône eletrônico

O geofonamento foi realizado em ambos os setores de redes reais estudados e os locais com os possíveis vazamentos foram informados ao setor de manutenção do SAAE São Carlos para reparos.

5.4.4 – Testes noturnos de vazamentos

Os ensaios para a determinação da curva Pressão x Vazamento realizados nos dois setores de redes reais, foram realizados no período da madrugada (consumo quase zero).

Com os medidores armazenadores de dados de pressão e vazão instalados nos pontos de interesse, realizaram-se fechamentos parciais de dispositivo

situado na entrada dos setores. No caso do Setor Monte Carlo o dispositivo foi uma VRP e no Setor São Carlos 3 um registro de gaveta.

Uma das curvas de pressão obtida é ilustrada pela Figura 22, sendo que as demais encontram-se no Apêndice 1, relativas ao dois setores.

Figura 22 – Registro de pressão durante manobras sucessivas de fechamento da válvula - Setor São Carlos 3

O medidor de pressão instalado no cavalete residencial é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Medidor de pressão instalado em cavalete do Setor São Carlos 3

Na Figura 24 (a e b) e 25 observa-se respectivamente a instalação dos equipamentos de vazão na rede de distribuição no ponto de monitoramento no interior da rede e na entrada do Setor São Carlos 3 na linha de saída do reservatório de abastecimento do setor.

Figura 24 – Monitoramento de vazão em ponto localizado no interior da rede no Setor São Carlos 3 (a) Equipamento instalado (b) Equipe durante instalação de equipamento na madrugada

Figura 25 – Medidor de vazão instalado na entrada do Setor São Carlos 3

Tanto os medidores de pressão quanto os de vazão foram utilizados nos ensaios de determinação de Curvas pressão x vazamento.

A Figura 26 ilustra as manobras realizadas no Setor Monte Carlo, através de sistema de telemetria instalado no local.

Figura 26 – Membros da equipe do SAAE durante a manobras na madrugada no Setor Monte Carlo

A Figura 27 mostra as manobras realizadas manualmente sobre a cabeça do registro.

Figura 27 – Fechamento do registro na entrada do Setor São Carlos 3 durante ensaio de determinação da curva pressão x vazamento

Na Figura 28 é mostrada uma das curvas de vazão obtidas em um dos pontos, observando a presença de patamares de praticamente o mesmo valor de vazão.

Figura 28 – Curva com a variação da vazão para distintos fechamentos da válvula de controle

5.4.5 – Medidas de pressão realizadas

As tomadas de pressão foram realizadas nos cavaletes residenciais, conforme mostrado na Figura 29, com exceção do nó de monitoramento da

entrada do setor em que a medida foi tomada na própria rede, conforme indicado na Figura 30.

As diferenças topográficas existentes entre o terreno e os cavaletes foram consideradas na simulação hidráulica.

Além dos testes noturnos realizados medidas contínuas foram realizadas sem intervenção sobre a válvula.

Figura 29 - Medidor de pressão (armazenador) instalado em cavalete residencial

Figura 30 - Medidor de pressão (armazenador) instalado em rede de distribuição

5.4.6 – Medidas de vazão contínuas realizadas

As medidas de vazão foram feitas com medidores ultra-sônicos não intrusivos, conforme mostrado na Figura 31, para as duas redes reais utilizadas no trabalho. A utilização deste tipo de medidor parece ser indicada, pois se minimiza a interferência em sistemas que já se encontram em operação.

No Setor Monte Carlo, o monitoramento de vazão foi realizado na entrada do setor, enquanto que no São Carlos 3, além da entrada, um ponto intermediário também teve seus valores de vazão monitorados com o intuito de se obter mais informações da rede em estudo. Com o medidor de vazão ultra-sônico que também é um armazenador de informações, foi possível estabelecer a frequência mais apropriada para coleta de dados que no caso foi adotada de

um em um minuto. Da mesma forma que para os ensaios de pressão os registros de vazão foram feitos durante os ensaios noturnos e ensaios contínuos (sem interferência na válvula de entrada).

Figura 31 –Medidor de vazão ultra-sônico: (a) módulo de aquisição de dados
(b) régua com sensor instalada na tubulação

Alguns gráficos de medidas contínuas de pressão realizadas no setor Monte Carlo estão no Apêndice 2 e relativas a pressão e vazão contínuas para o Setor São Carlos 3 estão no Apêndice 3.

5.5 – Escolha dos pontos de monitoramento de pressão e vazão necessárias para a calibração

5.5.1-) Setor Monte Carlo

Os pontos para a aquisição de dados necessários à calibração foram escolhidos de forma a abranger a maior área possível da rede em estudo, em função do número de equipamentos disponíveis. As informações obtidas aqui serviram como uma etapa inicial do estudo. Os pontos definidos para esta etapa dos trabalhos são apresentados na Figura 32. Estudos mais detalhados sobre a melhor localização de pontos de monitoramento para fins de calibração foram realizados a posteriori.

Conforme mostrado na Figura 32, na entrada do setor existe uma válvula redutora de pressão (VRP), além de pontos de monitoramento de pressão e vazão; sendo que dados de pressões são coletados à montante e a jusante da VRP. Outros seis pontos de monitoramento dentro do setor foram considerados, cuja escolha considerou critérios como topografia e benefícios que as localizações poderiam trazer para todas as pesquisas dos membros integrantes do grupo.

Estes pontos foram nomeados como segue:

- Monitoramento de pressão:

- Ponto a montante da válvula (localizado antes da VRP), na entrada do setor;
- Ponto a jusante da Válvula (localizado depois da VRP), na entrada do setor;
- Ponto Crítico (topografia mais elevada, próximo ao nó 19);
- Ponto Crítico* (topografia bastante elevada, próximo ao nó 7);
- Ponto Extremo (topografia mais baixa, próximo ao nó 51);
- Ponto Médio 1 (intermediário entre crítico e extremo, próximo ao nó 38);
- Ponto Médio 2 (intermediário entre crítico e extremo, próximo ao nó 57); e
- Ponto Médio 3 (intermediário entre crítico e extremo, próximo ao nó 26).

- Monitoramento de Vazão: - realizado na entrada do setor.

Figura 32 – Localização de pontos de monitoramento de pressão e vazão no Setor Monte Carlo

5.5.2-) Setor São Carlos 3

A entrada do Setor São Carlos 3 é apresentada em maiores detalhes, pois algumas condições de operação necessitaram ser verificadas antes que se realizassem os ensaios propriamente ditos. A Figura 33 ilustra o esquema da entrada do setor em estudo, sendo que, de acordo com a sistemática de operação atual, os registros R3 e R4 permanecem fechados e o reservatório de abastecimento alimentado somente pelo poço. O registro R2 serviu de controle

para determinação da Curva Pressão x Vazamento do setor, através de manobras de fechamento gradativo no período da madrugada.

Após o registro R1, não houve a necessidade do monitoramento de vazão, pois este só foi aberto das 17:30 às 22:00 horas, horários estes que não coincidem com o período de monitoramento realizado.

Figura 33 – Esquema do abastecimento do Setor São Carlos 3

Os pontos de monitoramento foram compostos por cinco conjuntos de dados de forma a abranger informações necessárias para a caracterização de toda a rede. Serviu-se como base auxiliar para o estudo a aplicação do terceiro método apresentado por De SCHAETZEN (2000) no item 2.4.1.

A Figura 34 abaixo ilustra todos os pontos de monitoramento utilizados para obtenção de grandezas necessárias para a calibração. Um estudo paralelo de localização de pontos ótimos para aquisição de dados necessários para calibração de redes de distribuição de água foi desenvolvido sobre uma rede hipotética devido a dificuldade de se promover estudos detalhados com rede de grande porte.

Figura 34 – Localização de todos os conjuntos de pontos para obtenção de parâmetros necessários para calibração – Setor São Carlos 3

5.6 – Dados de consumo de água

Normalmente, a maior fonte de erro na modelagem de sistemas de distribuição de água está relacionada à incerteza na estimativa da distribuição espacial do consumo de água. Tal fato deve-se principalmente às variações de consumo serem dinâmicas, variando durante horas do dia, os dias da semana, as estações do ano, etc..

As estimativas iniciais das demandas nos nós foram avaliadas a partir de dados de consumos mensais relativos às quadras dos setores em estudo com base nos registros do SAAE - São Carlos.

Determinou-se, dessa maneira, o consumo médio de cada quadra e, através das áreas de influência de cada nó, foi avaliada uma proporcionalidade das vazões contribuintes com as demandas atribuídas aos mesmos. Um exemplo dessa sistemática é apresentado com base no esquema da Figura 35. Considerando C o consumo médio da quadra e D a demanda de cada nó da rede fictícia.

Figura 35 – Rede fictícia para estimativas de demandas nos nós

Como exemplo são tomados os nós 5 e 10:

$$D_5 = \frac{1}{4} \times C_A + \frac{1}{4} \times C_B + \frac{1}{4} \times C_C + \frac{1}{5} \times C_D \quad \text{e} \quad D_{10} = \frac{1}{5} \times C_D$$

5.7– Simulações computacionais realizadas para calibração

5.7.1-) Rede hipotética (JOWITT & XU (1990)) e rede real Monte Carlo

A-) Formulação do problema de otimização e descrição das variáveis

O problema inverso de determinação de parâmetros através da minimização dos desvios entre valores produzidos via simulação hidráulica e dados de pressão e vazão observados em campo, foi expresso através da maximização da seguinte função de aptidão indicada na equação 17.

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^C \left\{ w_H^{(k)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{sim i} - P_{obs i}}{[\sum_{i=1}^N P_{obs i}] / N} \right]^2 + w_Q^{(k)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\frac{Q_{sim j} - Q_{obs j}}{[\sum_{j=1}^M Q_{obs j}] / M} \right]^2 \right\} \right\}_k^{-1} \quad (17)$$

sendo: P – carga de pressão (m)

Q – vazão (L/s)

N - conjunto de pontos de observação de valores de pressão

M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão

C - número de condições de demanda (obs: para estas duas redes foram definidas 3 condições de demanda representando horários de consumos máximo, médio e mínimo)

w_H, w_Q – pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão

sim, obs - denotam valores simulados e observados, respectivamente.

Basicamente, a função de aptidão a ser maximizada constitui o inverso da soma dos quadrados das diferenças adimensionalizadas entre valores de pressões e vazões simulados e observados, multiplicados respectivos pesos atribuídos a cada uma das grandezas, definidos de acordo com a importância dada ao respectivo parâmetro.

Desta forma, o problema de calibração foi posto como de determinação das rugosidades dos trechos da rede. Visando reduzir o número de variáveis de

decisão do problema, as tubulações foram agrupadas em setores de acordo com as características idade e material que influenciam diretamente as rugosidades.

Além disso, permitiu-se um número pré-determinado de trechos com valores de rugosidades superiores aos dos setores a que pertencem, representando a presença de acessórios tais como válvulas. Para melhor guiar a busca desses acessórios, foram atribuídas probabilidades de existência de acessórios aos trechos, em conformidade com as informações contidas nos registros da companhia de abastecimento de água, inspeções de campo e contato com pessoas dos setores competentes.

Tais probabilidades foram utilizadas tanto na geração das populações iniciais de soluções como pelo operador de mutação. A Tabela 4 mostra os trechos com maiores probabilidades, baseadas nos 3 tipos de informações. Destaca-se que estas probabilidades indicadas, não representam a definição clássica estatística; estas podem ser consideradas um índice que serviu como auxiliar no processo de otimização para determinação de rugosidades de trechos da rede real estudada.

Observa-se na Tabela 4 que das 3 fontes de informações se valorizou mais a consulta a pessoas “confiáveis”, logo em seguida os cadastros e finalmente o campo; visto que em muitas áreas os poços de inspeção dos registros foram pavimentados, inviabilizando a inspeção. Definiu-se também que todos os trechos tinham uma probabilidade mínima de 30% de ocorrência de acessórios e nenhum 100% (indicado por 95*); pelo fato de com exceção da válvula na entrada da rede, todos as válvulas internas ao setor serem impossíveis de inspecionar.

TRECHO	FONTE DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO			PROBABILIDADE (%)
	CAMPO	CADASTROS	PESSOAS	
	PESO			
2	0	2	4	90
15	0	2	0	50
22	1	2	4	95*
32	0	2	4	90
33	0	2	4	90
36	0	2	4	90
37	0	2	0	50
38	0	2	0	50
44	1	0	4	80
51	1	0	4	80
59	1	0	4	80
66	0	2	0	50
70	1	0	4	80
82	0	2	0	50
83	1	0	4	80

Tabela 4 – Taxas de probabilidades de ocorrência de acessórios determinadas – Monte Carlo

B-) Descrição dos algoritmos de calibração

Os ensaios de calibração foram realizados para uma rede hipotética e para duas redes reais, sendo que o uso de um algoritmo de dois passos, considerando a avaliação conjunta de parâmetros da rede e de vazamentos, é realizado somente para a rede real São Carlos 3.

Os fluxogramas dos principais algoritmos construídos para o desenvolvimento do trabalho são apresentados a seguir.

Os AGs geracionais elitistas (Figura 36) foram os principais AGs implementados, asseguram que um determinado número (IPOP) de melhores alternativas de soluções de cada iteração sejam preservados na próxima. O conjunto de soluções de cada iteração de AG é submetido aos operadores genéticos de recombinação e mutação. Após estes operadores e considerando NPOP o número total de soluções a cada iteração de AG, NPOP-IPOP melhores soluções são selecionadas e com o uso da substituição adicionada aos IPOP indivíduos previamente escolhidos para compor os indivíduos da iteração seguinte. Tudo é repetido até que o número de iterações de AGs estipulado seja atingido.

Nos AGs *Steady State*, IPOP constitui parcela pequena do conjunto de soluções. Conforme ilustra a Figura 37, duas soluções (IPOP=2) são geradas inicialmente a mais que a população NPOP, ou seja, NPOP+2. Na primeira iteração de AG, faz-se a avaliação das NPOP+2 soluções, que são classificadas em ordem decrescente da função de aptidão. Uma análise estatística (Figura 37) das NPOP melhores soluções é feita, verificando se o critério de convergência foi cumprido. Em caso negativo, duas novas soluções são criadas para compor as NPOP+2 soluções, e assim por diante. Com isso, a partir da segunda iteração, a avaliação de função de aptidão é feita apenas para duas novas soluções e não para todas, como nos esquemas geracionais, reduzindo desta forma o tempo computacional.

Para os AGs *Steady State*, além do número total de iterações, mais uma condição de convergência é admitida. Para esta última condição de convergência dois critérios são admitidos: o primeiro considera a diferença entre o valor da função de aptidão do melhor e do pior indivíduo de cada iteração de AG e o segundo tem base na variância da função de aptidão ao longo das iterações de AGs.

Um esquema dos tipos de AGs é apresentado nas Figuras 36 e 37, que as avaliações da função de aptidão dependem das avaliações hidráulicas da rede, pois requerem pressões calculadas nos nós e vazões nos trechos da rede.

Destaque-se que para estas duas primeiras redes em que os estudos de calibração foram desenvolvidos, os parâmetros de vazamentos não foram avaliados conjuntamente com os parâmetros da rede, entretanto estes últimos são incluídos explicitamente no modelo. Os parâmetros de vazamentos utilizados foram em parte das simulações os apresentados em literatura (JOWITT & XU (1990)) e obtidos no caso de ensaios feitos sobre a rede real Monte Carlo.

Figura 36– Algoritmo geracional elitista utilizado

Figura 37 – Algoritmos genéticos *Steady State*

5.7.2-) Rede São Carlos 3

Inicialmente foi desenvolvido um algoritmo para calibração de redes de distribuição de água que, embora considere o modelo de vazamentos explicitamente, não calibrava seus parâmetros. Nos itens seguintes são o algoritmo de duas etapas proposto é discutido.

A-) Descrição do algoritmo de calibração de duas etapas proposto

A calibração conjunta dos parâmetros da rede e de vazamentos deve ser considerada, pois estes parâmetros são interdependentes e não devem ser calibrados separadamente.

Um procedimento de duas fases ilustrado pelo fluxograma da Figura 38, é proposto e aplicado a rede de maior porte São Carlos 3. Dois módulos são considerados, um para determinação de parâmetros da rede e outra para a calibração dos parâmetros do modelo de vazamentos adotado.

Utilizando os valores $C1$ e $N1$ (equação 16) da literatura, determinam-se as rugosidades (rotina de SILVA (2002) – Módulo 1). Novos valores de $C1$ e $N1$ (rotina CALIMAN (2002) – Módulo 2) são obtidos mantendo-se fixos os valores de rugosidade determinados pelo módulo1. Fixando-se os novos valores de $C1$ e $N1$ recalculam-se as rugosidades dos trechos da rede. O procedimento é repetido até que $C1$ e $N1$ tenham seus valores próximos de $C1$ e $N1$ da iteração anterior.

Figura 38 - Algoritmo de dois passos utilizado

Ressalta que o uso dos dois módulos conjuntamente foi realizado para o Setor de maior porte.

B– Descrição dos módulos de otimização do algoritmo de dois passos utilizado (Setor São Carlos 3)

B.1-) Determinação dos parâmetros de calibração da rede (Módulo 1)

A formulação do problema de otimização para este módulo foi praticamente a mesma descrita na equação 17; a diferença básica é que aqui foram considerados vários conjuntos de pontos e uma única condição de demanda (por problemas de custo computacional).

Os AGs geracionais e os *Steady State* foram utilizados no estudo conforme vantagens e desvantagens apresentadas em estudos comparativos realizados e mostrados no capítulo de investigação de operadores mais eficientes, sendo que os fluxograma destes AGs respectivamente foram apresentados nas Figuras 36 e 37.

Desta forma, que para o item A (Setor Monte Carlo), as variáveis do problema são as rugosidades dos trechos da rede e a localização de possíveis acessórios com suas respectivas rugosidades.

A Tabela 5 indica os trechos com probabilidades de ocorrência de acessórios para este Setor de maior porte em estudo.

TRECHO	FONTE DE PESQUISA DE INFORMAÇÃO			PROBABILIDADE (%)
	CAMPO	CADASTROS	PESSOAS	
1	0	2	0	50
23	0	2	4	90
42	0	2	4	90
45	0	2	4	90
54	0	2	4	90
93	1	2	4	95*
108	0	2	0	50
114	0	2	0	50
131	1	2	4	95*
132	1	2	4	95*
135	1	2	0	60
136	1	2	0	60
147	1	2	0	60
149	1	2	0	60
150	0	2	0	50
163	0	2	0	50
164	1	2	0	60
165	1	2	0	60
166	1	2	0	60
167	0	2	0	50
177	1	0	4	80
183	1	2	0	60

Tabela 5 – Taxas de probabilidades de ocorrência de acessórios determinadas – São Carlos 3

Em conformidade com o esquema da Figura 39, cada possível solução para o problema em estudo foi representada por uma cadeia de números reais, representativos das rugosidades dos setores da rede (no caso, dois). Além das rugosidades dos setores, as cadeias representativas de soluções são compostas da localização de n trechos da rede, com os respectivos valores de rugosidades, superiores aos atribuídos aos setores a que pertencem. A quantidade máxima de acessórios foi definida com base em informações cadastrais fornecidas pelo serviço de água local e restrita a $n=23$ (Figura 39).

Assim, cada solução totaliza 48 variáveis de decisão. A faixa de variação das rugosidades foram adotadas com base na idade e tipo de materiais da rede de acordo com referências e tabelas de manuais de hidráulica.

Rugosidade Setor 1	Rugosidade Setor 2	Localização Acessório 1	Rugosidade Acessório 1	—	Localização Acessório n	Rugosidade Acessório n
-----------------------	-----------------------	----------------------------	---------------------------	---	------------------------------	-----------------------------

Figura 39 - Cadeia representativa de solução –Módulo 1

De acordo com a sistemática de rodízio para monitoramento, foram obtidos 40 medidas de pressão e 10 de vazão.

B.2-) Determinação dos parâmetros C1 e N1 relativos a vazamentos da rede (Módulo 2)

Baseado no trabalho de CALIMAN (2002), a bibliografia apresenta diversos trabalhos que se utilizam modelos de vazamentos (conforme descritos no capítulo 2 deste trabalho) sobre a localização otimizada de válvulas de controle de pressão, visando minimizar as perdas por vazamentos, utilizando um modelo do tipo pressão x vazamento na forma descrita pela equação (16)

A determinação dos parâmetros do modelo de vazamentos a partir de observações de campo, pode ser expresso através da minimização dos desvios entre os valores calculados pelo modelo de avaliação hidráulica e os correspondentes observados em campo, como:

$$\text{Min}_{C1, N1} \left[\sum_{i=1}^{n_{po}} \sum_{j=1}^{n_n} w_h \frac{|P_{ijOBS} - P_{ijSIM}|^2}{(\bar{P}_{OBS})^2} + \sum_{k=1}^{n_c} w_q \frac{|Q_{ikOBS} - Q_{ikSIM}|^2}{(\bar{Q}_{OBS})^2} \right] \quad (18)$$

Essa é a função de aptidão ou critério segundo o qual a aptidão de cada solução é avaliada, onde:

P_{ijSIM} e P_{ijOBS} representam os valores de pressão simulada e observada, respectivamente, para o nó j e padrão de observação i ; Q_{ikSIM} e Q_{ikOBS} representam os valores de vazão simulada e observada, respectivamente, para o conduto k e padrão de observação i ; n_n representa o conjunto de nós de monitoramento dos valores de pressão; n_c representa o conjunto de condutos de monitoramento dos valores de vazão; $\bar{P}_{OBS}$ é a média dos valores de pressão observados; $\bar{Q}_{OBS}$ é a média dos valores de vazão observados, n_{po} número de padrões de observação; $C1$ e $N1$ as variáveis de decisão do problema, que

correspondem aos parâmetros do modelo pressão x vazamento (Equação (16)) e w_h e w_q são pesos atribuídos à importância relativa de minimização dos desvios entre os valores calculados e observados de carga hidráulica e vazão respectivamente.

Os dados de campo para o cálculo dos desvios são obtidos com base em testes noturnos realizados e descritos no item 5.4.4.

Na Figura 40 é apresentado o algoritmo utilizado neste módulo para determinação dos parâmetros C1 e N1 para 3 áreas da rede, delimitadas principalmente pela incidência de vazamentos.

Figura 40 - Algoritmo para determinação dos parâmetros de vazamentos utilizado por (Caliman 2002)

Desta forma na Figura 41, define-se a representação das soluções do problema.

CI ÁREA 1	NI ÁREA 1	CI ÁREA 2	NI ÁREA 2	CI ÁREA 3	NI ÁREA 3
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Figura 41 - Cadeia representativa de solução –Módulo 2

5.8-) Modelo hidráulico utilizado

5.8.1-) Descrição geral

A determinação do valor da função de aptidão de cada alternativa de solução é feita através de uma rotina que realiza avaliações hidráulicas utilizando o modelo empregado por REIS et al. (1997), no qual o cálculo da perda de carga é feito pela fórmula universal. A avaliação hidráulica fornece, entre outras informações, valores de pressão e vazão respectivamente para cada nó e trecho da rede simulada, a partir de dados de entrada. Tais informações substituídas na função objetivo produzem um valor de aptidão para cada alternativa da população de determinada iteração de AG.

A formulação do modelo hidráulico das redes geralmente envolve a equação da continuidade para cada nó da rede e equação da energia para cada trecho (ligação entre nós consecutivos), cuja solução é buscada através de técnicas numéricas tais como linearizações sucessivas proposta por GERMANOPOULOS & JOWITT (1989).

➤ Fixados os níveis dos reservatórios e demandas nos nós, os referidos métodos produzem valores de vazões nos trechos e pressões nos nós da rede. Estes métodos fornecem uma solução pontual, ou seja, relativa a determinadas condições instantâneas.

A equação da continuidade para cada nó é expressa como:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} + C_i = 0; \text{ para todos os nós } i. \quad (18)$$

Onde Q_{ij} é a vazão no elemento hidráulico que conecta os nós i e j ; C_i é o consumo no nó i ; e J_i são todos os nós conectados ao nó i . O fluxo Q_{ij} é positivo no sentido de i para j .

O nó j pode ser um reservatório, ou seja, nó de carga conhecida.

Usando a fórmula universal, a vazão Q_{ij} do nó i para o nó j pode ser calculada.

Os vazamentos são relacionados com as pressões na rede, como na formulação de GERMANOPOULOS & JOWITT (1989):

$$S_{i,j} = c_i L_{ij} (P_{ij}^{av})^{1.18} \quad (19)$$

onde: S_{ij} é o vazamento da tubulação que liga os nós i e j ; c_i é uma constante da rede; L_{ij} é o comprimento do tubo limitado pelos nós i e j e P_{ij}^{av} é a pressão média ao longo do tubo. Assim, a equação (19) pode ser escrita diretamente em termos das cargas hidráulicas nos nós correspondentes.

$$S_{i,j} = c_i L_{ij} [0.5(H_i - h_i + H_j - h_j)]^{1.18} \quad (20)$$

onde h_i é o nível do solo no nó i . A equação (18) pode então ser reescrita como:

$$\sum_{j \in J_i} Q_{ij} + C_i + 0.5 \sum_{j \in J_i} S_{ij} = 0 \quad \text{para toda pressão no nó } i \quad (21)$$

onde o vazamento S_{ij} é distribuído igualmente entre os nós i e j .

5.8.2 – Particularidades do modelo desenvolvido com relação ao cálculo do fator temporal de consumo

A informação disponível para a calibração das redes geralmente inclui a vazão abastecida total (Q_e), monitorada em campo. Entretanto, não se sabe, que parcela de Q_e é destinada ao consumo e aos vazamentos. Supondo-se que a distribuição espacial de demanda seja completamente conhecida e partindo do princípio que a vazão abastecida é composta de consumo e vazamentos, podemos escrever:

$$Q_e = C_{\text{setor}} + V_{\text{setor}} \quad (22)$$

onde: C_{setor} é o consumo ou demanda total do setor e V_{setor} representa o vazamento total do setor; também pode-se definir:

$$C_{\text{setor}} = \sum_{i=1}^{\text{nós}} C_i \quad (23)$$

$$\text{e } V_{\text{setor}} = \sum_{j=1}^{\text{trechos}} V_j \quad (24)$$

Um fator multiplicador dos consumos ou demandas denominadas de referência (C_{ref}) é utilizado para expressar a variação do consumo das horas do dia, de forma que:

$$C_i = \text{fator} \times C_{\text{ref},i}$$

$$C_{\text{setor}} = \text{fator} \times C_{\text{ref.setor}}$$

sendo i os nós da rede

$$C_{\text{ref.setor}} = \sum_{i=1}^{\text{nós}} C_{\text{ref},i} \quad (27)$$

C_{ref} é o consumo de referência, estabelecido com base no consumo mensal médio por quadra do setor, distribuído aos nós de acordo com as áreas de influência dos mesmos.

A substituição de (26) em (22) produz:

$$\text{fator} = \frac{Q_e - V_{\text{setor}}}{C_{\text{ref.setor}}} \quad (28)$$

A Figura 42 mostra que o fator é reavaliado iterativamente até que a convergência para determinado valor seja atingida. O processo iterativo inicia-se com o vazamento nulo. Com o fator calculado determina-se Q_k e Q_{sk} (que representam respectivamente a vazão e vazamento nos trechos para o passo k).

Permite-se então que se avalie a parcela da Q_e atribuída ao vazamento.

Figura 42 - Módulo do cálculo do fator de demanda

5.9–) Parâmetros dos operadores dos algoritmos genéticos adotados para a maior parte das simulações

Dentre as diversas possibilidades de implementação dos AGs, no presente estudo foram adotadas as seguintes características:

- **Geração da população inicial de soluções:** uma população inicial de NPOP indivíduos é gerada aleatoriamente;
- **Tamanho da população (NPOP):** Com base em referências tais como SIMPSON et al. (1994) foi adotada uma população de 30 soluções (indivíduos) para os AGs geracionais e 200 para os AGs *Steady State*;
- **Tipo de AG:** geracional elitista para o qual o número de iterações de AGs manteve-se fixa;
- Utilizou-se a técnica de substituição com elitismo para seleção dos indivíduos;

Diferenças entre os módulos

- **Tipo de AG:**

Módulo 1: geracional elitista e *Steady State*;

Módulo 2: geracional e elitista.

- **Recombinação:**

Módulo 1: simples de dois pontos com probabilidade de 95%;

Módulo 2: simples de dois pontos com probabilidade de 100%;

- **Mutação:**

Módulo 1: uniforme por gene com probabilidade de 2,1% (1/número de genes, no caso 1/48) de acordo com De Schaetzen (2000);

Módulo 2: uniforme por gene com probabilidade de 5%

5.10-) Critério de desempenho de modelo de calibração

A Water Research Centre (WRc, 1989) estabeleceu alguns critérios de de concordância de desempenho entre valores calculados e medidos de parâmetros de calibração (pressões e vazões), estes são apresentados na Tabela 6.

VAZÃO	PRESSÃO
± 5% de diferença entre os valores calculados e medidos de vazão, quando esta for maior que 10% da vazão total de alimentação do setor em estudo	0,5 m para 85% dos pontos monitorados
± 10% de diferença entre os valores calculados e medidos de vazão, quando esta for menor que 10% da vazão total de alimentação do setor em estudo	0,75 m para 95% dos pontos monitorados
	2,00 m para todos os pontos monitorados

Tabela 6 – Critérios de desempenho de modelos de calibração segundo a Water Reserch Centre (1989)

6- RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO DE OPERADORES GENÉTICOS E ALGORITMOS MAIS EFICIENTES

Foi implementada e codificada uma rotina computacional básica para calibração de redes de distribuição de água usando os algoritmos genéticos, considerando as seguintes características referência: AG geracional não elitista com 30 soluções (população), recombinação de dois pontos com probabilidade de ocorrência de 95%, mutação aleatória por gene com probabilidade de 5%, seleção do tipo “roleta”, consideração de perdas por vazamentos com parâmetros da literatura.

Foram investigados então diversas variantes no sentido de melhorar a eficiência da referida rotina, sendo variada uma característica de cada vez.

As análises comparativas foram realizadas a partir dos valores das funções de aptidão, pois os valores das diferenças entre pressões e vazões calculadas e medidas são diretamente ligados às aptidões. Tais parâmetros são analisados e apresentados com maiores detalhes no capítulo 7, onde os resultados dos modelos com as características finais adotadas são apresentados. As variáveis de decisão (as rugosidades dos trechos da rede) são também apresentadas no próximo capítulo, pois tratando-se de redes existentes, os valores das rugosidades reais não são disponíveis para comparação, sendo necessária principalmente uma comparação dos resultados obtidos através de simulações a partir de populações iniciais aleatórias distintas.

Apresenta-se, neste capítulo, um resumo das principais investigações realizadas no sentido de estabelecer as melhores formas de implementação para realização de ensaios de calibração apresentados no capítulo 7.

6.1-) Investigações no Setor de Monte Carlo (menor porte)

6.1.1-) Implementação do elitismo

A primeira comparação realizada a partir dos foi com relação aos resultados obtidos a partir da implementação do elitismo, que consiste na garantia de que as melhores soluções não se percam durante o processo de busca, permanecendo nas novas iterações de AG. No caso do número total de 30 soluções assegurou-se que 5 (IPOP) fossem mantidas na próxima iteração de AG, conforme explicado no capítulo anterior e esquematizado na Figura 36.

A definição do número de melhores soluções IPOP foi determinada a partir de testes com diferentes valores. Foram testados IPOP com valores de 1 e 5 sendo, adotado o último valor, que conduziu as melhores respostas. Ressalta-se ainda que IPOP não deve ter seu valor muito elevado para o problema não assumir uma natureza aleatória.

A evolução do valor da função de aptidão é ilustrada na Figura 43, que mostra o desempenho superior da evolução da função de aptidão com a implementação de elitismo.

Figura 43 - Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com e sem a implementação do elitismo

6.1.2-) Logaritmos das variáveis de decisão

O uso dos logaritmos (base 10) das variáveis de decisão (rugosidades) tem o objetivo de reduzir o espaço de busca, facilitando a determinação das variáveis de decisão do problema. Uma aplicação de logaritmos nas variáveis de decisão foi realizada por TUCCIARELLI et al. (1999).

A Figura 44 ilustra os testes comparativos realizados entre a implementação com e sem o uso de logaritmo das variáveis de decisão. Nota-se que, para o caso em estudo a utilização de logaritmos não produziu bons resultados. Observando a Figura 44 constata-se que o uso de logaritmos propiciou a convergência prematura produzindo, uma solução de qualidade inferior.

Figura 44 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com e sem a introdução de logaritmos às variáveis de decisão

6.1.3-) Comprimento da cadeia de características a serem trocadas

Cada cadeia representativa de uma solução possui uma quantidade de características de maneira a defini-la completamente.

Investigou-se um operador através do qual um número fixo ou variável de características de uma solução sofria recombinação para dar origem a novas soluções, a partir de um ponto escolhido aleatoriamente.

A Figura 45 ilustra a variação da aptidão ao longo das iterações para as formas de implementação trocando-se um número fixo e variável de características das soluções. Observa-se que a alternativa com quantidade fixa leva pequena vantagem sobre a alternativa com quantidade de características variáveis aleatoriamente.

Figura 45 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com quantidades de características recombinadas fixas e aleatórias

6.1.4-) Testes com diferentes técnicas de seleção

A análise dos diversos tipos de seleção implementados para o problema em estudo foi feita basicamente em termos da função de aptidão. As Figuras 46 a 47 ilustram os resultados obtidos para as diferentes implementações do operador de seleção, com e sem elitismo. Observa-se que os valores de aptidões são melhores sempre com a implementação do elitismo, mais discretamente em se tratando de seleção por roleta (Figura 46b) e torneio (Figura 47a) e de forma mais acentuada para seleção aleatória (Figura 46a) e proporcional (Figura 47b).

Figura 46 – Evolução da função de aptidão com e sem elitismo (a) seleção aleatória (b) seleção por roleta

Figura 47 – Evolução da função de aptidão com e sem elitismo (a) seleção por torneio (b) seleção proporcional

A Figura 48 ilustra os resultados da evolução da função de aptidão relativa aos diversos tipos de seleção implementados. A de escolha de melhores soluções apresenta melhores resultados e a seleção aleatória os piores.

Em alguns casos o uso de seleção através da “escolha das melhores soluções” pode não ser conveniente pelo fato de que, ao selecionar sempre as melhores alternativas, pode-se desperdiçar muito “material genético”, ou seja, soluções pobres são descartadas, que poderiam evoluir para uma boa solução. Entretanto, no caso, funcionou bem e produziu os melhores resultados.

Figura 48 – Comparação da evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs para os diversos tipos de seleção implementados

6.1.5-) Testes com diferentes técnicas de recombinação

Algumas das principais técnicas de recombinação mencionadas na literatura foram descritas no capítulo 4, e também implementadas, cujos resultados são mostrados pela Figura 49.

Figura 49 – Comparação da evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs para os diversos tipos de recombinação

Observa-se que para todos os tipos de recombinação analisados a evolução da função de aptidão é bastante parecida. Uma pequena melhoria foi obtida para a recombinação uniforme.

6.1.6-) Testes com diferentes taxas de mutação

Conforme apresentado no item 4.3, as taxas ou porcentagem de mutação (P_m) sugeridas na literatura geralmente são entre 1% e 5% ou proporcional ao número de características de cada solução ou número de genes (De SCHAEZTEN (2000) recomenda $P_m = 1 / N_{genes}$).

Os testes realizados limitaram-se às probabilidades de mutação de 1% e 5% e 10%. A probabilidade não convencionalmente usada de 10% foi usada

para se perceber o comportamento da função de aptidão quando se usa um valor extremo. É conhecido que as probabilidades de mutação elevadas podem fazer com que a busca assuma um caráter aleatório.

Os testes realizados sob diferentes taxas de mutação, conduziram a resultados muito parecidos conforme ilustrado na Figura 50. Observa-se que o comportamento da função de aptidão para as probabilidades de mutação de 10% apresentou um comportamento melhor nas primeiras 10 iterações de AGs; a partir da iteração 100 o comportamento das funções de aptidão são praticamente coincidentes.

Figura 50 – Testes comparativos para diferentes taxas de mutação

Observa-se que os testes feitos com diferentes taxas de recombinação também conduziram aos mesmos valores de funções de aptidão, sendo desta forma mantido o valor de 95% indicado no início deste capítulo.

6.1.7-) Redução do grau de parametrização do problema com a introdução de setorização

Buscou-se também a redução do grau de parametrização do problema através da setorização, ou seja, agrupamento de trechos de rede que compõem

uma zona ou região homogênea em termos das variáveis de decisão do problema (rugosidades).

Devido ao fato da área possuir tubulações de dois tipos de material, pvc e ferro fundido, de idades não muito distintas, fixaram-se a princípio duas zonas de rugosidades distintas.

Além disso, admitiu-se que um número pré-determinado de trechos com valores de rugosidades superiores aos dos setores a que pertencem, representando a presença de acessórios tais como válvulas conforme descrito no item 5.7.1.

Desta forma, foram propostos procedimentos específicos para a geração da população inicial e para a mutação; de forma a possibilitar que probabilidades de ocorrência de singularidades na forma de rugosidades diferenciadas sejam consideradas para os diversos trechos de rede.

Para determinação do número de acessórios a serem localizados no setor, além de principalmente informações cadastrais conforme apresentadas em no item 5.7.1, serviu-se de algumas simulações em que foram testadas diferentes quantidades de acessórios, avaliando-se o desempenho das aptidões, conforme indicação da Figura 51. A referida figura sugere que o desempenho da função de aptidão utilizando-se 25 acessórios conduz aos melhores resultados.

Figura 51 – Evolução da função de aptidão com a variação do número de trechos com grandes rugosidades

Na Tabela 7 são apresentados os resultados em termos dos valores das variáveis de decisão (rugosidades) obtidas sem a implementação da setorização. Percebe-se que os resultados obtidos a partir de populações aleatórias distintas são diferentes.

TRECHO	RUGOSIDADES (mm)									
	POP.1	POP.2	POP.3	POP.4	POP.5	POP.6	POP.7	POP.8	POP.9	POP.10
1	0,32	0,17	0,09	0,37	0,92	3,89	0,20	7,80	0,22	0,25
2	0,50	7,90	0,22	2,52	6,61	1,73	0,29	2,19	2,09	0,44
3	0,26	0,17	0,65	0,06	0,78	0,19	0,35	0,38	0,13	0,15
4	8,80	2,99	0,23	0,24	0,26	0,11	0,24	1,50	0,31	0,24
5	0,26	0,14	0,31	0,31	0,19	0,40	0,14	0,36	0,45	0,45
6	0,31	0,15	0,44	0,38	2,34	0,12	0,08	2,07	1,55	0,11
7	1,00	0,07	0,09	0,19	0,15	0,14	0,19	0,29	0,09	0,40
8	0,34	0,39	7,56	0,26	7,36	0,12	9,86	2,70	0,45	0,40
9	0,14	0,32	4,95	3,19	0,22	0,21	0,12	0,13	0,09	0,22
10	9,13	3,40	4,14	4,34	5,88	9,52	4,84	9,44	6,98	6,74
11	3,37	0,28	9,55	0,16	8,24	0,15	1,38	0,24	0,30	0,40
12	0,26	1,55	0,27	0,48	0,12	0,33	0,31	0,44	1,68	0,13
13	0,27	0,15	0,46	0,34	0,47	0,43	0,20	0,08	0,13	0,19
14	0,48	0,31	0,32	0,36	0,13	0,47	1,93	0,48	0,33	0,18
15	5,57	0,37	0,21	8,98	0,17	0,30	7,16	0,14	0,13	6,25
16	0,42	0,13	0,32	1,86	0,13	0,19	8,05	0,09	0,21	0,18
17	0,34	0,27	0,42	0,49	0,11	0,21	0,20	1,65	0,11	0,35
18	0,12	0,38	0,09	0,16	0,07	0,15	0,33	0,11	0,92	0,16
19	0,11	0,75	0,21	0,17	3,18	0,17	3,42	4,17	0,29	3,47
20	0,49	0,39	8,69	7,46	0,26	2,69	0,43	4,61	0,10	0,21
21	0,12	0,43	0,15	0,13	0,16	0,41	0,10	0,15	0,39	0,41
22	6,55	9,62	9,09	8,92	4,31	4,01	6,20	0,92	0,92	6,97
23	0,50	0,49	0,16	0,19	0,29	0,34	0,48	0,19	0,19	7,69
24	7,99	0,35	0,30	0,23	0,14	0,48	0,35	7,99	0,43	6,33
25	0,42	0,35	0,33	6,57	0,38	0,11	0,35	0,42	0,21	0,32
26	0,11	0,32	0,10	3,12	0,21	0,19	0,98	0,48	3,93	4,66
27	6,88	0,21	0,21	6,07	0,76	6,56	8,66	6,47	0,30	2,10
28	0,49	0,14	0,45	0,48	0,33	9,42	0,14	2,69	0,23	0,43
29	0,37	1,31	0,13	6,47	0,20	0,46	6,01	5,93	0,24	0,23
30	0,27	0,42	0,10	8,15	4,56	0,41	0,40	0,51	0,48	0,78
31	0,36	0,30	0,34	0,11	0,15	0,07	0,14	0,17	0,17	0,18
32	0,13	0,06	0,61	0,51	0,45	0,61	1,91	0,48	1,22	0,14
33	8,33	3,78	1,36	0,15	6,46	8,98	0,25	8,33	1,21	2,33
34	9,01	0,07	0,26	0,43	0,28	0,16	4,36	0,50	5,02	5,81
35	0,10	0,06	0,07	0,06	0,06	0,10	0,11	0,15	0,08	0,08
36	6,32	3,01	0,12	5,87	0,07	5,33	0,44	8,85	6,60	5,08
37	0,09	0,09	0,11	0,50	0,29	0,19	0,43	0,21	0,31	0,23
38	3,14	9,74	7,53	6,23	8,04	7,80	4,52	3,19	9,77	9,42
39	0,44	0,23	0,47	0,39	1,00	0,38	0,45	0,31	0,34	0,20
40	0,26	0,06	0,22	0,34	0,38	0,27	0,31	0,21	1,70	2,47
41	0,31	0,07	0,35	0,26	7,15	0,44	0,27	0,30	3,95	8,15
42	0,42	0,45	4,82	0,11	5,88	8,47	5,88	0,27	2,07	0,26
43	0,23	6,61	0,06	0,41	0,33	0,46	0,30	8,61	0,21	0,16
44	5,49	9,00	2,53	9,83	0,63	0,28	0,19	0,08	0,27	5,12
45	0,29	0,13	0,08	0,13	0,28	0,16	0,16	0,11	0,25	0,08
46	0,29	0,13	0,32	0,14	0,26	0,43	0,19	0,31	0,18	0,50
47	0,09	2,28	9,28	0,48	0,22	0,46	7,90	9,28	0,24	0,47
48	6,09	0,20	0,31	0,49	0,28	0,25	0,25	0,39	9,39	0,07
49	0,24	0,31	0,20	0,47	0,14	0,47	0,09	2,04	0,14	0,28
50	0,17	0,48	4,90	0,42	0,10	0,26	0,48	0,20	0,35	0,36
51	0,08	0,45	0,12	0,23	0,28	0,12	0,26	0,40	0,18	0,38
52	1,20	0,09	0,39	2,61	0,14	0,33	0,20	0,35	0,41	0,22
53	0,21	0,34	0,19	0,37	3,26	7,13	0,14	0,34	0,43	0,31
54	0,13	0,11	0,16	0,21	0,49	0,39	0,40	0,16	0,18	0,36
55	0,28	0,10	0,16	0,31	0,48	9,65	9,94	0,46	0,15	0,49
56	0,22	0,30	0,08	0,37	0,18	9,84	2,52	0,27	1,42	0,45
57	0,18	0,22	0,08	0,62	0,50	0,20	0,39	0,18	0,08	0,09
58	0,12	9,60	0,28	0,17	0,23	0,41	0,39	0,35	0,49	3,78
59	4,45	0,09	8,70	8,88	1,25	3,67	7,91	4,45	9,38	4,47
60	0,42	7,67	0,38	4,86	8,38	0,31	3,78	0,42	0,45	0,28
61	0,34	0,26	0,39	0,15	7,25	4,32	0,15	3,96	0,26	7,63
62	0,36	4,70	4,79	0,38	0,27	0,38	5,96	0,28	3,74	0,31
63	0,48	0,25	0,47	0,11	0,07	0,47	0,24	0,44	0,46	0,26
64	8,09	0,10	0,17	0,39	0,45	0,10	3,31	5,40	0,21	0,44
65	0,32	0,33	0,43	0,43	0,35	7,04	4,27	1,96	0,29	0,29
66	5,00	0,09	8,71	5,99	6,24	0,35	8,97	3,79	0,20	0,09
67	0,30	0,22	0,27	0,21	0,36	0,30	0,32	9,46	5,87	0,11
68	0,26	0,38	0,39	0,12	0,22	0,26	0,33	0,34	0,15	0,50
69	1,47	0,27	0,29	7,52	7,55	0,19	4,69	0,26	0,10	0,41
70	0,29	9,89	5,94	3,40	1,94	8,10	0,12	1,31	1,45	0,33
71	0,43	4,23	0,44	2,08	0,44	0,37	0,09	0,22	0,27	8,78
72	0,41	0,08	0,32	0,34	0,22	8,87	0,17	0,34	0,14	0,11
73	0,26	0,08	0,50	0,31	0,49	0,11	0,29	0,48	0,43	0,37
74	3,39	5,96	0,48	0,27	0,49	0,26	0,21	3,39	0,06	0,44
75	4,09	8,96	0,32	8,96	0,22	7,51	0,46	0,44	8,95	0,24
76	0,66	0,27	0,17	0,13	7,85	0,17	0,45	0,39	0,10	0,47
77	8,03	0,12	0,25	0,07	8,93	0,11	0,31	0,49	0,13	0,28
78	0,48	0,43	0,42	0,20	0,21	0,15	0,44	5,65	3,90	8,98
79	0,09	4,90	0,33	0,28	0,10	0,20	0,32	0,32	0,30	0,12
80	3,03	0,39	0,49	0,50	0,12	0,48	0,36	0,42	8,23	0,50
81	0,39	2,75	0,16	9,51	4,95	0,47	0,19	0,39	0,08	4,98
82	0,21	2,54	0,20	0,24	0,46	2,06	0,12	7,53	0,31	0,24
83	0,44	9,54	3,38	8,70	1,21	4,37	0,14	4,87	1,68	3,54

Tabela 7 – Rugosidades sem a introdução da setorização – 10 populações aleatórias

A Figura 52 mostra resultados obtidos após a implementação da setorização, em que a rede foi dividida em dois setores. Na figura indica-se a frequência com que trechos de rugosidades superiores às dos setores a que pertencem foram identificados para diferentes populações aleatórias iniciais, rugosidades estas atribuídas à presença de eventuais acessórios da rede.

O exame da Figura 52 permite constatar que, das 25 peças inicialmente previstas, 19 ocorrem com frequência acima de 50% das populações aleatórias simuladas (pode-se considerar bons os resultados, pois 19 corresponde a 76% do total de 25 peças) e 12 peças com frequência de 70%.

Figura 52 – Frequência de rugosidades com valores acima das atribuídas aos setores – Monte Carlo

Com a divisão da rede em dois setores determinou-se as respectivas rugosidades para cada um deles, sendo os resultados apresentados nas Figuras 53 e 54. Para o setor 1 (pvc) observa-se que as rugosidades variam de praticamente entre 0,06 mm e 0,08mm; pois somente duas populações produziram valores fora desta faixa, conferindo, desta forma, boa credibilidade aos resultados. No setor 2 (ferro fundido) as rugosidades praticamente ficam entre 0,25mm e 0,70 mm; uma variação maior que a obtida para o setor 1, mas ainda considerada razoável.

Figura 53 – Rugosidades atribuídas para o setor a partir de 10 populações iniciais aleatórias distintas – Setor 1

Figura 54 – Rugosidades atribuídas para o setor a partir de 10 populações iniciais aleatórias distintas – Setor 2

6.2-) Investigações sobre o Setor São Carlos 3 (maior porte)

Conforme descrito no capítulo anterior, no Setor São Carlos 3; 5 conjuntos de pontos de monitoramento de pressão foram considerados de

forma a caracterizá-lo melhor. A investigação de operadores mais eficientes para a rede de menor porte, Setor “Monte Carlo”, serviu como base para as investigações sobre a rede São Carlos 3. Assim as características que se apresentaram melhores foram adotadas.

A seguir são apresentadas as principais simulações feitas para o Setor São Carlos 3 de maior porte.

6.2.1-) Simulação com todos os conjuntos de pontos comparando os resultados para a condição de demanda mínima, média e máxima

Pelo fato da rede do Setor São Carlos 3 possuir um tamanho maior que o Setor Monte Carlo, utilizou-se uma quantidade maior de pontos de monitoramento; inviabilizando as simulações computacionais com dados relativos às 3 condições de demanda. Desta forma, investigou-se a condição de demanda que conduziria aos melhores valores da função de aptidão.

A Figura 55 ilustra os testes realizados de maneira que para a condição de demanda máxima as respostas em termos da função de aptidão são melhores, sendo esta condição adotada para os demais testes.

Figura 55 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs com o uso de todos os dados – condição de demanda mínima, média e máxima – São Carlos 3

6.2.2-) Simulação com todos os conjuntos de pontos com e sem a implementação de logaritmos nas variáveis de decisão

Os testes sobre os logaritmos das variáveis de decisão foram realizados aqui para a rede do Setor São Carlos 3, de maneira análoga àqueles feitos para a rede de menor porte.

A evolução dos valores da função de aptidão ao longo das iterações de AGs ilustrada pela Figura 56, mostra que a utilização dos logaritmos não produziu o efeito esperado.

Figura 56 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs – todos os conjuntos de pontos– condição de demanda máxima – com e sem logaritmo – São Carlos 3

6.2.3-) Simulação com todos os conjuntos – condição de demanda máxima – considerando a setorização de duas e três áreas

A setorização baseou-se principalmente no tipo de material utilizado, tentou-se aumentar o número de setores inicialmente fixado em dois, com intuito de melhoria da eficiência da rotina de otimização. De acordo com cadastros concluiu-se que o número de setores poderia chegar a três no

máximo, sendo o critério eleito para definição do terceiro setor a idade da tubulação.

Na Figura 57 compara-se a evolução dos valores da função de aptidão considerando-se 2 e 3 setores. Os respectivos valores obtidos para as funções de aptidão em ambos os casos foram muitos semelhantes. Desta forma, os dois setores foram mantidos para as demais simulações.

Figura 57 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AGs – todos os conjuntos – condição de demanda máxima – 2 e 3 setores

6.2.4-) Implementação dos AGs *Steady-State*

A partir deste item serão descritos os resultados obtidos a partir dos AGs *Steady State* (algoritmo apresentado em 5.7.1 (b)) com o propósito de identificar a implementação de AGs mais adequada ao problema de calibração em mãos, visto que os resultados até então apresentados são relativos aos AGs geracionais.

A Figura 58, mostra a evolução típica dos valores de aptidão máximo e médio bem como a sua variância ao longo das iterações de AGs obtidos usando algoritmos *Steady State*. A figura permite que se observe uma tendência de aproximação do valor da solução de maior aptidão em relação ao valor da média da aptidão de todas as soluções ao longo das iterações de AGs,

o que caracteriza a convergência demonstrando que no início do processo de evolução os valores de aptidão das soluções são mais distintos que nas iterações subsequentes. Tal comportamento é confirmado pela curva dos valores de variância onde os picos indicam o aparecimento de soluções com valores de aptidão diferenciados (pérolas).

Figura 58 – Variação da maior aptidão da população em relação a aptidão média e a variância

A Tabela 8 reporta os resultados obtidos através de simulações a partir de populações iniciais aleatórias distintas para as diferentes formas de implementação dos AGs.

População aleatória	Tipo de Algoritmo	Número de iterações de AGs	Aptidão x 10 ⁻⁴	Tempo de processamento (horas)
1	Steady State 1	3591	1,74	23,87
	Steady State 2	4863	1,77	32,47
	Geracional	1000	1,79	100,20
2	Steady State 1	3258	1,75	21,31
	Steady State 2	3306	1,75	21,33
	Geracional	1000	1,79	97,60
3	Steady State 1	3592	1,77	23,22
	Steady State 2	3603	1,77	23,10
	Geracional	1000	1,79	94,43
4	Steady State 1	1689	1,68	11,24
	Steady State 2	1776	1,68	11,52
	Geracional	1000	1,79	89,20
5	Steady State 1	3447	1,74	22,32
	Steady State 2	3548	1,74	23,45
	Geracional	1000	1,79	97,00
6	Steady State 1	2776	1,73	18,30
	Steady State 2	2863	1,74	19,07
	Geracional	1000	1,81	94,10
7	Steady State 1	3013	1,75	19,53
	Steady State 2	3056	1,75	20,01
	Geracional	1000	1,79	95,13
8	Steady State 1	3037	1,74	20,45
	Steady State 2	3945	1,76	33,26
9	Steady State 1	2217	1,73	17,56
	Steady State 2	2389	1,73	16,03
10	Steady State 1	2885	1,73	20,05
	Steady State 2	3484	1,74	23,22

** Steady State 1 e 2 se referem a dois critérios de convergência adotados para este tipo de AG.

Tabela 8 – Comparação de tempo computacional e eficiência para os tipos de algoritmos genéticos utilizados para diversas populações aleatórias

A Tabela contém indicação sobre o tempo de processamento computacional, considera-se que o tempo computacional é excessivo; mesmo com o uso de um computador Pentium III-550 mhz. Alguns fatores podem justificar este tempo de processamento gasto, tais como: a teoria dos AGs realmente consome mais tempo computacional que as técnicas de busca convencionais, a função de aptidão depende da avaliação hidráulica da rede que foi realizada com uma rotina não otimizada, a rede utilizada possui um tamanho considerável, principalmente por tratá-la em detalhes. Destaca-se que

os últimos testes realizados com computadores de última geração (ATHLON 1800 XP) que este tempo computacional foi reduzido para quase um terço.

Nota-se, que apesar dos AGs *Steady State* necessitarem evoluir por um maior número de iterações para atingir valores de aptidão comparáveis aos dos AGs geracionais, o seu tempo de processamento é bem menor que os AGs geracionais, chegando a ser cinco vezes inferior para as populações aleatórias analisadas. Este fato pode ser explicado, pois os AGs geracionais requerem a avaliação da população completa de soluções (no caso, adotada de tamanho 30 soluções) em todas as iterações. No caso de AGs *Steady State*, a avaliação da população total (adotado 200 soluções) só é feita na primeira iteração. Nas iterações seguintes, somente as duas novas soluções produzidas têm seus valores de aptidão avaliados. Tomemos, por exemplo, a primeira população aleatória, no caso nos algoritmos geracionais, até se atingir o valor de aptidão indicado final na Tabela 8, 30000 (1000 iterações x 30 soluções alternativas) avaliações da função de aptidão são necessárias. Para o algoritmo *Steady State* de acordo com o critério de convergência 1, e população aleatória 1, o número de avaliações corresponde a 7382 (3590 iterações x 2 soluções avaliadas por iteração + 200 soluções avaliadas na primeira iteração). Ou seja, um número aproximadamente quatro vezes menor de avaliações é realizado no AG *Steady State* em relação ao geracional.

Percebe-se também que, para a maior parte das populações aleatórias, o algoritmo *Steady State* requer um tempo de processamento computacional aproximado de 20 horas para alcançar um valor de aptidão na faixa de $1,73E-04$ a $1,77E-04$. A população aleatória 4 produziu o valor de $1,68E-04$ para a função de aptidão a um tempo computacional de aproximadamente 10 horas.

Já para os AGs geracionais o tempo de processamento computacional permaneceu entre 95 e 100 horas e o valor de aptidão em $1,79E-04$ para as

diversas populações iniciais de soluções. Além disso, o melhor valor de aptidão $1,81E-04$ foi obtido para o AG geracional.

Com o objetivo de análise dos resultados obtidos em termos das pressões simuladas e observadas, foram construídos os gráficos de barras das Figuras 59 a 61, onde as pressões observadas correspondem às barras em negrito.

Pode-se dizer que, independentemente do algoritmo utilizado, foi possível uma boa aproximação dos valores de pressão para a maioria dos pontos monitorados em campo.

Observa-se que a maioria dos desvios dos valores de pressão ficaram abaixo de 2 mH₂O, obedecendo a critérios internacionais descritos no capítulo 5 (item 5.10) da (Water Research Centre- WRC, 1989), como requisito para que as redes possam ser consideradas calibradas. Somente os pontos 97, 108 e 135 apresentam diferenças mais expressivas para todos os algoritmos, sugerindo possíveis erros de medida ou distorções topográficas.

Figura 59 – Pressões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os cinco conjuntos de pontos – *Steady State* – Critério de convergência 1

Figura 60– Pressões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os cinco conjuntos de pontos – *Steady State* – Critério de convergência 2

Figura 61 - Pressões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os cinco conjuntos de pontos – geracional

Do mesmo modo que na análise de pressões, para se fazer a análise dos resultados obtidos em termos de vazões simuladas e observadas, os gráficos de barras das Figuras 62, 63 e 64 são utilizados, onde as vazões observadas correspondem às barras em negrito.

Para todos os algoritmos utilizados, notou-se uma excelente aproximação dos valores de vazões da entrada do setor obtidos a partir de simulações para as diversas sequências aleatórias em relação aos valores medidos em campo. Com relação ao ponto interno ao setor, as diferenças entre os valores calculados e observados para todas as sequências aleatórias, são um pouco maiores que as obtidas para a entrada da rede.

Conclui-se de forma geral que os resultados são muito bons, pois a maioria dos valores dos desvios obedece normas internacionais.

Figura 62 – Vazões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os 5 conjuntos de pontos – *Steady State* – Critério de convergência 1

Figura 63 – Vazões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os cinco conjuntos de pontos – *Steady State* – Critério de convergência 2

Figura 64 – Vazões observadas (negrito) e simuladas com diversas populações aleatórias iniciais para os cinco conjuntos de pontos – geracional

A rede foi dividida em dois setores sendo que para qual foi determinada uma rugosidade conforme os gráficos da Figura 65.

Com relação às rugosidades relativas aos setores em estudo, os valores obtidos para todas as populações aleatórias, através de todos os algoritmos, são praticamente os mesmos para o setor 1, uma diferença um pouco maior é demonstrada no caso do setor 2.

Figura 65 – Rugosidades nos dois setores (várias seqüências aleatórias). (a) *Steady State* – critério de parada 1, (b) *Steady State* – critério de parada 2, (c) geracional

A análise relativa à incidência de trechos de rugosidades superiores aos setores a que pertencem conforme indicações da Figura 66 a seguir permite diversas conclusões. Primeiramente pode-se notar que o AG geracional identificou 25 condutos com frequência superior a 40% ao passo que o AG *Steady State* mostrou-se hábil em identificar 20 e 16 trechos para os critérios de convergência 1 e 2 respectivamente, com incidência superior a 20%.

No caso dos AGs geracionais foram identificados 20 condutos de rugosidades superiores as dos setores a que pertencem com frequência superior a 50% (acima da linha tracejada). Já no caso dos AGs *Steady State* foram identificados 10 e 12 condutos com esse perfil, de acordo com os critérios de parada 1 e 2 respectivamente.

Tais fatos permitem que se reafirme a robustez maior dos AGs geracionais quando comparados aos *Steady State*, principalmente considerando-se que o número de peças inicialmente estabelecido em 23

unidades é próximo dos 20 evidenciados pelos AGs geracionais, que confirmaram também a estimativa inicial

(a)

(b)

(c)

Figura 66 – Frequências de rugosidades com grandes valores (várias seqüências aleatórias). (a) *Steady State* – critério de parada 1, (b) *Steady State* – critério de convergência 2, (c) geracional

6.2.5-) Simulações com rotinas de calibração e de determinação de parâmetros de vazamentos em conjunto

A partir dos ensaios já realizados, conclui-se que, de forma geral que os resultados tem se mostrado bons, pois as diferenças entre os valores das variáveis de estado (pressões e vazões) calculado e observado são aceitáveis, considerando normas internacionais. Além disso, as rugosidades têm se repetido com boa frequência em muitos trechos para as diversas simulações realizadas.

Tendo em vista as características da rede em estudo, na qual o índice de vazamentos é expressivo, entende-se que os resultados já obtidos podem ser aprimorados realizando a calibração dos parâmetros da rede e do modelo de vazamentos conjuntamente. Para tanto, utilizou-se para vazamentos a rotina de CALIMAN (2001), para determinação dos parâmetros C1 e N1 da relação pressão x vazamento. Foi realizado um procedimento em duas fases descrito em detalhes no item 5.7.2, cujos resultados são apresentados no capítulo 7 do trabalho.

6.3-) Estudos dos pesos associados à calibração de redes de distribuição de Água

De acordo com as definições apresentadas no trabalho de REDDY et al. (1996), as diferenças entre os valores observados e simulados das variáveis de estado adotadas em problemas de redes de distribuição de água (no caso pressões e vazões) ocorrem principalmente por duas razões: o modelo não representa exatamente o sistema real e erros de medida. Presume-se que o modelo represente corretamente o sistema real e somente erros de medidas sejam considerados.

Alguns poucos trabalhos apresentados na literatura prevêem o uso de pesos na função de aptidão para normalizar os desvios de medidas. Entretanto observa-se que as metodologias utilizadas nem sempre tem aplicação direta quando se utilizam algoritmos evolucionários como é o caso.

Até então no trabalho ou se tem adotado pesos de acordo com testes preliminarmente realizados ou estes são desprezados. Na função de aptidão (reescrivendo a equação 17 do item 5.7.1), w_H e w_Q são os pesos atribuídos.

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^C \left\{ w_H^{(k,i)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{sim i} - P_{obs i}}{[\sum_{i=1}^N P_{obs i}] / N} \right]^2 + w_Q^{(k,i)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\frac{Q_{sim j} - Q_{obs j}}{[\sum_{j=1}^M Q_{obs j}] / M} \right]^2 \right\} \right\}_k^{-1}$$

(equação 17 – item 5.7.1 – reescrita)

sendo: P – carga de pressão (m)

Q – vazão (L/s)

N - conjunto de pontos de observação de valores de pressão

M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão

C - número de condições de demanda ou dias de observação

w_H, w_Q – pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão

sim, obs - denotam valores simulados e observados,

respectivamente.

Observa-se que são diversas as possibilidades de uso de pesos na função de aptidão, por exemplo, podem-se utilizar pesos distintos ou não para as diferentes variáveis de estado do problema (pressão e vazão) ou para as diferentes condições de demanda; também se podem utilizar pesos distintos para cada ponto de observação ou grupos de conjuntos de pontos.

Independentemente das possibilidades de implementação dos pesos na função de aptidão, estes podem ser fixos ou variáveis ao longo das iterações do método de busca empregado para minimização dos desvios. Estas variações podem ser aleatórias ou baseadas em critérios.

Com relação ao estudo dos pesos, alguns testes foram realizados para as duas redes (menor e maior porte) sendo que os estudos mais detalhados foram

concentrados na rede de menor porte e são descritos a seguir. Para a rede de menor porte, “Setor Monte Carlo”, foram realizadas as simulações descritas na Tabela 9 com o objetivo de investigar a importância dos pesos.

Descrição da simulação	Número da simulação
Pesos fixos ao longo das iterações de AGs e adotados iguais para todos os padrões de demanda e diferenciados para as grandezas de pressão e vazão	01
Pesos fixos ao longo das iterações de AGs e diferenciados para cada padrão de demanda e para as grandezas de pressão e vazão (sendo os pesos relativos a pressão inferiores aos de vazão)	02
Pesos fixos ao longo das iterações de AGs e diferenciados para cada padrão de demanda e para as grandezas de pressão e vazão (sendo os pesos relativos a pressão superiores aos de vazão)	03
Pesos variados aleatoriamente ao longo das iterações de AGs e diferenciados para cada padrão de demanda e para as grandezas de pressão e vazão. Sendo estes também diferenciados por ponto de medida	04
Pesos fixos ao longo das iterações de AGs e diferenciados para cada padrão de demanda e para as grandezas de pressão e vazão. Sendo estes também diferenciados por ponto de medida	05
Pesos variados aleatoriamente ao longo das iterações de AGs e diferenciados para cada padrão de demanda e para as grandezas de pressão e vazão. Sendo estes também diferenciados por ponto de medida, entretando aqui considera-se o peso fixo após determinada etapa de evolução.	06
Sem o uso de pesos	07

Tabela 9 - Descrição das simulações realizadas para o estudo dos pesos

A equação 17 é invertida, pois ao invés de se minimizar as diferenças entre valores calculados e simulados, maximiza-se o inverso. Na análise do estudo de pesos utilizaram-se os desvio da função de aptidão sem a inversão, de acordo com Figura 67, sendo que a função de menor valor representa o melhor resultado.

Observa-se que a diferença máxima de resultados entre as diversas simulações não supera o valor de 150, sendo que para o caso específico da simulação 7 (sem a consideração do uso de pesos na função de aptidão) conduz aos menores desvios e conseqüentemente melhor calibração. As simulações que mais se aproximam desta última em termos de bons resultados são as simulações 1 e 3; e os piores desvios ocorrem para as simulações 4 e 5.

Figura 67 - Desvios da função de aptidão para as diversas simulações relativas pesos realizadas

A Figura 68 demonstra a evolução dos valores apresentados na Figura 67 com a evolução das iterações de AGs. Percebe-se que, como é de se esperar, em um processo de minimização, os desvios vão diminuindo com o aumento das iterações de AGs.

Figura 68 - Soma dos desvios quadrados da função de aptidão para as diversas simulações ao longo das iterações de AGs (gerações)

Uma consideração que se pode fazer aqui é que ao introduzirmos pesos em uma função de aptidão o valor final desta função é perturbado e não se podem fazer comparações de resultados de funções de aptidões com diferentes pesos. As análises comparativas foram centradas nas diferenças entre os parâmetros calculados e medidos sem o uso de tais pesos.

7-) RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO MODELO DE CALIBRAÇÃO PROPOSTO

Os testes de calibração foram realizados para uma rede teórica e para duas redes reais. Para a última rede real de maior porte, o modelo de duas fases aqui proposto foi testado em que os parâmetros de calibração de rede e de vazamentos foram determinados conjuntamente de forma iterativa.

7.1-) Resultados obtidos para a rede teórica

A rede teórica extraída do trabalho de JOWITT & XU (1990) foi utilizada para a determinação de rugosidades em trechos da rede através do uso dos algoritmos genéticos, a partir de sete populações aleatórias iniciais distintas.

Utilizou-se para esta rede os AGs geracionais e os *Steady State*. Os critérios de convergência foram definidos com base no número de iterações de AGs (geracionais) e além deste critério a comparação entre os valores de aptidão máxima e média das soluções para os AGs *Steady State*, sendo um indicativo que no momento em que a aptidão máxima se aproxima da aptidão média das soluções de determinada iteração de AG, a melhoria das soluções torna-se dificultada. Um outro critério de convergência ocasionalmente usado para os AGs *Steady State* foi com base na variância de todos os valores de aptidões das soluções, ou seja, um conjunto de soluções de uma determinada população tem valores de aptidões diversos que à medida que as iterações aumentem, estas aptidões tendem a se aproximar, desta forma

reduzindo as chances de evolução das soluções e o problema deve ser finalizado.

A Figura 69 mostra a evolução dos valores da função de aptidão máximos e médios ao longo das iterações de AGs. Em linhas gerais nota-se que conforme explicado, a tendência é de que a aptidão média se aproxime cada vez mais da máxima ao longo das iterações de AGs para todas as populações aleatórias iniciais distintas.

Figura 69 -Evolução da função de aptidão máxima e média ao longo das iterações de AGs para 7 populações aleatórias distintas

Na Tabela 10 são apresentados os valores de pressões e vazões medidas e calculadas para nós da rede monitorados, para 3 condições de demanda e 7 populações aleatórias distintas.

Nota-se que o erro absoluto médio de pressão (obtido subtraindo os valores considerados medidos da média dos valores simulados para todas as populações aleatórias) atinge no máximo a 0,60 mH₂O, chegando, para a condição de demanda mínima, a um máximo de 0,08 mH₂O. Observou-se que os maiores desvios em relação às pressões observadas ocorrem para a condição de demanda máxima, sendo que o maior desses erros sempre ocorre no nó 20.

Com relação às vazões, na mesma Tabela 10, constata-se que o maior erro percentual é de 1,80% para a condição de demanda mínima. Nota-se também que os maiores erros ocorrem para a Entrada 1 e os menores para a Entrada 2, sendo que se pode em geral considerar a oscilação dos valores de vazões simulados baixa para as diferentes populações aleatórias simuladas.

Novamente, as diferenças entre os valores calculados e observados atendem a normas internacionais.

CONDIÇÃO DE DEMANDA MÁXIMA

PONTO	PRESSÃO MEDIDA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mH ₂ O)
		POP. ALEAT 1	POP. ALEAT 2	POP. ALEAT 3	POP. ALEAT 4	POP. ALEAT 5	POP. ALEAT 6	POP. ALEAT 7	
2	37,74	37,55	37,69	37,50	37,65	37,69	37,68	37,70	0,10
5	38,89	39,07	39,05	39,01	39,15	39,09	39,07	39,05	0,18
20	45,03	45,57	45,55	45,61	45,60	45,53	45,78	45,67	0,59
21	42,45	42,25	42,35	42,33	42,36	42,29	42,36	42,36	0,12
22	37,32	37,11	37,22	37,29	37,20	37,09	37,22	37,18	0,13

PONTO	VAZÃO MEDIDA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO PERCENTUAL MÉDIO
		POP. ALEAT 1	POP. ALEAT 2	POP. ALEAT 3	POP. ALEAT 4	POP. ALEAT 5	POP. ALEAT 6	POP. ALEAT 7	
ENTRADA1	167,14	165,31	165,31	165,38	165,34	165,34	165,44	165,26	1,08
ENTRADA2	-20,40	-20,48	-20,50	-20,46	-20,68	-20,43	-20,53	-20,49	0,53
ENTRADA3	99,06	98,48	98,52	98,41	98,63	98,41	98,40	98,56	0,58

CONDIÇÃO DE DEMANDA MÉDIA

PONTO	PRESSÃO MEDIDA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mH ₂ O)
		POP. ALEAT 1	POP. ALEAT 2	POP. ALEAT 3	POP. ALEAT 4	POP. ALEAT 5	POP. ALEAT 6	POP. ALEAT 7	
2	37,84	37,72	37,81	37,69	37,78	37,60	37,79	37,82	0,07
5	40,07	40,18	40,17	40,14	40,23	40,19	40,18	40,17	0,11
20	47,07	46,83	46,81	46,85	46,84	46,81	46,95	46,88	0,22
21	43,77	43,65	43,71	43,71	43,72	43,68	43,72	43,73	0,07
22	38,72	38,60	38,67	38,71	38,66	38,60	38,67	38,66	0,07

PONTO	VAZÃO MEDIDA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO PERCENTUAL MÉDIO
		POP. ALEAT 1	POP. ALEAT 2	POP. ALEAT 3	POP. ALEAT 4	POP. ALEAT 5	POP. ALEAT 6	POP. ALEAT 7	
ENTRADA1	157,62	155,53	155,35	155,73	154,89	155,45	155,29	155,25	1,44
ENTRADA2	-47,37	-47,15	-46,95	-47,27	-46,58	-47,18	-46,79	-46,84	0,85
ENTRADA3	74,23	73,60	73,59	73,52	73,66	73,70	73,51	73,58	0,66

CONDIÇÃO DE DEMANDA MÍNIMA

PONTO	PRESSÃO MEDIDA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	PRESSÃO SIMULADA (mH ₂ O)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mH ₂ O)
		POP. ALEAT 1	POP. ALEAT 2	POP. ALEAT 3	POP. ALEAT 4	POP. ALEAT 5	POP. ALEAT 6	POP. ALEAT 7	
2	37,91	37,85	37,90	37,84	37,88	37,69	37,89	37,89	0,03
5	40,90	40,96	40,96	40,95	40,99	40,97	40,97	40,95	0,06
20	47,84	47,74	47,74	47,74	47,76	47,74	47,80	47,77	0,08
21	44,72	44,67	44,70	44,69	44,71	44,69	44,71	44,71	0,02
22	39,72	39,67	39,71	39,73	39,71	39,68	39,71	39,71	0,02

PONTO	VAZÃO MEDIDA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO PERCENTUAL MÉDIO
		POP. ALEAT 1	POP. ALEAT 2	POP. ALEAT 3	POP. ALEAT 4	POP. ALEAT 5	POP. ALEAT 6	POP. ALEAT 7	
ENTRADA1	148,40	146,09	145,74	146,40	144,86	145,92	145,45	145,59	1,80
ENTRADA2	-74,62	-74,08	-73,66	-74,39	-72,79	-74,14	-73,33	-73,49	1,24
ENTRADA3	49,21	48,46	48,40	48,46	48,41	48,70	48,35	48,38	1,54

Tabela 10 - Valores de pressões e vazões medidos e obtidos pelo modelo de simulação

Na Tabela 11 são apresentados os valores de rugosidades obtidos a partir de diversas populações aleatórias iniciais. Nota-se que, embora todos os conjuntos de rugosidades correspondentes às diversas populações aleatórias conduzam a valores de pressões e vazões simulados próximos aos valores

medidos, os conjuntos de rugosidades obtidos para cada população aleatória são distintos.

TRECHO	POP. ALEAT 1 RUGOSIDADE (mm)	POP. ALEAT 2 RUGOSIDADE (mm)	POP. ALEAT 3 RUGOSIDADE (mm)	POP. ALEAT 4 RUGOSIDADE (mm)	POP. ALEAT 5 RUGOSIDADE (mm)	POP. ALEAT 6 RUGOSIDADE (mm)	POP. ALEAT 7 RUGOSIDADE (mm)
1	9,30	0,38	10,05	0,37	0,39	0,36	0,05
2	0,27	0,28	0,25	0,33	0,27	0,29	0,28
3	0,28	0,38	0,39	0,05	7,98	0,39	0,17
4	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,32
5	0,05	0,06	0,05	0,55	0,10	0,14	0,33
6	0,05	0,37	0,05	0,05	0,05	0,05	0,12
7	0,05	0,29	0,05	0,05	0,19	0,05	0,05
8	0,33	0,47	0,05	0,27	0,39	0,34	1,48
9	0,40	0,30	1,34	0,38	0,40	0,33	0,39
10	0,24	0,35	0,39	0,09	0,36	0,17	0,50
11	0,21	0,36	0,38	0,32	0,14	0,36	0,39
12	0,05	0,05	0,05	0,05	0,18	0,05	0,05
13	7,64	0,31	0,39	0,37	0,48	6,34	8,94
14	2,79	9,38	9,01	7,77	7,77	0,40	0,39
15	0,15	0,09	0,18	0,34	0,30	0,24	0,05
16	7,87	2,50	0,40	2,35	1,30	7,04	8,00
17	0,32	8,50	9,03	8,17	9,28	8,54	8,94
18	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06
19	3,94	1,69	9,88	1,43	0,15	8,18	1,10
20	0,05	0,20	0,25	0,37	0,05	0,17	0,10
21	0,28	0,46	0,26	0,38	3,96	0,39	0,40
22	0,09	0,23	0,05	0,35	0,22	0,05	0,36
23	0,09	0,13	0,23	0,20	0,25	0,30	0,38
24	0,22	0,30	0,13	0,35	0,11	1,00	0,30
25	0,05	0,31	0,05	0,13	0,05	0,37	3,84
26	0,19	0,19	0,21	0,36	0,37	0,17	0,37
27	0,05	0,05	0,22	0,05	0,33	0,30	0,05
28	4,17	0,39	0,39	0,51	3,33	0,51	1,00
29	0,05	7,45	9,94	0,36	0,34	0,23	0,06
30	0,39	0,38	0,39	0,08	0,40	0,24	0,26
31	0,34	0,25	7,25	0,05	0,16	0,27	0,37
32	0,21	0,25	0,39	0,17	0,15	0,36	0,19
33	0,75	7,28	0,31	9,11	9,48	4,35	0,05
34	9,20	1,56	9,85	0,05	0,92	0,35	0,38
35	0,09	9,13	8,54	10,01	0,05	9,07	0,51
36	0,40	0,39	5,65	0,35	1,24	0,12	0,16
37	0,33	0,05	0,09	0,34	0,22	0,36	0,05

Tabela 11 - Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de simulação para diferentes populações aleatórias

7.2-) Resultados do modelo de calibração obtidos para o Setor de menor porte “Monte Carlo”

Para os estudos de calibração do Setor Monte Carlo, não se considerou as duas etapas de calibração. As características obtidas a partir de estudos demonstrados no capítulo 6, foram aqui geralmente consideradas. As variáveis de decisão consideradas compreendem as rugosidades nos trechos da rede e localização de acessórios ou eventuais obstáculos que provoquem perda de carga localizada na rede. Os vazamentos foram considerados explicitamente no modelo, entretanto o coeficiente e expoente, C1 e N1 utilizados foram os da literatura (N1=1,18 e C1=1E-05 (L/s.m)). Os parâmetros do modelo de

vazamentos C1 e N1 obtidos para a rede em estudo foram utilizados efetivamente para a rede de maior porte São Carlos 3.

A Figura 70 mostra uma curva típica de evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AG. Somente a curva relativa a uma população aleatória de solução inicial é apresentada, devido ao formato geral desta curva ser semelhante para outras populações iniciais aleatórias.

Figura 70 – Formato geral da evolução da função de aptidão ao longo das iterações

Nas análises aqui desenvolvidas foram consideradas 10 populações aleatórias distintas. Os maiores valores das funções de aptidões obtidas para todas as populações aleatórias são apresentados na Figura 71. Constatase que tais valores se situam dentro de uma faixa de aproximadamente 0,0096 a 0,0103 considerada relativamente pequena, conferindo certa consistência aos resultados.

Figura 71 – Maiores valores de aptidões obtidas as população aleatória iniciais distintas – Setor Monte Carlo

A análise de frequências de trechos que representem possíveis acessórios da rede e as rugosidades relativas aos setores da rede para as 10 populações iniciais aleatórias distintas foram apresentadas no item 6.1.7 .

As Figuras 72 a 77 mostram a variação dos valores de rugosidades para as 10 populações iniciais distintas relativos aos trechos de rede que tiveram frequência acima de 80% de aparecimento nos resultados obtidos para 10 populações aleatórias iniciais distintas.

Em geral ao analisar as Figura 72 a 77 considera-se que as rugosidades têm seus valores relativamente bem definidos variando dentro de uma faixa considerada percentualmente baixa, desconsiderando algumas simulações produzidas por algumas poucas populações aleatórias iniciais que claramente tem comportamento distinto das demais.

Figura 72 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 39 para todas as populações aleatórias iniciais distintas

Figura 73 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 46 para todas as populações aleatórias iniciais distintas

Figura 74 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 59 para todas as populações aleatórias iniciais distintas

Figura 75 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 61 para todas as populações aleatórias iniciais distintas

Figura 76 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 70 para todas as populações aleatórias iniciais distintas

Figura 77 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 77 para todas as populações aleatórias iniciais distintas

De acordo com o item 5.7.1 (B), baseado em 3 tipos de informações buscadas na companhia de água local, foram atribuídas probabilidades de ocorrência de trechos com maiores rugosidades.

Conclui-se que, para esta rede, dos 10 trechos com maiores probabilidades de ocorrência, sete deles encontram-se entre os trechos com maiores frequências para simulações com diferentes populações aleatórias, indicando desta forma eficiência no uso de localização de acessórios na rede.

As Figuras 78, 79 e 80 possibilitam comparações entre as pressões medidas e simuladas para as três condições de demanda consideradas, onde a primeira barra, em **negrito** é relativa ao valor observado de pressão e as barras restantes são referentes aos valores produzidos pelo modelo para as diversas populações iniciais aleatórias distintas.

Pode-se afirmar que de forma geral as diferenças entre os valores simulados e medidos são baixas, sendo que os melhores resultados são relativos à condição de demanda máxima e o nó 51 o que apresenta a pior aproximação. Constata-se também que os valores de pressões calculados para as diferentes populações aleatórias tem praticamente o mesmo valor.

Figura 78 – Pressões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – demanda máxima

Figura 79 – Pressões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – demanda média

Figura 80 – Pressões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – demanda mínima

A Figura 81 possibilita as comparações entre os resultados produzidos pelo modelo em termos das medidas de vazão realizadas em campo. Neste setor, o único ponto de monitoramento de vazão foi localizado na entrada do mesmo.

Constata-se que as maiores diferenças entre valores simulados e medidos são observadas para a condição de demanda mínima chegando a pouco menos de 1 l/s. As condições de demanda máxima e média os valores calculados praticamente coincidem com os valores medidos.

Figura 81 – Vazões simuladas e medidas para todas as populações aleatórias – três condições de demanda

Tanto para pressão quanto vazão para a condição de demanda máxima os melhores resultados são observados, pois, nesta condição as perdas de carga são maiores e com isto a sensibilidade de resposta, possibilitando uma melhor resposta do modelo.

Apesar de no geral os valores dos parâmetros de pressão e vazão simulados e calculados ficarem próximos, alguns poucos resultados obtidos podem ser considerados apenas regulares, como é o caso do ajuste dos valores de vazões para a condição de demanda mínima (Figura 81); este comportamento pode ser justificado pelo uso de coeficientes de vazamentos da literatura.

Desta forma a necessidade de levantamento de dados de vazamentos para a rede local em estudo é fundamental e constatou-se também a necessidade de os parâmetros de calibração e de vazamentos serem determinados conjuntamente conforme realizado no item 7.3. para a rede de maior porte.

7.3-) Resultados do modelo de calibração e de determinação de parâmetros de vazamentos aplicados conjuntamente para o Setor de maior porte “São Carlos 3”

Conforme descrito no item 5.7.2 (A), para a rede em estudo São Carlos 3 as simulações foram realizadas conjuntamente com duas rotinas (módulo 1 em que se determina parâmetros de calibração da rede e módulo 2 para determinação de parâmetros de vazamentos).

Inicialmente avaliam-se os resultados das funções de aptidão obtidas a partir de simulações realizadas com os dois módulos. A Figura 82 mostra os resultados referentes às simulações realizadas com o módulo 1. A representação é feita dos valores das funções de aptidão para todas as populações aleatórias simuladas e para cada iteração realizada com os dois módulos até que ocorra a convergência de acordo com critérios estabelecidos.

A Figura 82 mostra que a função de aptidão do módulo 1 tende a decrescer ao longo das simulações, ao passo que o desenvolvimento da curva da função de aptidão (módulo 2 – Figura 83) aparenta um crescimento com o aumento das iterações. Isto parece ser explicado dar pelos ajustes que são feitos ao longo de cada iteração.

Figura 82 – Evolução da função de aptidão para rotina do módulo 1 - populações aleatórias distintas

Figura 83 – Evolução da função de aptidão para rotina do módulo 2 - populações aleatórias distintas

As Figuras 84 a 93 mostram os valores das rugosidades dos setores para 10 populações aleatórias iniciais relativas ao módulo 1 de simulação. Observa-se que as rugosidades oscilam pouco ao longo das iterações, principalmente para o setor 1 (pvc) e um pouco mais para o setor 2 (amianto), mas dentro de uma faixa considerada pequena.

Figura 84 - Rugosidades dos setores—população aleatória 1

Figura 85 - Rugosidades dos setores—população aleatória 2

Figura 86 - Rugosidades dos setores—população aleatória 3

Figura 87 - Rugosidades dos setores—população aleatória 4

Figura 88 - Rugosidades dos setores—população aleatória 5

Figura 89 - Rugosidades dos setores—população aleatória 6

Figura 90 - Rugosidades dos setores—população aleatória 7

Figura 91 - Rugosidades dos setores—população aleatória 8

Figura 92 - Rugosidades dos setores—população aleatória 9

Figura 93 - Rugosidades dos setores—população aleatória 10

Nas Figuras 94 e 95 é feita à mesma análise para as rugosidades relativas aos setores, entretanto para os valores finais após as iterações e para as 10 populações aleatórias. Observa-se que no Setor 1 para todas as populações aleatórias o valor da rugosidade é o mesmo e no Setor 2 existe uma variação dentro de uma pequena faixa de valores.

Figura 94 – Variação da rugosidade atribuída ao Setor 1 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 95 – Variação da rugosidade atribuída ao Setor 2 para todas as populações aleatórias distintas

Da mesma forma que com o Setor Monte Carlo, as simulações foram realizadas com 10 populações aleatórias de soluções iniciais distintas.

O número de trechos com rugosidades maiores que as atribuídas aos setores da rede foi definida aqui em 23, com base em informações cadastrais e coerentes com as informações de entrada da rede.

A análise de frequência é apresentada na Figura 96, demonstrando que dos 23 acessórios previstos no modelo, 15 foram localizados com frequência acima de 70% e 8 com 100% de ocorrência.

Figura 96 – Frequência de rugosidades com valores acima das atribuídas aos setores – Setor São Carlos 3

Do mesmo modo que para o Setor Monte Carlo, as Figuras 97 a 104 mostram a variação dos valores de rugosidades para as 10 populações iniciais distintas, relativos aos trechos de rede com frequência de 100%, ou seja, aqueles trechos que foram selecionados para todas as populações aleatórias consideradas.

Em geral considera-se que as rugosidades têm seus valores relativamente bem definidos desconsiderando algumas simulações produzidas por algumas poucas populações aleatórias iniciais. Destes trechos, o único que parece ter uma variação maior é o trecho 153.

Figura 97 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 76 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 98 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 101 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 99 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 109 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 100 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 133 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 101 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 136 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 102 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 138 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 103 – Variação da rugosidade atribuída ao trecho 152 para todas as populações aleatórias distintas

Figura 104– Variação da rugosidade atribuída ao trecho 153 para todas as populações aleatórias distintas

Apesar de as simulações realizadas para diferentes populações aleatórias indicarem vários trechos com altas frequências conforme mostrado na Figura 96, poucos destes trechos aparecem entre aqueles com maiores probabilidades de ocorrências segundo as 3 informações obtidas junto ao serviço de água local. Pode-se atribuir este fato à maior dimensão da rede e conseqüente crescente dificuldade em identificar os trechos com maiores e rugosidades e ou informações de pior qualidade obtidas.

O modelo de simulação do módulo 2 determinou os coeficientes da relação pressão vazamento C1 e N1 descritos no capítulo 5. Os resultados são apresentados nas Tabelas 12 a 21 mostram o desenvolvimento dos valores de C1 e N1 para as simulações e para cada população aleatória de soluções. Observa-se que para este módulo foram identificados três setores aqui denominados de áreas (para distinguir do termo setor usado para o módulo 1), de acordo com informações de vazamentos disponíveis em cada um deles.

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 1

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		C1x10E5 (L/s.m)	N1	C1x10E5 (L/s.m)	N1	C1x10E5 (L/s.m)	N1
ITERAÇÃO 1	24,11	1,677	0,627	8,179	0,654	8,557	0,547
ITERAÇÃO 2	24,20	0,912	0,576	6,815	0,625	7,625	0,750
ITERAÇÃO 3	25,02	0,912	0,576	6,815	0,625	7,625	0,750

Tabela 12 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 1

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 2

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		C1x10E5 (L/s.m)	N1	C1x10E5 (L/s.m)	N1	C1x10E5 (L/s.m)	N1
ITERAÇÃO 1	23,55	1,026	0,600	7,070	0,621	6,252	0,801
ITERAÇÃO 2	22,97	2,179	0,529	2,390	0,758	7,537	0,848
ITERAÇÃO 3	23,83	1,026	0,600	6,789	0,621	6,252	0,801
ITERAÇÃO 4	23,89	1,026	0,600	6,789	0,621	6,252	0,801

Tabela 13 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 2

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 3

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		C1x10E5 (L/s.m)	N1	C1x10E5 (L/s.m)	N1	C1x10E5 (L/s.m)	N1
ITERAÇÃO 1	23,97	1,440	0,574	6,578	0,617	7,818	0,742
ITERAÇÃO 2	24,45	1,440	0,574	6,578	0,617	7,818	0,742

Tabela 14 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 3

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 4

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI
ITERAÇÃO 1	22,68	3,490	0,492	4,053	0,645	9,534	0,707
ITERAÇÃO 2	22,74	2,601	0,543	5,179	0,590	6,877	0,830
ITERAÇÃO 3	23,30	2,601	0,543	5,179	0,590	6,877	0,830

Tabela 15 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 4

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 5

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI
ITERAÇÃO 1	23,32	1,906	0,484	7,185	0,559	6,657	0,821
ITERAÇÃO 2	24,14	1,827	0,486	7,185	0,504	6,657	0,821
ITERAÇÃO 3	24,09	1,827	0,486	7,185	0,504	6,657	0,821

Tabela 16 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 5

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 6

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI
ITERAÇÃO 1	22,99	3,182	0,531	3,534	0,719	6,921	0,805
ITERAÇÃO 2	25,12	0,930	0,611	5,874	0,490	8,047	0,823
ITERAÇÃO 3	25,55	0,930	0,611	5,874	0,490	8,047	0,823

Tabela 17 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 6

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 7

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI
ITERAÇÃO 1	24,23	2,452	0,488	8,900	0,541	4,528	0,860
ITERAÇÃO 2	23,80	2,452	0,488	8,900	0,541	4,528	0,860

Tabela 18 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações – População aleatória 7

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 8

	F.O	ÁREA 1		ÁREA 2		ÁREA 3	
		<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI	<i>C1x10E5</i> (L/s.m)	NI
ITERAÇÃO 1	24,34	2,135	0,584	8,154	0,623	8,918	0,568
ITERAÇÃO 2	22,54	1,757	0,719	6,736	0,602	9,393	0,606
ITERAÇÃO 3	22,87	1,757	0,719	6,736	0,602	9,393	0,606

Tabela 19 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações - População aleatória 8

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 9

	<i>F.O</i>	<i>ÁREA 1</i>		<i>ÁREA 2</i>		<i>ÁREA 3</i>	
		<i>C1x10E5</i> (<i>L/s.m</i>)	<i>N1</i>	<i>C1x10E5</i> (<i>L/s.m</i>)	<i>N1</i>	<i>C1x10E5</i> (<i>L/s.m</i>)	<i>N1</i>
<i>ITERAÇÃO 1</i>	23,21	1,088	0,649	6,507	0,721	9,657	0,564
<i>ITERAÇÃO 2</i>	23,15	1,088	0,649	6,507	0,721	9,657	0,564

Tabela 20 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –
População aleatória 9

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 10

	<i>F.O</i>	<i>ÁREA 1</i>		<i>ÁREA 2</i>		<i>ÁREA 3</i>	
		<i>C1x10E5</i> (<i>L/s.m</i>)	<i>N1</i>	<i>C1x10E5</i> (<i>L/s.m</i>)	<i>N1</i>	<i>C1x10E5</i> (<i>L/s.m</i>)	<i>N1</i>
<i>ITERAÇÃO 1</i>	22,62	1,818	0,555	8,126	0,619	6,235	0,698
<i>ITERAÇÃO 2</i>	22,54	1,871	0,535	3,815	0,650	8,768	0,793
<i>ITERAÇÃO 3</i>	23,85	1,167	0,621	1,537	0,560	8,047	0,895
<i>ITERAÇÃO 4</i>	25,25	1,167	0,621	1,537	0,560	8,047	0,895

Tabela 21 – Desenvolvimento de C1 e N1 ao longo das iterações –
População aleatória 10

Para melhor visualização, uma representação gráfica dos valores finais de C1 e N1 para cada população aleatória é apresentada nas Figuras 105 a 107 a seguir para as três áreas (setores) definidas por CALIMAN (2002).

Observa-se que os valores de N1 são muito parecidos para todas as populações aleatórias e para todas as áreas analisadas. Os valores de C1 também são bastante próximos para todas as populações aleatórias principalmente para as áreas 2 e 3.

Figura 105 – Valores de C1 e N1 finais para todas as populações aleatórias – Área 1

Figura 106 – Valores de C1 e N1 finais para todas as populações aleatórias – Área 2

Figura 107 – Valores de C1 e N1 finais para todas as populações aleatórias – Área 3

As Figuras 108 a 112 possibilita a comparação entre os valores de pressões medidas e simuladas pela rotina do módulo 1. Da mesma forma que na análise anterior, os resultados são da primeira população aleatória e de forma geral os valores simulados para todas as iterações se aproximam muito dos valores medidos. Também são poucas as oscilações observadas ao longo das iterações. Os resultados para as outras populações aleatórias estão no Apêndice 4.

Figura 108 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 1

Figura 109 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 2

Figura 110 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 3

Figura 111 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 4

Figura 112 – Pressões medidas e simuladas para iterações do método – conjunto 5

As Figuras 113 a 117 mostram a análise das pressões relativas às simulações realizadas com a rotina do módulo 1 para todas as populações aleatórias avaliadas. Para a análise todos os conjuntos de pontos foram utilizados. Em todos os conjuntos, as diferenças entre os valores calculados e medidos na maioria dos pontos de pressão são baixas de acordo com normas internacionais. Em alguns pontos as diferenças entre valores calculados e observados são relativamente mais elevadas, tendendo a exceder o valor máximo determinado pelas normas de 2 mH₂O; estes pontos são 65, 83, 97, 108, 123 e 135.

Figura 113 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 1

Figura 114 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 2

Figura 115 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 3

Figura 116 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 4

Figura 117 - Pressões medidas e simuladas – conjunto 5

Na Figura 118, para a população aleatória 1 é realizada a comparação dos valores calculados e observados de vazão ao longo das simulações. Percebem-se boas aproximações entre os valores simulados e medidos de vazão e uniformidade entre as iterações de valores simulados de acordo com as normas.

Figura 118 -Vazões medidas e simuladas - todos os conjuntos - população aleatória 1 – Módulo 1

Na Figura 119 são apresentados os valores de vazão ao final do processo iterativo de duas etapas para os dois pontos de monitoramento, localizados na entrada e no interior da rede para todos os conjuntos de dados. Constata-se que na entrada os valores observados em negrito são praticamente iguais aos simulados, sendo que uma diferença um pouco maior é observada no ponto situado no interior da rede.

Figura 119-Vazões medidas e simuladas – todos os conjuntos – população aleatória 1

Nas Figuras 120 a 122, são comparados os valores obtidos através da rotina utilizada no módulo 2 de simulação para as pressões medidas e simuladas para as 3 condições de demanda e para todas as iterações realizadas.

Somente são apresentados os resultados relativos à primeira população aleatória de soluções. Os resultados referentes as demais populações aleatórias são apresentadas no Apêndice 5, observou-se que para todas as populações o resultado obtido tem valores que se aproximam uns dos outros.

Nota-se que, de forma geral, os valores de pressão simulados estão muito próximos dos medidos para as diferentes condições de demanda e ao longo das iterações a variação também é muito pequena.

Figura 120 - Pressões medidas e simuladas para iterações do método – pressão – máxima -população aleatória 1 – módulo 2

Figura 121 - Pressões medidas e simuladas para iterações do método – pressão – média -população aleatória 1 – módulo 2

Figura 122 - Pressões medidas e simuladas para iterações do método – pressão mínima -população aleatória 1 – módulo 2

De acordo com os ensaios de vazamentos noturnos realizados e já descritos no item 5.4.4, para a determinação da curva Pressão x Vazamento, manobras de fechamentos sucessivos da válvula localizada na entrada do setor, produzem patamares de pressão. Nas Figuras 123 a 125 são apresentadas as pressões obtidas para os três patamares e para todas as populações aleatórias distintas em relação à pressão medida. Constatase que em geral os valores de pressão observados (negrito) são muito próximos dos valores simulados principalmente para o patamar 1. Percebe-se que os maiores erros são observados para o patamar 3 e para os nós 76 e 87.

Figura 123 - Pressões medidas e simuladas – patamar 1

8- RESULTADOS OBTIDOS DO ESTUDO DE DETERMINAÇÃO DA REDE DE AMOSTRAGEM ÓTIMA PARA CALIBRAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do estudo de determinação da rede de amostragem ótima, dos pontos de monitoramento de pressão.

Inicialmente são realizadas algumas tentativas preliminares de determinação do agrupamento de pontos de monitoramento; seja esta tentativa realizada através de correlações entre os nós da rede ou informações da rede em estudo (somente para redes reais); os estudos foram conduzidos para uma rede teórica e uma real. Em seguida são apresentados os resultados obtidos para estas mesmas duas redes da adaptação e implementação de um método apresentado no trabalho de De SCHAEZEN (2000) e finalmente são mostrados os resultados relativos a uma proposta original de aplicação de métodos de determinação da rede de amostragem ótima associados a considerações de entropia para otimização da determinação do caminhamento dos fluxos na rede; os testes foram realizados para uma rede da literatura apresentada.

8.1-) Estudos preliminares de determinação do agrupamento de pontos de monitoramento

8.1.1-) Rede hipotética

Preliminarmente determinou-se os coeficientes de correlação (utilizando-se o parâmetro de pressão) entre os nós para verificar a relação existente entre estes. Utilizou-se a equação 29 para o cálculo destas correlações, sendo necessário para a sua aplicação uma simulação hidráulica para diversos fatores de demanda conforme apresentado na Tabela 22.

$$r_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^{ncd} (\text{pressao}_i - \overline{\text{pressao}_i}) \cdot (\text{pressao}_j - \overline{\text{pressao}_j})}{\left(\sum_{n=1}^{ncd} (\text{pressao}_i - \overline{\text{pressao}_i})^2 \cdot \sum_{n=1}^{ncd} (\text{pressao}_j - \overline{\text{pressao}_j})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (29)$$

Onde: i e j são os nós da rede a serem correlacionados; $r_{i,j}$ é a correlação entre os nós i e j; ncd é o número de condições de demanda.

Os resultados de aplicação da equação 30 conduzem aos resultados na Tabela 23.

Nº do Nó	FATORES DE DEMANDA																				
	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55	1,60
	PRESSÃO (mH2O)																				
1	37,97	37,97	37,97	37,97	37,96	37,96	37,96	37,95	37,95	37,95	37,94	37,94	37,94	37,93	37,93	37,92	37,92	37,91	37,91	37,90	37,90
2	37,91	37,91	37,90	37,89	37,88	37,87	37,96	37,85	37,84	37,83	37,82	37,81	37,80	37,78	37,77	37,76	37,74	37,73	37,72	37,70	37,69
3	41,17	41,11	41,05	40,99	40,92	40,84	40,77	40,69	40,60	40,52	40,43	40,33	40,23	40,13	40,03	39,92	39,81	39,70	39,58	39,46	39,34
4	42,91	42,83	42,74	42,64	42,54	42,43	42,32	42,21	42,08	41,96	41,82	41,69	41,54	41,39	41,24	41,08	40,92	40,75	40,58	40,40	40,21
5	40,90	40,81	40,72	40,63	40,53	40,42	40,31	40,19	40,07	39,94	39,80	39,67	39,52	39,37	39,22	39,06	38,89	38,72	38,55	38,37	38,18
6	39,96	39,88	39,80	39,71	39,62	39,53	39,42	39,32	39,21	39,10	38,98	38,85	38,72	38,59	38,45	38,31	38,16	38,01	37,86	37,70	37,53
7	40,42	40,34	40,26	40,16	40,07	39,97	39,86	39,75	39,63	39,51	39,38	39,25	39,11	38,97	38,82	38,67	38,51	38,35	38,19	38,01	37,84
8	41,02	40,95	40,88	40,80	40,72	40,64	40,55	40,46	40,36	40,26	40,16	40,05	39,93	39,82	39,70	39,57	39,44	39,31	39,17	39,03	38,89
9	40,98	40,91	40,83	40,75	40,66	40,57	40,47	40,37	40,27	40,16	40,05	39,93	39,81	39,68	39,55	39,41	39,27	39,13	38,98	38,83	38,67
10	40,04	39,97	39,91	39,83	39,76	39,68	39,59	39,50	39,41	39,32	39,22	39,11	39,01	38,89	38,78	38,66	38,54	38,41	38,28	38,14	38,01
11	43,04	42,98	42,91	42,84	42,76	42,68	42,60	42,51	42,42	42,32	42,23	42,12	42,01	41,90	41,79	41,67	41,55	41,42	41,29	41,16	41,02
12	40,19	40,15	40,11	40,06	40,01	39,96	39,91	39,85	39,79	39,73	39,67	39,60	39,54	39,46	39,39	39,32	39,24	39,16	39,07	38,99	38,90
13	32,37	32,35	32,34	32,32	32,30	32,27	32,25	32,23	32,21	32,18	32,15	32,13	32,10	32,07	32,04	32,01	31,98	31,94	31,91	31,88	31,84
14	35,47	35,46	35,46	35,45	35,45	35,44	35,44	35,43	35,42	35,42	35,41	35,40	35,40	35,39	35,38	35,37	35,36	35,36	35,35	35,34	35,33
15	46,85	46,77	46,68	46,59	46,49	46,38	46,27	46,16	46,04	45,92	45,79	45,66	45,52	45,37	45,23	45,07	44,91	44,75	44,58	44,41	44,23
16	45,14	45,09	45,05	45,00	44,95	44,89	44,83	44,77	44,71	44,65	44,58	44,51	44,44	44,36	44,29	44,21	44,13	44,04	43,96	43,87	43,78
17	48,07	48,02	47,97	47,91	47,85	47,79	47,72	47,65	47,58	47,51	47,43	47,35	47,27	47,16	47,10	47,00	46,91	46,82	46,72	46,61	46,51
18	46,85	46,76	46,68	46,59	46,50	46,40	46,30	46,19	46,08	45,96	45,84	45,72	45,59	45,46	45,32	45,18	45,03	44,88	44,73	44,57	44,41
19	44,97	44,90	44,84	44,76	44,69	44,61	44,53	44,44	44,35	44,26	44,17	44,07	43,96	43,86	43,75	43,63	43,52	43,40	43,27	43,15	43,02
20	47,84	47,76	46,68	47,59	47,49	47,39	47,29	47,18	47,07	46,96	46,84	46,71	46,58	46,45	46,31	46,17	46,02	45,87	45,72	45,56	45,40
21	44,72	44,62	44,52	44,40	44,29	44,17	44,04	43,90	43,77	43,62	43,47	43,32	43,15	42,99	42,82	42,64	42,45	42,27	42,07	41,87	41,67
22	39,72	39,62	39,51	39,39	39,27	39,14	39,01	38,87	38,72	38,57	38,41	38,24	38,07	37,39	37,71	37,52	37,32	37,12	36,91	36,70	36,47
23	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00
24	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50
25	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50

Tabela 22 – Pressões nos nós da rede hipotética sob diferentes condições de demanda

NÓS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ($r_{i,j}$)																								
1	1,000	0,964	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,990	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,948	0,993	0,988	-0,524	-0,524	-0,524
2	0,964	1,000	0,962	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,962	0,960	0,965	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,927	0,961	0,958	-0,487	-0,487	-0,487
3	0,993	0,962	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,995	-0,545	-0,545	-0,545
4	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
5	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,543	-0,543	-0,543
6	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
7	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,544	-0,544	-0,544
8	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
9	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
10	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
11	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
12	0,993	0,962	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,958	1,000	0,995	-0,547	-0,547	-0,547
13	0,993	0,960	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,997	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,957	1,000	0,994	-0,548	-0,548	-0,548
14	0,990	0,965	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,997	1,000	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,953	0,998	0,992	-0,557	-0,557	-0,557
15	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,546	-0,546	-0,546
16	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,958	1,000	0,995	-0,550	-0,550	-0,550
17	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,958	1,000	0,995	-0,550	-0,550	-0,550
18	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,959	1,000	0,994	-0,550	-0,550	-0,550
19	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,958	1,000	0,994	-0,551	-0,551	-0,551
20	0,948	0,927	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,958	0,957	0,953	0,959	0,958	0,958	0,959	0,958	1,000	0,958	0,953	-0,410	-0,410	-0,410
21	0,993	0,961	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,958	1,000	0,994	-0,549	-0,549	-0,549
22	0,988	0,958	0,995	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,995	0,994	0,992	0,994	0,995	0,995	0,994	0,994	0,953	0,994	1,000	-0,547	-0,547	-0,547
23	-0,524	-0,487	-0,545	-0,546	-0,543	-0,546	-0,544	-0,546	-0,546	-0,546	-0,546	-0,547	-0,548	-0,557	-0,546	-0,550	-0,550	-0,550	-0,551	-0,410	-0,549	-0,547	1,000	1,000	1,000
24	-0,524	-0,487	-0,545	-0,546	-0,543	-0,546	-0,544	-0,546	-0,546	-0,546	-0,546	-0,547	-0,548	-0,557	-0,546	-0,550	-0,550	-0,550	-0,551	-0,410	-0,549	-0,547	1,000	1,000	1,000
25	-0,524	-0,487	-0,545	-0,546	-0,543	-0,546	-0,544	-0,546	-0,546	-0,546	-0,546	-0,547	-0,548	-0,557	-0,546	-0,550	-0,550	-0,550	-0,551	-0,410	-0,549	-0,547	1,000	1,000	1,000

Tabela 23 – Coeficientes de correlação para os nós da rede

Em uma análise simplista com os coeficientes de correlação, foram agrupados os nós com valores de correlações próximos identificando possíveis grupos, que podem definir características parecidas a cada um destes.

8.1.2-) Rede real “São Carlos 3”

Nesta rede real a principal base utilizada para o agrupamento dos pontos foi às informações cadastrais obtidas junto a Companhia distribuidora de água; entretanto um estudo complementar análogo ao apresentado no item 8.1.1 é apresentado no Anexo 8; onde se determina a correlação média de cada ponto em relação a todos os pontos da rede, definindo uma faixa.

Apesar destes estudos apresentados no Anexo 8 serem complementares, ao contrastar-se as informações cadastrais junto a Companhia distribuidora de água com as obtidas do estudo de correlações (Anexo 8), constatou-se alguma relação entre pontos cujos valores de correlações estejam contidos dentro de uma faixa.

Na Figura 127 mostra-se a posição dos pontos localizados na rede de acordo com as suas respectivas faixas. Constata-se que os pontos correspondentes à faixa 1 são aqueles que pertencem a uma rede executada há 5 anos (esta foi ligada à rede já existente no nó 95, saindo deste “virgem” e começando a distribuição a partir do nó 42). A faixa 5 corresponde em sua maioria a uma rede implantada há 3 anos, também ligada. A faixa 4 parece mostrar regiões próximas as tubulações de maiores diâmetros e nas extremidades das redes mais antigas. A faixa 3 mostra, de forma geral, pontos localizados no interior da rede. Os pontos da faixa restante parecem a primeira vista não terem similaridades, a não ser pelos valores de correlações próximos.

Figura 127 – Localização de pontos de acordo com suas faixas de correlações

8.2-) Aplicação de método de localização de pontos ótimos de monitoramento de parâmetros necessários à calibração em redes baseado no trabalho de De SCHAETZEN (2000)

Buscou-se implementar o terceiro método apresentado por De SCHAETZEN (2000) e descrito no item 2.4.1; que utiliza conceitos de matriz de sensibilidade e entropia; para tanto se desenvolveu pelo autor no trabalho uma rotina de simulação codificada em Fortran. A estrutura do algoritmo é parecida com a utilizada para o problema de calibração, em relação aos operadores genéticos. A diferença é no avaliador que ao invés de minimizar as diferenças entre pressões e vazões obtidas e simuladas, minimizou a função objetivo definida pela equação 8 do capítulo 2 deste trabalho. As variáveis de decisão são agora as localizações de nós, mantendo-se fixo os nós a serem otimizados, e garantindo que eles sejam diferentes entre si.

8.2.1-) Aplicação para rede teórica

Inicialmente foram realizadas simulações hidráulicas da rede, obtendo-se a carga hidráulica em cada nó utilizando as rugosidades conhecidas da rede. Então novas simulações hidráulicas são realizadas com a introdução de perturbação nas rugosidades dos trechos da rede uma a uma. Cada rugosidade relativa a trecho da rede sofre uma perturbação introduzida no seu valor. Adotou o mesmo valor do artigo, ou seja, um acréscimo de 1 no valor da rugosidade original. A cada alteração da rugosidade original (sendo as dos demais trechos mantidas com seus valores originais) é realizada uma simulação, determinando-se a carga hidráulica para cada nó da rede, conforme mostrado na Tabela 24. Os valores da Tabela 24 substituídos na equação 3 (item 2.4.1), fornecem então a “Matriz de sensibilidade” ou Jacobiana apresentada na Tabela 25.

	NÓ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	
NÓ	RUG	0,20	0,20	0,25	0,10	0,30	0,20	0,10	10,0	0,20	3,00	0,20	0,15	0,05	0,30	0,20	0,10	0,40	0,40	0,40	0,30	0,35	0,40	0,40	0,20	0,25	0,40	0,20	0,15	0,30	0,30	0,20	0,30	0,40	0,20	0,30	0,20	0,40	
1	37,98	37,94	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96	37,96		
2	37,87	37,86	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,84	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	37,87	
3	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,81	40,82	40,83	40,84	40,83	40,81	40,78	40,83	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,79	40,84	40,84	40,82	40,85	40,84	40,91	40,84	40,87	40,84	40,84	40,85	40,84	40,84
4	42,43	42,43	42,43	42,43	42,43	42,39	42,40	42,41	42,43	42,43	42,42	42,35	42,42	42,43	42,43	42,43	42,43	42,43	42,43	42,43	42,43	42,44	42,43	42,43	42,43	42,36	42,43	42,43	42,40	42,44	42,43	42,41	42,44	42,43	42,43	42,42	42,44	42,42	42,43
5	40,42	40,42	40,42	40,42	40,41	40,37	40,39	40,40	40,42	40,42	40,41	40,33	40,40	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,41	40,42	40,35	40,41	40,41	40,39	40,42	40,42	40,40	40,42	40,42	40,41	40,40	40,42	40,41	40,42	
6	39,53	39,52	39,53	39,53	39,52	39,48	39,49	39,50	39,52	39,52	39,52	39,43	39,51	39,52	39,52	39,53	39,52	39,52	39,52	39,52	39,52	39,53	39,52	39,53	39,45	39,52	39,52	39,49	39,53	39,53	39,52	39,53	39,52	39,53	39,52	39,53	39,53	39,53	39,52
7	39,97	39,96	39,97	39,97	39,96	39,92	39,93	39,94	39,96	39,96	39,96	39,96	39,88	39,95	39,96	39,96	39,97	39,96	39,96	39,96	39,96	39,97	39,96	39,97	39,89	39,96	39,96	39,96	39,93	39,97	39,96	39,96	39,95	39,96	39,96	39,95	39,97	39,97	39,96
8	40,64	40,64	40,64	40,64	40,63	40,59	40,61	40,62	40,64	40,64	40,63	40,54	40,62	40,64	40,63	40,64	40,64	40,64	40,63	40,64	40,64	40,64	40,63	40,64	40,64	40,63	40,64	40,56	40,63	40,64	40,64	40,65	40,64	40,63	40,64	40,64	40,64	40,64	
9	40,57	40,57	40,57	40,57	40,56	40,52	40,54	40,55	40,57	40,57	40,56	40,48	40,55	40,57	40,57	40,57	40,57	40,57	40,57	40,57	40,57	40,57	40,57	40,56	40,57	40,49	40,56	40,56	40,55	40,58	40,57	40,56	40,57	40,56	40,57	40,57	40,57	40,58	
10	39,68	39,68	39,68	39,68	39,67	39,62	39,65	39,66	39,67	39,67	39,67	39,59	39,66	39,67	39,67	39,68	39,68	39,68	39,67	39,68	39,68	39,68	39,68	39,68	39,68	39,68	39,61	39,69	39,68	39,68	39,69	39,68	39,67	39,68	39,68	39,68	39,68	39,68	
11	42,68	42,68	42,68	42,68	42,67	42,63	42,65	42,66	42,68	42,68	42,68	42,59	42,67	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,69	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	42,68	
12	39,96	39,96	39,96	39,96	39,95	39,93	39,93	39,94	39,96	39,96	39,96	39,95	39,85	39,95	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,97	39,97	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,97	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	39,96	
13	32,27	32,27	32,27	32,27	32,26	32,26	32,23	32,25	32,27	32,27	32,27	32,29	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,28	32,28	32,27	32,28	32,27	32,27	32,28	32,28	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	32,27	
14	35,44	35,44	35,44	35,44	35,42	35,44	35,43	35,45	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44	35,44		
15	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,36	46,36	46,37	46,37	46,38	46,38	46,32	46,28	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38	46,38		
16	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	44,88	44,88	44,88	44,87	44,89	44,89	44,89	44,85	44,94	44,90	44,90	44,89	44,89	44,89	44,90	44,89	44,89	44,87	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	44,87	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	44,89	
17	47,79	47,79	47,79	47,79	47,78	47,78	47,78	47,77	47,79	47,79	47,79	47,76	47,83	47,73	47,80	47,79	47,79	47,79	47,80	47,79	47,79	47,79	47,76	47,79	47,79	47,79	47,78	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	47,79	
18	46,40	46,40	46,40	46,40	46,39	46,38	46,38	46,39	46,38	46,40	46,40	46,36	46,41	46,35	46,33	46,40	46,37	46,38	46,43	46,39	46,40	46,37	46,40	46,40	46,38	46,40	46,40	46,40	46,36	46,40	46,40	46,40	46,40	46,40	46,40	46,40	46,40	46,40	
19	44,61	44,61	44,61	44,61	44,61	44,60	44,60	44,60	44,59	44,61	44,61	44,58	44,64	44,56	44,61	44,61	44,53	44,63	44,62	44,61	44,61	44,59	44,61	44,61	44,60	44,61	44,60	44,61	44,61	44,58	44,61	44,61	44,61	44,61	44,61	44,61	44,61		
20	47,39	47,39	47,39	47,39	47,39	47,38	47,38	47,38	47,39	47,39	47,39	47,35	47,40	47,35	47,33	47,39	47,36	47,37	47,42	47,39	47,39	47,37	47,39	47,39	47,36	47,39	47,39	47,39	47,39	47,35	47,40	47,39	47,39	47,39	47,39	47,39	47,39		
21	44,17	44,17	44,17	44,17	44,16	44,14	44,14	44,15	44,16	44,16	44,16	44,10	44,12	44,15	44,14	44,17	44,16	44,16	44,15	44,14	44,16	44,13	44,16	44,17	44,13	44,16	44,17	44,13	44,16	44,17	44,16	44,17	44,16	44,17	44,16	44,16	44,17		
22	39,14	39,14	39,14	39,14	39,14	39,10	39,11	39,12	39,14	39,14	39,14	39,06	39,11	39,14	39,13	39,14	39,14	39,14	39,13	39,13	39,13	39,12	39,14	39,14	39,09	39,14	39,14	39,14	39,01	39,14	39,14	39,14	39,14	39,14	39,14	39,12	39,14		
23	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00	16,00		
24	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50		
25	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50		

Tabela 24 – Determinação das cargas nos nós com e sem perturbação nas rugosidades (Cargas em mH2O e rugosidades em mm)

Definiu-se para a rede teórica oito pontos de coleta de dados, as simulações foram feitas para 5 populações aleatórias distintas, sendo que foram observados os resultados quanto à função de aptidão ilustrada pela Figura 128, notaram-se oscilações no início, mas convergência no final para o mesmo valor de aptidão.

Figura 128 – Desenvolvimento de aptidão ao longo das iterações para 5 populações aleatórias – Rede teórica

Para todas as populações aleatórias usadas os resultados obtidos para os pontos de monitoramento foram os mesmos nós: 2,3,5,11,15,18,19 e 22.

Considerou-se que os resultados foram obtidos desconsiderando como pontos de monitoramento as três fontes de abastecimento (reservatórios); representadas pelos nós 23, 24 e 25, pois estes nós representariam nós óbvios de monitoramento por terem as maiores sensibilidades além de existir uma unanimidade em muitas obras consultadas em que saídas de reservatório são bons pontos para aquisição dados para calibração, podendo até, se desejado, excluir estes pontos da análise. Quando em simulações estes foram considerados, estes sempre foram selecionados.

8.2.2-) Aplicação para rede real do setor “São Carlos 3”

Da mesma forma como foi feito no item 8.1.1 em relação à rede teórica, o método 3 foi aplicado à rede real de 146 nós e 193 trechos, da qual foram selecionados 35 pontos, este número foi estabelecido com base no número de medidores de pressão disponíveis para monitoramento.

As matrizes de sensibilidade ou Jacobiana e a planilha de simulação de pressões não são aqui apresentadas.

Com o objetivo de selecionar 35 pontos para compor a rede de amostragem ótima, foram realizadas simulações computacionais empregando cinco populações aleatórias distintas, mantendo-se o tamanho da população em 30 soluções e a análise feita para 1000 iterações de AGs. Os resultados em termos de evolução do valor da função de aptidão ao longo das iterações de AGs são apresentados na Figura 129, onde se observa que para todas as populações aleatórias a funções de aptidão apresentam comportamento muito parecido.

Figura 129 – Desenvolvimento de aptidão ao longo das iterações para cinco populações aleatórias – Rede real São Carlos 3

A análise de frequência dos pontos de monitoramento obtidos a partir de cinco populações aleatórias distintas indica que dos 35 pontos a serem determinados, 31 tem frequência acima de 60% e 18 apresentam resultados superiores a 80%.

No esquema mostrado na Figura 130 são destacados os 35 pontos de monitoramento selecionados. Constata-se que os pontos se localizam em sua maioria nas extremidades da rede e próximos a trechos com maiores diâmetros próximos a saída do reservatório de alimentação da rede, o que está em acordo com os embasamentos teóricos consultados relativos ao assunto.

Figura 130 – Locação de pontos selecionados através do método 3 –Setor de Maior Porte

8.3-) Aplicação de método de determinação de rede de amostragem ótima “Short path algorithms logic” modificado associado a considerações de entropia para otimização da determinação do caminhamento dos fluxos

8.3.1-) Introdução ao problema

Os “*Shortest Path Algorithms Logic*” apresentados no item 2.4.1 para determinação da rede de amostragem ótima, apresentam como característica a fragilidade do não conhecimento preciso da trajetória dos fluxos ao longo dos trechos da rede. Por outro lado, os conceitos relativos à entropia e descritos no capítulo 3 estão relacionados à determinação de uma medida de incerteza. Desta forma aqui se procurou utilizar os conceitos de entropia com o intuito de minimizar as incertezas das trajetórias dos fluxos nas redes em estudo.

8.3.2-) Apresentação do algoritmo proposto

Nas Figuras 131 a 134 são apresentados em forma de fluxograma, a maneira como foram implementados os algoritmos para cada etapa da determinação da entropia relativa ao sentido do caminhamento dos fluxos em todos os trechos da rede, baseados no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993). Estes algoritmos são respectivamente os algoritmos de numeração dos nós, de determinação de “pesos” associados aos nós da rede, vazão dos trechos e finalmente o algoritmo final para determinação do cenário de caminhamento de fluxos que produzirá a maior entropia.

O algoritmo para numeração de nós é apresentado na Figura 131, onde se observa que a fonte é o primeiro nó numerado de valor 1. A partir da fonte os nós vizinhos são numerados, sendo acrescentado a cada nó o valor 1. Repete-se o procedimento até que todos os nós tenham sido numerados.

Figura 131 – Algoritmo para numeração dos nós da rede baseado no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993) implementado

Onde N representa o número total de nós

Na Figura 132 é apresentado o algoritmo de determinação de pesos associados aos nós. Percorre-se todos os nós n da rede e verifica-se quais são fontes ou reservatórios atribuindo a estes peso 1. Aos nós que não forem fontes, verifica-se se os pesos de todos os nós $NC_{i,n}$ conectados ao nó n são conhecidos, cujos fluxos dos trechos, constituídos dos nós n e $NC_{i,n}$ forem de $NC_{i,n}$ para n . Caso positivo determina-se o peso do nó n constituído pelo somatório de todos os nós $NC_{i,n}$, que quando chegam no nó n são renomeados para $NE_{i,n}$. Tudo é feito até que os pesos sejam determinados em todos os nós.

Diferentes cenários de fluxos na rede são gerados aleatoriamente conforme mostrado na Figura 134. Em alguns destes cenários é impossível se determinar o peso não nulo em todos os nós, sendo então abandonados.

Figura 132 – Algoritmo para determinação dos pesos nos nós baseado no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993) implementado

Onde: $Peso_n$ é o peso atribuído a nó n ; $NC_{i,n}$ representa o nó i conectado ao nó n ; NT_n é o número total de nós conectado ao nó n ; $NE_{i,n}$ são os nós i conectados ao nó n que tem sentido de fluxo de $NE_{i,n}$ para n .

A Figura 133 apresenta o algoritmo de determinação de vazões na rede. Percorre-se todos os nós n da rede e verifica se todas as saídas dos nós $NS_{i,n}$. A soma de todas as vazões de saída é chamada de $Q_{soma\ n}$ e a vazão que liga o trecho $NS_{i,n}$ a n é determinada pelo produto do $Peso_{NS_{i,n}}$ por $Q_{soma\ n}$. O procedimento é repetido até que as vazões de todos os trechos sejam determinadas.

Figura 133 – Algoritmo determinação das vazões nos trechos da rede baseado no trabalho de TANYIMBOH & TEMPLEMAN (1993) implementado

Onde: $Peso_n$ é o peso atribuído a nó n ; $NC_{i,n}$ representa o nó i conectado ao nó n ; NT_n é o número total de nós conectado ao nó n ; $NS_{i,n}$ são os nós i conectados ao nó n que tem sentido de fluxo de n para $NS_{i,n}$; $Q_{soma\ n}$ é a soma das vazões que chegam no nó n ; $Q_{NS_{i,n},\ n}$ é a vazão do trecho conectado pelos nós $NS_{i,n}$ e n ; $P_{NS_{i,n}}$ é o peso do nó $NS_{i,n}$.

A rotina representada pelo fluxograma da Figura 134 constitui a rotina utilizada para determinação do melhor conjunto de sentidos de fluxos nos trechos da rede para a minimização das incertezas.

O início se dá com a geração aleatória de cenários da rede com diversos conjuntos de sentidos de fluxo para os trechos da rede. As sub-rotinas representadas pelos fluxogramas das Figuras 131 a 134 são chamadas e determina-se a entropia para cada cenário. A máxima entropia é determinada representando as menores incertezas quanto os possíveis sentidos de fluxos na rede.

Figura 134 – Algoritmo para determinação do cenário de sentidos de fluxos na rede com a minimização das incertezas

8.3.3-) Resultados obtidos

A-) Resultados na determinação do sentido dos fluxos

A rede da Figura 135 foi escolhida para aplicação do algoritmo proposto na Figura 134 por já ter resultados quanto à aplicação dos “*Shortest Path Algorithms Logic*”; pois a calibração realizada com estes pontos de monitoramento foi comparada com a realizada com os locais monitorados obtidos.

O algoritmo foi aplicado na determinação dos sentidos de fluxo nos trechos. Com os sentidos de fluxos supostamente conhecidos, o “*Shortest Path Algorithms Logic*” foi aplicado (Figura 136).

Figura 135– Rede de distribuição utilizada (De SCHAETZEN (2000))

Percebe-se na Figura 136 que a numeração dos nós é feita diferentemente da realizada na rede da Figura 135, pois para aplicação do método é necessário que a fonte de alimentação seja o primeiro nó.

Figura 136 – Rede de distribuição utilizada com o sentido dos fluxos determinados pela rotina do algoritmo da Figura 134

A Tabela 26 mostra a classificação dos pontos a serem monitorados utilizando os “*Shortest Path Algorithms Logic*” com e sem determinação do sentido dos fluxos nos trechos da rede (entropia)

Classificação dos pontos com a determinação dos fluxos nos trechos da rede (entropia) utilizando os <i>Shortest Path Algorithms Logic</i> (Nós de monitoramento de pressão)	Classificação dos pontos sem a determinação dos fluxos nos trechos da rede utilizando os <i>Shortest Path Algorithms Logic</i> (Nós de monitoramento de pressão)
13	13
11	4
12	6
4	10
7	3
8	9
6	2
5	12 ou 8 (empate)
2	7 ou 5 (empate)
9	11
3	
10	

Tabela 26 – Classificação de pontos de monitoramento com e sem a determinação do sentido dos fluxos

B-) Resultados de calibração

A Figura 137 mostra os valores da função de aptidão obtida para os diversos pontos de monitoramento considerados para as duas aplicações dos algoritmos “*Shortest Path Algorithms Logic*”. Observa-se que a vantagem do uso de entropia torna-se mais evidente com a consideração de 8 pontos de monitoramento.

Figura 137 – Função de aptidão com e sem o uso de entropia variando o número de pontos de monitoramento

Considerando os oito primeiros pontos classificados na Tabela 26 realizou-se a calibração utilizando o modelo desenvolvido e apresentado na Figura 38 (capítulo 5), com a finalidade de avaliar a qualidade dos pontos de monitoramento. Para auxílio no teste na consistência 10 populações aleatórias iniciais distintas foram testadas.

A Figura 138 indica as funções de aptidão com e sem o uso de entropia. Observa-se que com exceção da primeira população aleatória simulada, para todas as outras com o uso de entropia conduziu a melhores resultados.

Figura 138 – Comparação da função de aptidão com e sem o uso de entropia

As simulações aqui foram realizadas para 3 condições de demanda: máxima, média e mínima. Para ilustração são apresentadas as Tabelas de comparação de valores calculados e medidos médios para as populações aleatórias. Nas Tabelas 27 a 29 são apresentados os valores com o uso de entropia e nas Tabelas 30 a 32 sem o uso.

Observa-se que as diferenças de valores de pressões e vazões medidos e calculados praticamente não existem e a variância entre os valores obtidos para as diferentes populações aleatórias utilizadas serem muito baixas.

PONTO DE MONITORAMENTO	PRESSÃO MEDIDA (MH2O)	PRESSÃO CALCULADA (MH2O) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
13	72,01	72,12	72,08	72,05	72,05	72,09	72,07	72,05	72,04	72,09	72,11	
11	73,18	73,15	73,24	73,19	73,24	73,20	73,24	73,18	73,18	73,22	73,17	
12	75,02	74,91	74,92	74,96	75,01	74,90	74,92	75,01	74,99	74,91	74,83	
4	82,25	82,21	82,20	82,16	82,14	82,27	82,26	82,33	82,14	82,25	82,27	
7	86,31	86,32	86,31	86,32	86,21	86,38	86,34	86,18	86,36	86,25	86,41	
8	86,22	86,19	86,17	86,19	86,14	86,20	86,23	86,13	86,19	86,17	86,22	
6	86,96	86,98	86,96	86,97	86,97	86,91	86,96	86,85	86,97	86,99	86,97	
5	88,88	88,79	88,85	88,84	88,90	88,93	88,89	88,88	88,88	88,93	88,84	

PONTO DE MONITORAMENTO ENTRADA DA REDE	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	480,00	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	

Tabela 27 – Valores dos parâmetros pressões e vazões calculadas e medidas – com uso de entropia – condição de demanda máxima

PONTO DE MONITORAMENTO	PRESSÃO MEDIDA (MH2O)	PRESSÃO CALCULADA (MH2O) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
13	89,00	89,05	89,04	89,02	89,02	89,04	89,03	89,02	89,02	89,03	89,05
11	89,46	89,45	89,48	89,47	89,48	89,47	89,49	89,46	89,46	89,48	89,46
12	90,18	90,14	90,15	90,16	90,18	90,14	90,15	90,18	90,17	90,14	90,11
4	93,02	93,00	93,00	92,99	92,97	93,02	93,02	93,05	92,98	93,02	93,03
7	94,62	94,62	94,62	94,63	94,58	94,64	94,63	94,57	94,64	94,59	94,65
8	94,58	94,57	94,56	94,57	94,55	94,57	94,58	94,55	94,57	94,56	94,58
6	94,87	94,88	94,88	94,88	94,88	94,85	94,88	94,83	94,88	94,88	94,87
5	95,63	95,59	95,62	95,61	95,64	95,65	95,64	95,63	95,63	95,65	95,61

PONTO DE MONITORAMENTO ENTRADA DA REDE	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
	300,00	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99

Tabela 28 – Valores dos parâmetros pressões e vazões calculadas e medidas – com uso de entropia – condição de demanda média

PONTO DE MONITORAMENTO	PRESSÃO MEDIDA (MH2O)	PRESSÃO CALCULADA (MH2O) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
13	94,58	94,60	94,60	94,59	94,58	94,60	94,59	94,58	94,59	94,59	94,60
11	94,80	94,80	94,82	94,80	94,81	94,82	94,80	94,80	94,80	94,81	94,80
12	95,16	95,14	95,14	95,15	95,15	95,14	95,14	95,15	95,15	95,14	95,12
4	96,56	96,55	96,55	96,54	96,53	96,56	96,56	96,57	96,54	96,56	96,56
7	97,35	97,34	97,34	97,34	97,32	97,35	97,35	97,32	97,35	97,33	97,36
8	97,33	97,32	97,31	97,32	97,31	97,32	97,33	97,31	97,32	97,31	97,33
6	97,47	97,47	97,47	97,47	97,47	97,46	97,47	97,45	97,47	97,47	97,47
5	97,85	97,82	97,84	97,83	97,85	97,86	97,85	97,84	97,84	97,86	97,84

PONTO DE MONITORAMENTO ENTRADA DA REDE	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
	210,00	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99

Tabela 29 – Valores dos parâmetros pressões e vazões calculadas e medidas – com uso de entropia – condição de demanda mínima

PONTO DE MONITORAMENTO	PRESSÃO MEDIDA (MH2O)	PRESSÃO CALCULADA (MH2O) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
13	72,01	72,07	72,05	72,07	72,09	72,12	72,07	72,10	72,04	72,08	72,12
4	82,25	82,32	82,20	82,15	82,18	82,26	82,26	82,14	82,25	82,20	82,21
6	86,96	87,00	87,06	87,03	86,89	86,95	86,96	86,96	86,94	86,97	86,94
10	71,33	71,29	71,36	71,32	71,38	71,30	71,29	71,37	71,33	71,32	71,39
3	86,39	86,36	86,37	86,44	86,39	86,55	86,42	86,34	86,44	86,38	86,42
9	74,73	74,70	74,75	74,74	74,77	74,81	74,45	74,81	74,76	74,80	74,74
2	90,59	90,53	90,52	90,66	90,45	90,42	90,46	90,39	90,77	90,59	90,61
12	75,02	74,91	74,87	74,97	74,96	74,81	74,95	74,93	74,93	74,87	74,81

PONTO DE MONITORAMENTO ENTRADA DA REDE	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
	480,00	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99	479,99

Tabela 30 – Valores dos parâmetros pressões e vazões calculadas e medidas – sem entropia – condição de demanda máxima

PONTO DE MONITORAMENTO	PRESSÃO MEDIDA (MH2O)	PRESSÃO CALCULADA (MH2O) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
13	89,00	89,03	89,03	89,03	89,04	89,05	89,03	89,04	89,01	89,04	89,05
4	93,02	93,04	93,00	92,98	93,00	93,02	93,02	92,98	93,02	93,00	93,00
6	94,87	94,89	94,91	94,90	94,85	94,87	94,87	94,88	94,87	94,88	94,86
10	88,73	88,72	88,75	88,73	88,75	88,73	88,72	88,75	88,74	88,74	88,76
3	94,65	94,64	94,64	94,67	94,65	94,71	94,66	94,63	94,67	94,65	94,66
9	90,07	90,06	90,08	90,07	90,09	90,10	90,08	90,11	90,08	90,10	90,07
2	96,30	96,28	96,27	96,33	96,25	96,24	96,25	96,23	96,37	96,30	96,31
12	90,18	90,15	90,12	90,16	90,16	90,11	90,16	90,15	90,15	90,13	90,10

PONTO DE MONITORAMENTO	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
ENTRADA DA REDE	300,00	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99	299,99

Tabela 31 – Valores dos parâmetros pressões e vazões calculados e medidos – sem entropia – condição de demanda média

PONTO DE MONITORAMENTO	PRESSÃO MEDIDA (MH2O)	PRESSÃO CALCULADA (MH2O) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
13	94,58	94,59	94,59	94,59	94,60	94,60	94,59	94,59	94,59	94,60	94,60
4	96,56	96,57	96,55	96,53	96,55	96,56	96,56	96,53	96,56	96,55	96,55
6	97,47	97,48	97,49	97,48	97,46	97,47	97,47	97,47	97,47	97,47	97,46
10	94,44	94,44	94,45	94,44	94,45	94,44	94,44	94,46	94,45	94,45	94,46
3	97,36	97,36	97,36	97,37	97,36	97,39	97,37	97,35	97,37	97,36	97,37
9	95,10	95,10	95,11	95,11	95,11	95,12	95,11	95,12	95,11	95,12	95,11
2	98,18	98,17	98,16	98,19	98,15	98,15	98,15	98,14	98,21	98,18	98,18
12	95,16	95,14	95,13	95,14	95,14	95,12	95,14	95,14	95,14	95,14	95,12

PONTO DE MONITORAMENTO	VAZÃO MEDIDA (L/s)	VAZÃO SIMULADA (L/s) PARA 10 POPULAÇÕES INICIAIS ALEATÓRIAS DISTINTAS									
ENTRADA DA REDE	210,00	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99	209,99

Tabela 32 – Valores dos parâmetros pressões e vazões calculados e medidos – sem entropia – condição de demanda mínima

A Figura 139 mostra os desvios entre rugosidades reais e calculadas com e sem o uso da entropia. Observa-se que para a maioria das populações aleatórias os desvios são maiores sem a introdução dos conceitos de entropia na aplicação dos “*Shortest Path Algorithms Logic*”, sendo que o erro total acumulado é mostrado na Figura 140.

Figura 139 – Desvio de valores da comparação de rugosidades reais e calculadas - com e sem o uso de entropia associada aos “*Shortest Path Algorithms Logic*”

Figura 140 – Desvio acumulado de valores da comparação de rugosidades reais e calculadas - com e sem o uso de entropia associada aos “*Shortest Path Algorithms Logic*”

9- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho trata de um estudo de calibração de redes de distribuição de água através de um modelo inverso, em cuja resolução utilizou-se como ferramenta de busca os algoritmos genéticos. Além dos modelos desenvolvidos para calibração, estudos de investigação de algoritmos genéticos mais apropriados e determinação da rede de amostragem ótima para o tratamento do problema foram realizados.

Para as análises de calibração realizadas foram utilizadas três redes, sendo uma hipotética, que serviu à etapa de investigação preliminar e duas redes reais de menor e maior porte sem simplificações cujos dados foram levantados em campo pelo autor. O modelo de calibração que inicialmente calibrava as rugosidades dos trechos em aplicações para a rede teórica, determinou além de rugosidades dos trechos as localizações de acessórios ou eventuais obstáculos que provoquem perda de carga localizada para a rede de menor porte. Para a rede de maior porte como fase final de evolução do modelo, este é proposto em duas etapas, sendo aqui ajustados além das rugosidades os parâmetros de vazamentos C1 e N1 conjuntamente.

As duas redes reais foram utilizadas na investigação de algoritmos genéticos mais eficientes e estudos da rede de amostragem ótima foram conduzidos sobre duas redes hipotéticas e alguns testes para a rede real de maior porte. Uma síntese das conclusões, recomendações e contribuições do trabalho são apresentadas na sequência.

9.1-) Conclusões

9.1.1-) Conclusões sobre investigação de algoritmos genéticos mais eficientes

O estudo de investigação de algoritmos genéticos mais eficientes serviu como base para se compor às características finais dos modelos de calibração utilizados. As principais investigações feitas foram: introdução do elitismo, testes com diversos tipos de seleção e recombinação, introdução de logaritmo nas variáveis de decisão, variação de forma de escolha dos genes a serem trocados entre as soluções, setorização, variação de taxas de operadores genéticos, introdução de escala linear, implementação de diferentes tipos de AGs, determinação de localização e rugosidade de trechos dotados de singularidades (peças) ou obstruções na rede entre outras, causadoras de perdas de carga localizada;

Com este estudo adquiriu-se certo conhecimento para se poder definir de maneira mais precisa as características a serem utilizadas pelos modelos principais de simulações.

9.1.2-) Conclusões sobre as aplicações do modelo de calibração

Com relação aos resultados obtidos do modelo de calibração pode-se dizer que os principais são:

A-) Rede teórica (Jowitt & Xu (1990))

- As simulações foram realizadas para 3 condições de demanda e os valores de pressão observados reproduzidos, sendo um erro máximo constatado de 0,60 mH₂O para a condição de demanda máxima e os maiores

erros sempre ocorrem no nó 20, atendendo a normas internacionais (Water Research Centre- WRc, 1989);

- O desvio máximo entre os valores calculados e medidos de vazão foi de 1,80%, para a condição de demanda máxima, também em acordo com normas internacionais;

- Os valores de pressões e vazões apresentaram pouca variação ao longo das simulações para as diversas populações aleatórias utilizadas;

- As variáveis de decisão para esta rede foram às rugosidades e para as diversas populações aleatórias seus valores apresentaram variações significativas, sendo que alterações no modelo foram realizadas para a posterior fase do estudo;

- A rede teórica demonstrou ser adequada para etapa preliminar do estudo, visto que, dentre outras vantagens, o custo computacional é menor e a quantidade de variáveis de decisão também é reduzido.

B-) Rede real de menor porte – Setor Monte Carlo

- Do mesmo modo que para a rede teórica (JOWITT & XU (1990)), a calibração foi aqui realizada para 3 condições de demanda. Os valores de pressões calculados estão em geral, bem próximos dos valores medidos de acordo com normas internacionais para as 10 populações aleatórias simuladas. Para o nó 51 foram constatadas as maiores diferenças entre valores calculados e medidos e a condição de demanda onde ocorrem as maiores diferenças em geral parece ser a média;

- O valores de vazões calculados para as 10 populações aleatórias são praticamente os mesmos para as três condições de demanda. As diferenças entre vazões calculadas e medidas praticamente não existe para as condições de demanda máxima e média e são um pouco maiores para a condição de demanda mínima;

- Nesta rede abordada neste item, realizou-se a setorização, ou seja, a determinado conjunto de trechos com características comuns uma única rugosidade é atribuída. Nota-se que para o setor 1 (material predominante pvc) as rugosidades obtidas ficaram entre 0,06mm e 0,08mm, pois somente duas das 10 populações simuladas apresentaram valores fora desta faixa. No setor 2 (ferro fundido) a variação de rugosidade praticamente fica entre 0,25mm e 0,70mm, uma variação maior que a obtida para o setor 1;

- O modelo proposto para este setor buscou através de rugosidades determinar localizações e identificar condições de funcionamento de possíveis válvulas existentes, tendo como guia informações obtidas no serviço de água local (SAAE), sejam estas informações obtidas por meio de pessoas, consultas a mapas e inspeções em campo. Para esta finalidade permitiu-se que determinado número de trechos assumisse valores de rugosidades maiores que as atribuídas aos setores 1 e 2. Nas simulações realizadas para 10 populações aleatórias constatou-se a repetição de diversos trechos, o mesmo ocorrendo para seus respectivos valores de rugosidades;

- Também foi verificado que grande parte dos trechos com probabilidade alta de possuir uma grande rugosidade ou peça, de acordo com as três fontes de informações buscadas no serviço de água local, foram determinados pelo modelo demonstrando consistência nos resultados.

C-) Rede real de maior porte – Setor São Carlos 3

- Para a rede do Setor São Carlos 3 foi proposto um modelo de calibração em duas etapas, sendo que na primeira etapa (módulo 1) são determinados os parâmetros da rede propriamente dita e na segunda (módulo 2) são calculados os parâmetros do modelo de vazamentos. As simulações foram realizadas no módulo 1 para apenas uma condição de demanda devido ao custo computacional, sendo a condição de demanda máxima escolhida após análise

de desempenho; para o módulo 2, testes noturnos na madrugada foram realizados para 3 patamares de valores de pressão;

- As diferenças entre os valores de pressão calculados e observados para o módulo 1 são relativamente maiores que as obtidas para as redes anteriores, entretanto em sua maioria respeitando normas internacionais. As maiores diferenças foram notadas para os nós 83, 108, 135. No nó 97 constatou-se um caso isolado em que o desvio se aproximou de 4 mH₂O, atribuindo-se possivelmente a uma informação de cota topográfica errônea obtida em cadastros utilizados.

- No módulo 2 as simulações foram realizadas para 3 patamares (definidos no capítulo de materiais e métodos), sendo que as vazões noturnas são atribuídas praticamente aos vazamentos, sendo que em geral as diferenças entre os valores de pressões calculados e observados são menores que para o módulo 1, pois o número de pontos a serem ajustados é bem menor;

- Com relação aos ajustes de vazões, para o módulo 1 foram monitorados dois pontos, na entrada e no interior da rede. Para o ponto da entrada do setor o valor calculado praticamente coincide com o valor medido. O ponto no interior do setor (interno) apresenta diferenças maiores entre valores simulados e medidos, possivelmente por tratar-se de valores menores de vazões, conferindo maiores imprecisões de leitura do equipamento. Para o módulo 2, pode-se considerar que os valores de vazões calculados e medidos praticamente coincidem para os 3 patamares delineados pelas manobras de fechamento gradativo da válvula de controle na entrada do setor;

- Da mesma forma que para a rede de menor porte, foi realizada uma setorização e localização de peças na rede. Observa-se que para o Setor 1 todas as populações aleatórias produziram praticamente o mesmo valor de rugosidades e para o Setor 2, os valores apresentaram uma variação de valores;

- A análise de frequência demonstra que dos 23 acessórios previstos no modelo, 15 foram localizados com frequência acima de 70%, dos quais 8

repetiram-se 100% ;

- Em geral, consideram-se os trechos com rugosidades de maiores valores determinados, apresentam valores bem definidos para todas as populações aleatórias iniciais distintas empregadas na simulação; o único que parece ter uma variação maior é o trecho 153.

Desta forma conclui-se que o modelo desenvolvido demonstra-se adequado para a calibração de redes de distribuição de água.

9.1.3-) Conclusões sobre os estudos de determinação da rede de amostragem ótima para calibração de redes de distribuição de água

A-) Estudos de determinação de agrupamento de pontos de monitoramento

Inicialmente realizou-se um estudo de correlações entre os nós, definindo-se supostos grupos de nós de características próximas. As aplicações são feitas para a rede teórica (JOWITT & XU (1990)) e para a rede real de maior porte São Carlos 3.

Nesta rede real a principal base utilizada para o agrupamento dos pontos foi às informações cadastrais obtidas junto a Companhia distribuidora de água; entretanto um estudo complementar análogo ao apresentado no item 8.1.1 é apresentado no Anexo 8; onde se determina a correlação média de cada ponto em relação a todos os pontos da rede, definindo uma faixa.

Apesar destes estudos apresentados no Anexo 8 serem complementares, ao contrastar-se as informações cadastrais junto a Companhia distribuidora de água com as obtidas do estudo de correlações (Anexo 8), constatou-se alguma relação entre pontos cujos valores de correlações estejam contidos dentro de uma faixa.

B-) Implementação de método proposto no trabalho de De SCHAETZEN (2000)

O terceiro método proposto por De SCHAETZEN (2000) foi implementado para as redes de JOWITT & XU (1990) e para a rede real de maior porte.

Para a rede de JOWITT & XU (1990) foram definidos oito pontos de monitoramento e as simulações foram realizadas para 5 populações aleatórias distintas. Para todas as simulações os pontos obtidos foram os mesmos.

Na rede de maior porte definiu-se 35 pontos a serem determinados; as simulações foram realizadas para 5 populações aleatórias de soluções iniciais distintas. A análise de frequência dos pontos de monitoramento obtidos indica que dos 35 pontos a serem determinados, 31 tem frequência acima de 60% e 18 repetem-se em 80% das simulações.

Quando os pontos foram localizados no mapa esquemático da rede, observou-se coerência dos resultados, pois se constata que os pontos se localizam em sua maioria nas extremidades da rede e próximos a trechos com maiores diâmetros (mais representativos) e próximos à saída do reservatório de alimentação da rede.

C-) Aplicação de metodologia de determinação de rede de amostragem ótima utilizando critérios de entropia para determinação do caminhamento dos fluxos

Basicamente com os resultados de determinação da rede de amostragem ótima obtidos por De SCHAETZEN (2000) para um dos métodos utilizados de “*Short Path Algorithms Logics*” realizou a calibração da rede com a utilização dos modelos desenvolvidos. Lembra-se que aqui não tem conhecimento do sentido do caminhamento dos fluxos nos trechos da rede.

Com os princípios da entropia e conseqüente determinação das supostas trajetórias de caminhamento dos fluxos, aplicaram-se novamente os “*Shorth Path Algorithms Logics*” determinando os novos pontos de monitoramento. Com estes novos pontos de monitoramento novamente se realizou a calibração.

Os resultados de calibrações foram comparados com e sem a determinação do caminhamento dos fluxos. As simulações foram realizadas aqui para 10 populações aleatórias distintas. O resultados mostraram que para todas as populações aleatórias a função de aptidão com o conceito de entropia apresenta melhores resultados, conseqüentemente menores diferenças entre os valores calculados e simulados de pressões e vazões.

Por ser esta rede teórica compararam-se os valores das rugosidades obtidas com e sem entropia com as rugosidades reais. Constatou-se que para a maioria absoluta das populações aleatórias os desvios com o uso de entropia são bem menores.

Análises realizadas mostraram ainda que a ampliação da rede de amostragem em termos do número de pontos de monitoramento, a influência da entropia é maior.

9.2-) Recomendações

A partir da experiência relatada acima se podem considerar as recomendações:

- Os AGs demonstram alta eficiência em varrer o espaço de busca, entretanto a sua principal desvantagem é o tempo computacional. Portanto, um modelo híbrido poderia ser proposto em que depois de se varrer totalmente o espaço de busca com os AGs um outro método de busca seria utilizado para se chegar mais agilmente próximo do ótimo, refinando a solução obtidas pelo AG;

- O procedimento realizado para determinação da rede de amostragem ótima com consideração do uso dos conceitos de entropia para determinação do caminhamento dos fluxos, deve ser utilizado para mais redes e de maiores porte, para se ter uma maior confiabilidade do procedimento adotado.
- A etapa de aquisição de informações necessárias para o uso do modelo de calibração, sejam elas informações cadastrais ou obtidas em campo devem ser realizadas de forma bastante cautelosa. Informações cadastrais junto à companhia devem ser verificadas de forma rigorosa e a aquisição de dados deve ser realizada sempre com equipamentos realizados.
- Todas as investigações de AGs foram programadas pelo autor com rotinas em linguagem Fortran. Atualmente existem pacotes contendo bibliotecas dos algoritmos genéticos, tais como a GAlib desenvolvida no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Estas apresentam a vantagem de possibilitar a investigação sistemática de operadores e tipos de AGs, possibilitando uma maior quantidade de investigações em um período curto; em contrapartida pode ser uma desvantagem por muitas vezes não se conseguir ter o total domínio do conteúdo destas e perder a sensibilidade e o total domínio do problema tratado.
- Para a avaliação da função de aptidão foi utilizada uma rotina hidráulica utilizada por REIS & PORTO (1997), esta rotina fornece resultados corretos, entretanto não é otimizada. O uso de um simulador hidráulico otimizado para este tipo de problema é recomendado pela quantidade de tempo requerida por este tipo de problema associado ao uso dos algoritmos genéticos.
- Modelos que consideram a demanda variável com a pressão vem ganhando popularidade na literatura e podem ser testados para o problema de calibração tratado.

9.3-) Contribuições originais e relevantes do trabalho

Considera-se que duas são as principais contribuições originais do trabalho: primeiro na se encontrou na literatura uma metodologia de calibração de redes de distribuição de água em que se procura determinar localizações e condições de operação de possíveis válvulas existentes no sistema tendo-se com guia informações reais obtidas junto à companhia responsável pela distribuição de água e trabalhar com dados noturnos de vazamentos.

A segunda trata-se de utilizar os conceitos de entropia para se ter uma melhor confiabilidade do caminhamento de fluxo em uma rede de distribuição de água para efeito de determinação da rede de amostragem ótima, buscando o aprimoramento dos “*Shortest Path Algorithms Logic*”, que não contam informações de direcionamento dos fluxos nos trechos da rede.

Uma contribuição relevante consiste no fato de que todos os dados necessários para o uso do modelo de calibração foram, sejam eles características físicas das redes em estudo ou parâmetros medidos em campo tais como pressões e vazões foram obtidos pelo autor junto a redes reais; sendo que na maioria dos trabalhos os dados utilizados são sintéticos. A aquisição própria de dados pode ser considerada positiva, pois se adquire mais sensibilidade ao analisar o problema.

Desta forma, todas as etapas de calibração foram efetivamente realizadas neste trabalho, desde a aquisição de dados até a construção, simulação e aprimoramento do modelo. Este fato pode ser considerado positivo, pois juntar estes dois ramos de atividades (aquisição de dados e simulação) não é prática comum em estudo de redes de distribuição de água no Brasil; uma vez que geralmente as técnicas de calibração são utilizadas academicamente.

As redes reais utilizadas no estudo foram tratadas de forma completa isto é, considerando-se todos os trechos sem simplificações. Isto pode ser

considerado um ganho, pois se tratando a rede de forma completa uma maior quantidade de informações são contempladas no modelo, desta forma, embutindo maior veracidade nos resultados finais.

Os portes das redes utilizadas no estudo podem ser considerados representativos, uma vez que a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura abordam redes de tamanho relativamente pequeno, o que pode limitar a análise e abrangência dos estudos.

As obras consultadas com o uso dos algoritmos genéticos para calibração demonstram-se em geral um estudo superficial relativo a AGs mais eficientes adequados ao problema; aqui um amplo estudo foi realizado definindo AGs mais adequados para o tratamento aqui realizado.

Finalmente no decorrer do trabalho, o autor participou da confecção de artigos científicos para apresentação em revistas e eventos os quais suas referências são apresentadas na sequência:

- Artigos aprovados para publicação ou já publicados em revistas

1-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., CHAUDHRY, F. H. (2002). Análise de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento aplicada a setor de rede real - uma aproximação que contempla vazamentos. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. Aceito para publicação (2003)

- Artigos submetidos para publicação em revistas

2-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R. (2002) Comparative Analysis of Different Schemes for Implementing Genetic Algorithms (GAs) in Calibration of Water Supply Distribution Systems. JOURNAL OF THE BRAZILIAN COMPUTER SOCIETY.

3-) REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., SANTOS, A., SILVA, F. G. B. (2002). Estudos de vazamentos para setores de rede da cidade de são carlos -SP. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. , 2002.

- Artigos apresentados em congressos internacionais

4-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R. (2002) Alternativas para implementação e aplicação de um modelo de calibração de rede de distribuição de água via algoritmos genéticos - estudo de caso para a cidade de São Carlos, SP, Brasil In: 10 SILUBESA - Símpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Braga – Portugal. Anais do evento.

5-) SILVA, F. G. B., REIS, J. A. T., CHEUNG, P. B., REIS, L. F. R., CHAUDRHY, F. H. (2002). Aplicação de algoritmos genéticos à calibração de um modelo do processo de lodos ativados In: 10 SILUBESA - Símpósio luso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 2002, Braga - Portugal. Anais do evento.

- Artigos apresentados em congressos nacionais

6-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., CHAUDRHY, F. H. (2002). Análise de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento aplicada a setor de rede real - uma aproximação que contempla vazamentos In: REDE COOPERATIVA DE PESQUISA EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. Vitória – E.S. Caderno de trabalhos técnicos.

7-) REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., SANTOS, A., SILVA, F. G. B. (2002). Estudos de vazamentos para setores de rede da cidade de São Carlos - SP In: REDE COOPERATIVA DE PESQUISA EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS - REUNIÃO FINAL, Vitória – E.S. Caderno de trabalhos técnicos.

8-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., SOARES, A. K. (2002). Calibração de rede de distribuição de água considerando as perdas por vazamentos explicitamente no modelo com o uso de algoritmos genéticos - aplicação para rede da Cidade de São Carlos - SP In: SEMINÁRIO: PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA - O ESTUDO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS, JOÃO PESSOA - PB. Anais eletrônicos do evento.

9-) 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: SEMINÁRIO: PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE

ÁGUA - O ESTADO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS JOÃO PESSOA - PB.
Anais do eletrônicos do evento.

10-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R. (2002). Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética In: VI SIMPÓSIO ITALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, vitória – E.S. Anais eletrônicos do evento.

11-) SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., PORTO, R. M., CHAUDRHY, F. H. (2001). Aplicação de método de determinação de rede de amostragem ótima para calibração de sistemas de distribuição de água para abastecimento através de Algoritmos Genéticos (AGs) In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2001, Aracajú. Anais do eletrônicos do evento.

12-) CALIMAN, R. O., SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDRHY, F. H. (2001). Determinação de parâmetros do modelo pressão-vazamento para um sub-setor da cidade de São Carlos-SP com utilização de Algoritmos Genéticos. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Aracajú. Anais do eletrônicos do evento.

13-) SANTOS, A., REIS, L. F. R., SILVA, F. G. B., GRATÃO, U., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F.H. (2000) Avaliação de parâmetros do modelo pressão-vazamento para sub-setor da cidade de São Carlos-SP. In: IX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sãnitária e Ambiental, Porto Seguro. Anais do eletrônicos do evento

14-) SILVA, F. G. B., GRATÃO, U., SANTOS, A., REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H. (1999) Controle operacional em sistemas de distribuição de água para abastecimento visando o controle de perdas: experiência em sub-setores da cidade de São Carlos - SP. In: V Simpósio do Curso de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC-USP, 1999, São Carlos. Anais do eletrônicos do evento

ANEXO 1 :

Alguns termos e abreviaturas relacionados aos algoritmos genéticos

AGs - algoritmos genéticos

CARACTER ou GENE - representa uma certa característica de determinada solução do problema

CROMOSSOMO - o mesmo que indivíduo

GERAÇÃO - número da iteração que o algoritmo genético executa

NPOP - tamanho da população de soluções

OPERAÇÕES GENÉTICAS – operações que o algoritmo genético realiza sobre cada um dos indivíduos

POPULAÇÃO - conjuntos de soluções do problema em dada iteração

STRING ou Indivíduo - determinada solução de um problema um simples membro da população

ANEXO 2:

Informações da rede hipotética do trabalho de
JOWITT & XU (1990)

- Valores de topografia e demanda dos nós

NÓ	NÍVEL DO TERRENO (m)	DEMANDA (l/s)
1	18,0	5
2	18,0	10
3	14,0	0
4	12,0	5
5	14,0	30
6	15,0	10
7	14,5	0
8	14,0	20
9	14,0	0
10	15,0	5
11	12,0	10
12	15,0	0
13	23,0	0
14	20,0	5
15	8,0	20
16	10,0	0
17	7,0	0
18	8,0	5
19	10,0	5
20	7,0	0
21	10,0	5
22	15,0	20

Nós de reservatórios - níveis

NÓ	NÍVEL MÁXIMO DO RESERVATÓRIO (m)	NÍVEL NORMAL DO RESERVATÓRIO (m)	NÍVEL MÍNIMO DO RESERVATÓRIO (m)
23	56,00	54,66	54,50
24	55,50	54,60	54,50
25	55,50	54,50	54,00

Valores de comprimentos, diâmetros e rugosidades

TRECHO	COMPRIMENTO (m)	DIÂMETRO (m)	COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS
23-1	606	0,457	110
23-24	454	0,457	110
24-14	2782	0,229	105
25-14	304	0,381	135
10-24	3383	0,305	100
13-24	1767	0,475	110
14-13	1014	0,381	135
16-25	1097	0,381	6
2-1	1930	0,457	110
3-2	5150	0,305	10
12-13	762	0,457	110
15-16	914	0,229	125
17-16	822	0,305	140
18-17	411	0,152	100
20-18	701	0,229	110
19-17	1072	0,229	135
20-19	864	0,152	90
21-20	711	0,152	90
21-15	832	0,152	90
22-15	2334	0,229	100
12-15	1996	0,229	95
11-12	777	0,229	90
10-11	542	0,229	90
8-12	1600	0,457	110
8-10	249	0,305	105
9-8	443	0,229	90
6-8	743	0,381	110
22-8	931	0,229	125
22-21	2689	0,152	100
4-3	326	0,152	100
5-4	844	0,229	110
6-3	1274	0,152	100
5-6	1115	0,229	90
7-6	615	0,381	110
5-22	1408	0,152	100
5-7	500	0,381	110
6-9	300	0,229	90

*Embora nesta última Tabela sejam informados os coeficientes de Hazen-Willians, de acordo com o trabalho original de referência, a fórmula universal foi adotada para o cálculo da perda de carga.

ANEXO 3:

Informações da rede hipotética do trabalho de De Schaetzen (2000)

NÓ	NÍVEL DO TERRENO (m)	DEMANDA (L/S)	NÓ PARTIDA	NÓ CHEGADA	COMPRIMENTO (m)	DIÂMETRO (mm)	COEFICIENTE DE HAZEN- WILLIAMS
1	0	0	FONTE	1	300	400	110
2	0	40	1	2	250	400	110
3	0	60	2	3	450	400	110
4	0	0	1	4	150	300	100
5	0	40	4	5	170	300	100
6	0	0	5	7	250	300	100
7	0	0	7	8	200	200	75
8	0	20	8	12	400	200	75
9	0	80	6	2	150	300	100
10	0	0	9	8	300	200	75
11	0	40	8	11	300	200	75
12	0	20	11	3	200	250	130
			10	11	140	250	130
			10	9	140	250	130
			6	7	160	300	100

OBS: Considerou-se o reservatório com carga fixada de 100m

ANEXO 4:

ESQUEMA DO SETOR DE REDE REAL MONTE CARLO

SETOR MONTE CARLO – CIDADE DE SÃO CARLOS, SP

MONITORAMENTO DE PRESSÃO

MONITORAMENTO DE VAZÃO

ANEXO 5:

INFORMAÇÕES DO SETOR DE REDE REAL MONTE CARLO

Nº	COTA DO TERRENO (m)	DEMANDA referência (L/s)	Nº ORIGEM	Nº DESTINO	COMPRIMENTO (m)	DIÂMETRO (mm)	RUGOSIDADE (mm)
1	843,00	0,027	1	2	30	50	0,06
2	841,20	0,079	2	3	65	50	0,06
3	836,50	0,092	2	7	106	50	0,06
4	831,90	0,074	2	8	106	50	0,06
5	855,60	0,027	3	9	92	50	0,06
6	854,50	0,048	3	24	292	50	0,06
7	853,10	0,048	3	57	30	50	0,06
8	853,70	0,122	4	11	96	50	0,06
9	850,10	0,122	4	12	150	50	0,06
10	847,00	0,095	4	57	44	50	0,06
11	845,40	0,177	5	6	30	50	0,06
12	828,00	0,082	6	7	22	50	0,06
13	855,80	0,021	6	13	68	50	0,06
14	845,30	0,153	7	23	198	50	0,06
15	826,10	0,098	8	9	56	50	0,06
16	854,50	0,039	8	23	198	50	0,06
17	845,90	0,164	9	24	200	50	0,06
18	829,50	0,179	10	11	34	50	0,06
19	856,40	0,083	11	12	122	50	0,06
20	853,80	0,066	11	14	74	50	0,06
21	853,80	0,042	13	16	64	50	0,06
22	854,00	0,025	13	19	166	50	0,06
23	851,30	0,116	14	15	156	50	0,06
24	848,20	0,146	14	17	68	50	0,06
25	846,20	0,141	16	21	70	50	0,06
26	836,00	0,247	16	22	20	50	0,06
27	829,70	0,095	17	18	214	50	0,06
28	856,00	0,000	17	25	60	50	0,06
29	854,70	0,016	18	27	244	50	0,06
30	849,60	0,059	19	20	90	50	0,06
31	842,20	0,062	19	21	90	100	0,06
32	842,20	0,077	19	28	122	100	0,06
33	835,60	0,206	19	54	110	50	0,06
34	830,10	0,104	21	22	54	50	0,06
35	825,70	0,037	21	23	60	50	0,06
36	840,10	0,088	21	55	84	50	0,50
37	836,20	0,095	23	24	66	50	0,06
38	837,30	0,131	24	25	70	50	0,06
39	831,00	0,202	25	26	222	50	0,06
40	824,50	0,123	25	31	82	50	0,06
41	823,00	0,065	26	27	225	50	0,06
42	823,30	0,029	27	35	90	50	0,06
43	830,60	0,084	28	29	28	150	0,06
44	828,00	0,114	28	56	22	150	0,06
45	820,00	0,179	29	32	325	75	0,50
46	821,20	0,208	29	36	172	50	0,06
47	824,20	0,208	30	36	68	50	0,06
48	821,60	0,216	31	33	228	50	0,06
49	825,40	0,297	31	38	78	50	0,06
50	824,10	0,138	31	55	195	50	0,50
51	816,20	0,138	32	38	88	75	0,06
52	815,00	0,050	33	34	144	50	0,06
53	818,70	0,118	33	39	70	50	0,06
54	855,90	0,066	34	35	142	50	0,06
55	849,60	0,104	34	41	56	50	0,06
56	855,50	-6,386	35	41	170	50	0,06

NÓ	COTA DO TERRENO	DEMANDA	NÓ	NÓ	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
	(m)	referência (L/s)	ORIGEM	DESTINO	(m)	(mm)	(mm)
57	833,30	0,040	36	37	102	50	0,06
58	828,30	0,522	36	42	126	50	0,06
			37	38	85	50	0,06
			37	43	125	50	0,06
			38	39	234	50	0,50
			38	43	80	50	0,50
			39	40	92	50	0,06
			39	44	90	50	0,06
			40	41	82	50	0,06
			40	51	260	50	0,06
			42	45	192	50	0,06
			42	46	116	50	0,06
			43	44	204	50	0,06
			43	47	70	50	0,06
			43	49	170	50	0,06
			44	50	80	50	0,06
			45	46	34	50	0,06
			45	52	190	50	0,06
			46	47	20	50	0,06
			47	48	108	50	0,06
			49	53	140	50	0,06
			49	58	85	50	0,06
			50	51	62	50	0,06
			50	58	50	50	0,06
			51	53	285	50	0,06
			54	55	138	50	0,50
			54	56	28	75	0,06

ANEXO 6:

ESQUEMA DO SETOR DE REDE REAL SÃO CARLOS 3

SETOR SÃO CARLOS III – CIDADE DE SÃO CARLOS, SP

ANEXO 7:

INFORMAÇÕES DO SETOR DE REDE REAL SÃO CARLOS 3

NÓ	COTA DO	DEMANDA	NÓ	NÓ	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
	TERRENO	referência	ORIGEM	DESTINO			
	(m)	(L/s)			(m)	(mm)	(mm)
1	836,50	0,008	1	32	225,70	0,054	0,06
2	837,80	0,025	2	15	112,80	0,054	0,06
3	842,20	0,040	2	32	223,50	0,054	0,06
4	846,50	0,022	3	16	95,50	0,054	0,06
5	846,40	0,019	3	33	227,80	0,054	0,06
6	848,60	0,048	4	34	225,80	0,054	0,06
7	857,30	0,048	5	35	225,60	0,054	0,06
8	850,70	0,041	6	17	90,70	0,054	0,06
9	851,10	0,043	6	36	227,30	0,054	0,06
10	850,90	0,039	7	18	87,20	0,054	0,06
11	850,20	0,035	7	37	223,10	0,054	0,06
12	848,80	0,026	8	19	78,50	0,054	0,06
13	845,40	0,009	8	38	223,30	0,054	0,06
14	858,90	0,024	9	20	72,90	0,054	0,06
15	844,20	0,008	9	39	224,50	0,054	0,06
16	846,70	0,018	10	21	79,40	0,054	0,06
17	852,10	0,019	10	40	223,30	0,054	0,06
18	857,70	0,029	11	22	64,30	0,054	0,06
19	853,60	0,019	11	41	224,50	0,054	0,06
20	853,70	0,022	12	23	70,80	0,054	0,06
21	853,80	0,021	12	43	227,90	0,054	0,06
22	852,80	0,019	13	44	227,20	0,054	0,06
23	851,30	0,017	14	24	287,50	0,054	0,06
24	852,50	0,031	15	32	106,70	0,054	0,06
25	854,90	0,007	16	33	130,80	0,054	0,06
26	858,80	0,031	17	36	135,30	0,054	0,06
27	852,30	0,015	18	37	138,50	0,054	0,06
28	854,60	0,007	19	38	147,60	0,054	0,06
29	858,70	0,015	20	39	148,10	0,054	0,06
30	852,30	0,043	21	40	145,90	0,054	0,06
31	859,00	0,043	22	41	155,70	0,054	0,06
32	850,40	0,025	23	43	159,50	0,054	0,06
33	853,00	0,040	24	25	49,20	0,054	0,06
34	855,00	0,022	24	26	130,90	0,054	0,06
35	856,10	0,019	24	27	57,40	0,076	0,06
36	857,40	0,048	25	26	79,30	0,054	0,06
37	858,30	0,048	27	28	42,80	0,054	0,06
38	858,90	0,041	27	29	119,70	0,054	0,06
39	859,20	0,043	27	30	51,70	0,076	0,06
40	859,00	0,039	28	29	74,50	0,054	0,06
41	858,40	0,035	30	31	117,90	0,054	0,06
42	857,60	0,017	30	44	114,20	0,076	0,06
43	856,80	0,026	32	33	62,00	0,076	0,06
44	854,40	0,009	33	34	58,30	0,076	0,06
45	851,40	0,044	34	35	50,80	0,076	0,06
46	859,20	0,084	35	36	55,80	0,098	0,06
47	859,70	0,076	36	37	60,80	0,098	0,06
48	858,30	0,083	37	38	63,30	0,098	0,06
49	859,10	0,055	38	39	61,20	0,142	0,06
50	858,60	0,037	39	40	62,50	0,142	0,06
51	862,70	0,047	40	41	62,60	0,142	0,06
52	863,40	0,084	41	42	29,60	0,142	0,06

NÓ	COTA DO	DEMANDA	NÓ	NÓ	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
	TERRENO	referência	ORIGEM	DESTINO			
	(m)	(L/s)			(m)	(mm)	(mm)
53	864,20	0,083	42	43	33,90	0,098	0,06
54	864,60	0,076	42	71	405,60	0,142	0,06
55	864,40	0,085	43	44	55,70	0,076	0,06
56	864,20	0,083	45	50	155,20	0,054	0,06
57	863,00	0,081	45	61	101,80	0,054	0,06
58	861,00	0,204	46	51	171,00	0,054	0,06
59	857,80	0,168	46	52	114,30	0,054	0,06
60	860,10	0,121	46	53	173,90	0,054	0,06
61	856,70	0,044	47	54	113,90	0,054	0,06
62	864,00	0,061	47	55	166,10	0,054	0,06
63	860,80	0,105	48	56	114,50	0,054	0,06
64	859,40	0,067	48	57	165,40	0,054	0,06
65	868,80	0,105	49	59	213,80	0,054	0,06
66	868,20	0,095	49	60	57,10	0,054	0,06
67	869,60	0,186	50	51	159,30	0,054	0,06
68	870,30	0,236	50	61	58,30	0,054	0,06
69	864,50	0,099	51	52	58,30	0,054	0,06
70	870,70	0,165	52	53	55,40	0,054	0,06
71	869,00	0,000	53	54	57,30	0,054	0,06
72	867,60	0,072	54	55	58,80	0,098	0,06
73	867,80	0,131	55	56	60,90	0,098	0,06
74	865,80	0,100	56	57	47,60	0,098	0,06
75	863,50	0,141	56	144	27,40	0,054	0,06
76	865,50	0,100	57	58	68,20	0,098	0,06
77	869,60	0,178	58	59	61,10	0,054	0,06
78	868,30	0,119	58	60	214,10	0,054	0,06
79	871,00	0,177	58	75	48,10	0,098	0,06
80	871,60	0,116	59	60	160,10	0,054	0,06
81	871,60	0,123	62	66	119,30	0,054	0,06
82	869,20	0,099	62	67	198,20	0,054	0,06
83	862,00	0,094	63	64	54,60	0,054	0,06
84	870,10	0,094	63	65	188,00	0,054	0,06
85	870,10	0,115	64	65	212,30	0,054	0,06
86	863,00	0,115	65	84	55,10	0,054	0,06
87	872,70	0,116	66	67	57,50	0,054	0,06
88	871,70	0,115	66	80	164,50	0,054	0,06
89	868,80	0,092	67	68	56,00	0,054	0,06
90	863,90	0,109	68	69	215,10	0,054	0,06
91	870,20	0,037	68	80	55,50	0,076	0,06
92	872,30	0,099	69	70	166,30	0,054	0,06
93	872,90	0,083	70	95	177,40	0,054	0,06
94	872,90	0,000	71	95	215,60	0,142	0,06
95	872,90	0,079	72	73	113,90	0,054	0,06
96	871,60	0,164	72	77	163,50	0,054	0,06
97	859,10	0,055	72	144	69,30	0,054	0,06
98	863,10	0,089	73	74	44,30	0,098	0,06
99	862,90	0,127	73	77	51,30	0,098	0,06
100	862,60	0,132	73	78	227,40	0,054	0,06
101	862,90	0,146	74	75	57,80	0,098	0,06
102	863,50	0,136	74	76	159,90	0,054	0,06
103	863,70	0,086	75	76	210,90	0,054	0,06
104	872,10	0,048	77	78	177,70	0,054	0,06

Nº	COTA DO TERRENO (m)	DEMANDA referência (L/s)	Nº ORIGEM	Nº DESTINO	COMPRIMENTO (m)	DIÂMETRO (mm)	RUGOSIDADE (mm)
105	872,40	0,060	77	79	70,40	0,098	0,06
106	872,70	0,066	79	81	54,90	0,098	0,06
107	871,40	0,155	79	82	212,30	0,054	0,06
108	870,70	0,104	80	87	53,70	0,076	0,06
109	865,80	0,104	81	82	159,60	0,054	0,06
110	864,40	0,139	81	88	54,40	0,098	0,06
111	865,20	0,149	83	84	177,30	0,054	0,06
112	868,30	0,106	83	86	54,30	0,054	0,06
113	867,70	0,054	84	85	56,70	0,054	0,06
114	869,10	0,089	84	87	169,50	0,054	0,06
115	869,60	0,161	85	86	163,30	0,054	0,06
116	870,10	0,072	85	90	203,80	0,054	0,06
117	870,80	0,085	86	90	54,40	0,054	0,06
118	870,90	0,179	87	141	57,90	0,098	0,06
119	869,40	0,123	88	89	158,50	0,054	0,06
120	864,40	0,123	88	96	41,80	0,098	0,06
121	863,50	0,083	89	96	218,00	0,054	0,06
122	860,60	0,141	91	92	146,00	0,147	0,03
123	862,70	0,134	91	103	273,60	0,147	0,03
124	862,40	0,095	91	114	78,00	0,054	0,06
125	863,50	0,132	92	93	48,00	0,147	0,03
126	864,30	0,146	92	115	177,30	0,054	0,06
127	866,90	0,130	93	104	84,40	0,076	0,06
128	867,00	0,033	93	141	45,90	0,147	0,03
129	867,10	0,026	94	95	15,20	0,142	0,06
130	868,90	0,059	94	141	32,70	0,147	0,03
131	869,30	0,072	94	142	15,30	0,178	0,06
132	862,70	0,009	95	96	137,00	0,142	0,06
133	862,70	0,009	96	107	60,60	0,076	0,06
134	864,80	0,009	97	98	270,00	0,054	0,06
135	864,00	0,016	97	122	179,00	0,054	0,06
136	864,30	0,000	98	99	54,00	0,076	0,06
137	863,00	0,011	98	123	45,00	0,076	0,06
138	863,50	0,016	99	100	53,40	0,076	0,06
139	860,50	0,005	99	124	282,50	0,054	0,06
140	854,50	0,001	100	101	52,20	0,098	0,03
141	873,00	0,091	100	125	188,00	0,054	0,06
142	873,00	-10,640	101	102	52,10	0,098	0,03
143	865,00	0,075	101	126	206,50	0,054	0,06
144	865,00	0,128	102	103	53,60	0,098	0,03
145	866,20	0,109	102	143	189,10	0,054	0,06
146	869,80	0,073	103	110	49,30	0,076	0,06
147			104	105	64,90	0,076	0,06
148			104	116	97,50	0,076	0,06
149			105	117	95,20	0,076	0,06
150			105	141	81,40	0,098	0,06
151			106	118	125,60	0,054	0,06
152			107	108	53,60	0,054	0,06
153			107	109	217,90	0,054	0,06
154			108	109	160,80	0,054	0,06
155			108	119	54,00	0,054	0,06
156			110	111	49,70	0,054	0,06

NÓ	COTA DO	DEMANDA	NÓ	NÓ	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
	TERRENO	referência	ORIGEM	DESTINO			
	(m)	(L/s)			(m)	(mm)	(mm)
157			110	145	84,50	0,054	0,06
158			111	112	128,30	0,054	0,06
159			111	113	147,80	0,054	0,06
160			112	113	97,90	0,054	0,06
161			112	145	90,40	0,054	0,06
162			114	115	44,60	0,054	0,06
163			114	127	256,50	0,054	0,06
164			115	116	46,50	0,054	0,06
165			115	127	191,20	0,054	0,06
166			116	127	231,40	0,054	0,06
167			117	118	46,90	0,054	0,06
168			117	131	63,10	0,076	0,06
169			118	146	42,00	0,054	0,06
170			119	120	161,90	0,054	0,06
171			119	121	211,90	0,054	0,06
172			120	121	50,30	0,054	0,06
173			122	123	136,90	0,054	0,06
174			122	124	189,10	0,054	0,06
175			123	124	54,00	0,054	0,06
176			125	126	55,40	0,054	0,06
177			125	132	29,70	0,076	0,06
178			126	143	91,40	0,054	0,06
179			128	129	31,00	0,054	0,06
180			128	130	112,90	0,054	0,06
181			129	130	96,80	0,054	0,06
182			130	131	46,80	0,054	0,06
183			131	146	219,00	0,054	0,06
184			132	133	18,60	0,054	0,06
185			132	134	29,00	0,076	0,06
186			134	135	87,90	0,076	0,06
187			134	138	244,40	0,054	0,06
188			135	136	33,50	0,054	0,06
189			135	137	51,60	0,054	0,06
190			135	138	154,10	0,054	0,06
191			137	138	234,00	0,054	0,06
192			137	139	304,40	0,054	0,06
193			139	140	165,20	0,054	0,06

ANEXO 8:
CORRELAÇÕES MÉDIAS DOS
NÓS- SÃO CARLOS 3

I-) Estudos preliminares de determinação de correlação de nós- Rede real “São Carlos 3”

Da mesma forma que para a rede anterior, foi feita uma simulação hidráulica para diversos fatores de demanda (em função dos horários de consumo), com o intuito de com a determinação de coeficientes de correlação estabelecer a relação entre os nós, sendo aplicada a equação 30. Chegamos então a resultados, conforme a Tabela I que mostra a correlação média de cada nó com os demais.

As diferenças de preenchimento de cores indicam as faixas de valores das correlações conforme indicado na legenda. Considera-se que cada faixa corresponde a um agrupamento de determinadas características.

NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA
1	0,99112	15	0,99103	29	0,99120	43	0,99129	57	0,99205
2	0,99119	16	0,99102	30	0,96427	44	0,99122	58	0,99204
3	0,99099	17	0,99122	31	0,99122	45	0,99218	59	0,99206
4	0,99108	18	0,99091	32	0,99105	46	0,99216	60	0,99207
5	0,99116	19	0,99120	33	0,99115	47	0,99207	61	0,99218
6	0,99119	20	0,99123	34	0,99112	48	0,99206	62	0,99171
7	0,99114	21	0,99120	35	0,99110	49	0,99206	63	0,99184
8	0,99117	22	0,99119	36	0,99124	50	0,99217	64	0,99183
9	0,99126	23	0,99121	37	0,99119	51	0,99217	65	0,99182
10	0,99115	24	0,99114	38	0,99133	52	0,99215	66	0,99171
11	0,99119	25	0,99117	39	0,99123	53	0,99215	67	0,99171
12	0,99135	26	0,99117	40	0,99111	54	0,99207	68	0,99175
13	0,99118	27	0,99120	41	0,99135	55	0,99207	69	0,99177
14	0,99116	28	0,99120	42	0,99131	56	0,99207	70	0,99190

NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA	NÓ	CORREL. MÉDIA
71	0,99191	88	0,99209	105	0,99200	122	0,99213	139	0,99217
72	0,99205	89	0,99201	106	0,99155	123	0,99209	140	0,99214

73	0,99205	90	0,99183	107	0,99201	124	0,99213	141	0,98503
74	0,99204	91	0,99211	108	0,99186	125	0,99215	142	0,01387
75	0,99205	92	0,99192	109	0,99194	126	0,99215	143	0,99212
76	0,99204	93	0,99196	110	0,99201	127	0,99198	144	0,99206
77	0,99203	94	0,99198	111	0,99206	128	0,99184	145	0,99202
78	0,99204	95	0,99210	112	0,99202	129	0,99184	146	0,99170
79	0,99203	96	0,99203	113	0,99202	130	0,99179		
80	0,99181	97	0,99213	114	0,99206	131	0,99182		
81	0,99203	98	0,99209	115	0,99194	132	0,99215		
82	0,99202	99	0,99211	116	0,99200	133	0,99215		
83	0,99154	100	0,99211	117	0,99187	134	0,99216		
84	0,99190	101	0,99206	118	0,99169	135	0,99216		
85	0,99183	102	0,99206	119	0,99177	136	0,99216		
86	0,99185	103	0,99204	120	0,99166	137	0,99216		
87	0,99197	104	0,99186	121	0,97755	138	0,99215		

0 – 0,9850		FAIXA 1
0,9851 – 0,99149		FAIXA 2
0,9915 – 0,99179		FAIXA 3
0,9918 – 0,992149		FAIXA 4
ACIMA DE 0,99215		FAIXA 5

Tabela I - Correlações médias entre os nós da rede de maior porte – Sub-Sector
São Carlos 3

ANEXO 9:

INFORMAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS MEDIDOS EM CAMPO DA REDE MONTE CARLO

OBS: Em função de um estudo local de variação de demandas ao longo de dias da semana, foram definidos os seguintes horários para coleta de dados: condição de demanda mínima 5:00 hrs, demanda média 9:00 hrs e demanda máxima 14:00 hrs.

Pressão (mH ₂ O)							Vazão (L/s)	Condição de demanda
Nó							Entrada do setor	
57	7	19	26	38	51	56		
23,10	7,50	11,00	11,20	16,90	27,00	15,10	17,83	MÁXIMA
33,80	16,20	17,10	25,70	27,60	42,20	20,90	13,06	MÉDIA
45,60	26,20	24,60	40,80	40,40	58,60	26,50	6,79	MÍNIMA

ANEXO 10:

INFORMAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS MEDIDOS EM CAMPO DA REDE REAL SÃO CARLOS 3

OBS: Em função de um estudo local de variação de demandas ao longo de dias da semana, foram definidos os seguintes horários para coleta de dados: condição de demanda mínima 5:00 hrs, demanda média 8:00 hrs e demanda máxima 11:30 hrs.

CONJUNTO DE MONITORAMENTO 1 – dia 06/12/2000

PRESSÃO (mH2O)								VAZÃO (L /s)		CONDIÇÃO DE DEMANDA
NÓ								PONTO		
16	20	48	65	76	87	124	142	entrada	interno	
38,00	32,60	22,70	16,80	16,50	14,20	23,00	15,60	33,94	4,00	MÁXIMA
36,40	32,60	25,20	16,50	18,80	13,70	22,90	14,80	21,48	2,43	MÉDIA
38,90	33,60	27,70	17,20	21,00	14,80	25,00	15,90	9,81	0,90	MÍNIMA

CONJUNTO DE MONITORAMENTO 2 – dia 08/12/2000

PRESSÃO (mH2O)								VAZÃO (L /s)		CONDIÇÃO DE DEMANDA
NÓ								PONTO		
6	11	34	67	82	109	126	142	entrada	interno	
34,10	34,00	31,80	15,60	13,50	16,60	19,60	14,30	36,03	4,12	MÁXIMA
37,10	36,00	33,80	17,90	16,10	18,90	23,50	15,60	25,77	2,98	MÉDIA
36.90	35.90	34.80	17.50	16.70	18.80	22.50	15.10	8.49	0.73	MÍNIMA

CONJUNTO DE MONITORAMENTO 3 - dia 13/12/2000

PRESSÃO (mH2O)								VAZÃO (L /s)		CONDIÇÃO DE DEMANDA
NÓ								PONTO		
5	14	63	97	120	130	135	142	entrada	interno	
39,70	30,90	24,90	20,00	21,70	19,40	25,20	17,40	35,75	3,16	MÁXIMA
41,40	31,90	27,30	15,00	22,60	20,10	24,40	17,80	25,62	2,46	MÉDIA
41,10	31,10	26,50	28,20	21,60	19,60	25,50	16,50	10,50	0,86	MÍNIMA

CONJUNTO DE MONITORAMENTO 4 - dia 15/12/2000

PRESSÃO (mH2O)								VAZÃO (L /s)		CONDIÇÃO DE DEMANDA
NÓ								PONTO		
41	49	53	77	103	111	123	142	entrada	interno	
29,50	23,40	15,60	13,20	21,10	18,80	21,40	13,90	29,25	2,88	MÁXIMA
29,80	26,50	21,60	15,40	22,60	21,10	23,30	14,80	20,88	3,31	MÉDIA
31,70	28,50	24,90	18,00	24,30	22,60	25,50	16,20	9,58	0,52	MÍNIMA

CONJUNTO DE MONITORAMENTO 5 -dia 20/12/2000

PRESSÃO (mH2O)								VAZÃO (L /s)		CONDIÇÃO DE DEMANDA
NÓ								PONTO		
10	58	61	83	108	122	127	142	entrada	interno	
36,20	21,70	26,00	24,20	16,90	24,90	19,10	16,50	39,25	4,88	MÁXIMA
34,30	24,40	30,40	23,90	16,90	23,90	20,10	15,20	26,84	2,19	MÉDIA
35,10	26,20	31,30	23,80	17,30	25,50	19,90	14,90	10,38	0,65	MÍNIMA

ANEXO 11:

INFORMAÇÕES SOBRE OS PARÂMETROS MEDIDOS EM CAMPO DA REDE SÃO CARLOS 3 RELATIVOS A VAZAMENTOS

PRESSÃO (mH ₂ O)								VAZAMENTO (L/s)	PATAMAR
NÓ									
16	20	48	124	76	65	142	87	ENTRADA	
42,04	35,55	29,23	25,93	22,08	19,39	15,60	16,32	10,09	1
32,04	25,55	19,23	16,12	11,93	9,23	5,43	6,66	7,09	2
27,87	21,05	14,51	11,67	7,55	4,54	1,03	2,66	5,46	3
26,21	19,30	13,12	9,63	5,99	3,14	0,57	1,32	2,18	4

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, I ; LANSEY, K. ; ARAÚJO, J. (1999). Data Collection For Water Distribution Network Calibration. In: Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications Vol I, p. 271-277 – University of Exeter, UK
- 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.
- AWUMAH, K.; GOULTER, I.; BHATT, S.K.(1991). Entropy-based redundancy measures in water distribution network design. ASCE J. Hydraulic Engineering. v. 117, n. 5, p. 595-614.
- BHAVE, P. R. (1988). Calibrating Water Distribution Network Models. Journal of Environmental Engineering, v. 114, n. 1, p. 120-136, Feb.
- BOULOS, P.F.; WOOD, D.J. (1990). Explicit Calculation of Pipe- Network Parameters. J. Hydr. Engrg.,ASCE, v.116, n.11, p.1329-1344.
- BUSH, C. A.; UBER, J. G. (1998). Sampling Design Methods for Water Distribution Model Calibration. Journal of Water Resources Planning and Management, v.124, n.6, p.334-343.
- 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.
- CEMBROWICZ, R.G.; KRAUTER, G.E. (1977). Optimization of urban and regional water supply systems. Systems Approach for Development . p.449-454.

- 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.
- 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.B.F. (2000). *Optimal Calibration and Sampling Design for Hydraulic Network Models*. 276p. Tese (Doutorado). Exeter University, U.K.
- De SCHAETZEN, W; RANDALL-SMITH, M.; SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. (1999) *Optimal Logger Density in Water Distribution Network Calibration*. In: *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications Vol I*, p.301-307 – University of Exeter, UK
- 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.
- GAMBALE, S. R. (2000). *Aplicação de algoritmo genético na calibração de redes de água*. São Paulo. 266 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Politécnica, Universidade de São Paulo, Brasil.
- GEN, M.; CHENG, RUNWEI. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*. John Wiley & Sons, inc.
- 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, Reading, Massachusetts, USA.

GOLDBERG, D.E. (2002). The design of innovation: Lessons from and for competent genetic algorithms, USA.

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.

HOLLAND, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor, Mich.

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.

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.

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.

LANSEY, K. ; BASNET, C. (1991). Parameter Estimation for Water Distribution Networks . *J. of Water Resources. Plng and Mgmt, ASCE*, v. 117, n.1, p.126-144.

LEE, B.; DEINIGER, R. (1992). Optimal Locations of monitoring stations in water distribution system. *Journal of Environmental Engineering*, v. 118, n. 1, p. 4-16.

LIGGETT, J.A.; CHEN, L.C. (1994). Inverse transient analysis in pipe networks. *J. Hydr. Engrg, ASCE*, v. 120, n.8, p.934-955.

LIGGETT, J. ; CHEN, L. (1995). Monitoring water distribution systems: the inverse method as a tool for calibration and leak detection. "Improving Efficiency and reliability in Water Distribution Systems, E. Cabrera and A. F. Vela (eds) p. 107-125.

- LINGIREDDY, S.; ORMSBEE, L. E. (2002). Hydraulic Network Calibration Using Genetic Optimization. *Civil Engineering and Environmental Systems*, v. 19, n. 1, p. 13-39.
- 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. *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications Vol I*, p.155-174 – University of Exeter, UK
- MCKINNEY, D.C.; LIN, M.D. (1994). Genetic algorithm solution of groundwater management models. *J. Water Resour.*, vol. 30, n.6, p.1897-1906.
- 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.
- MICHALEWICZ, Z. (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs*. Springer, Germany.
- ORMSBEE, L.E.; WOOD, D.J. (1986). Hydraulic Design Algorithm for Pipe Networks. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, v.112, n.12, p.1195-1207.
- ORMSBEE, L.E. (1989). Implicit Network Calibration. *J. Water Res. Plng and Mgmt*, ASCE, v.115, n.2, p.243-257.
- PEZZINGA, G. (1994). Modelli per la Regolazione della Piezometria ai Fini della Riduzione delle Perdite in Rete. XXIV Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche, v. 2, n. T3b, p. 25-38, Napoli, Italia.
- PEZZINGA, G.; GUELI, R. (1998). Optimal Location of Control Valves in Water Supply Networks by Genetic Algorithm. Discussion. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 125, n. 1, p. 67.

- PILLER, O; BREMOND, B.; MOREL, P. (1999). A spatial sampling procedure for physical diagnosis in a drinking water supply network. In: Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications Vol I, p. 309-316 – University of Exeter, UK
- PUDAR, R.S.; LIGGETT, J.A. (1992). Leaks in Pipe Network . J. Hydr. Engrg., ASCE, v.118. n.7, p.1031-1046.
- RAHAL, C.M; STERLING, M.J.H.; COUBELCK, B. (1980). Parameter Tuning for Simulation Models of Water Distribution Networks. Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2, Sept., p.751-762.
- RECHENBERG, I. (1973). Evolutionsstrategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution. Fromman-Holzboog, Stuttgart, Germany
- 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 Valves in Pipe Networks By Genetic Algorithm. Journal of Water Resources Planning and Management, v.123, n.6, p.317-326.
- RIGHETTO, A.M. (2001). Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 6, n.3, p.33-44.
- RITZEL, B.J.; EHEART, W. (1994). Using genetic algorithms to solve a multiple objective groundwater pollution containment problem. J. Water Resour. v.30, n.5, p.1589-1603.
- SAVIC, D.A. & WALTERS, G.A. (1995). An Evolution Program for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks. University of Exeter. School of Engineering.
- SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. (1997). Evolving Sustainable Water Networks. Hydrological Sciences. Journal des Sciences Hydrologiques, v.42. n.4, p.545-564.

- SHAMIR, U. & HOWARD, C.D.D. (1977). Engineering Analysis of Water Distribution Systems. *Journal of the American Water Works Association*, v.69, n.9, p.510-514.
- SIMPSON, A.R.; DANDY, G.C. ; MURPHY, LAURENCE (1994). Genetic Algorithms Compared to Other Techniques for Pipe Optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v.120, n.4, p.423-443.
- TANYIMBOH, T.T.; TEMPLEMAN, A.B. (1993a). Maximum Entropy Flows for Single-Source Networks. *Eng. Opt.*, v. 22, p. 49-63
- TANYIMBOH, T.T.; TEMPLEMAN, A.B. (1993b). Calculating maximum entropy flows in networks. *J Operational Research Soc.*, v. 44, n.4, p. 383-396.
- TODINI, E. (1999). Using a Kalman filter approach for looped water distribution network calibration. *Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications Vol I*, 327-336 – University of Exeter, UK
- 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.
- VAIRAVAMOORTHY, K.; LUMBERS, J. (1998). Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control, *Journal Hydraulic Engineering*, v.124, n. 11, p.1146-1154.
- VÍTKOVSKÝ, J. P.; SIMPSON (1997). Calibration and leak detection in pipe networks using inverse transient analysis and genetic algorithms. *Research Report, N° R157*, University of Adelaide, Austrália
- 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.

WALSKI, T.M. (1983). Technique for Calibrating Network Models. J. Water Res. Plng and Mgmt, ASCE, v. 109, n.4, p.360-372.

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.K.(1993). Optimal layout of tree networks using genetic algoritms. Engng Optimization. p.27-48.

WALTERS, G.A.; SAVIC, D.A.; MORLEY, M.; WERNER, D.S. (1998). Calibration of Water Distribution Network Models Using Genetic Algorithms. University of Exeter. School of Engineering. HYDROSOFT 1998 (Inglaterra).

WATER RESEARCH CENTRE (1989). Network analysis – A code of practive. Published by WRc, Swindon, England.

WOO, H., YOON, J.; CHOI, D. (2001). Optimal monitoring site based on water quality and quantity in water distribution systens. Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress, Orlando, Florida (ASCE)

YU, G.; POWELL, R. (1994). Optimal design of meter placement in water distribution systens. Int Journal Systems. Sci, v. 25, n. 12, p.2155-2166

OBRAS CONSULTADAS

ARAÚJO, J; LANSEY, K. (1991). Uncertainly Quantification in Water Distribution Parameter Estimation . Presented at the National Hydraulic Engineering Conference, ASCE, Nashville, TN.

AWWA (1976). Form and Procedures for Fire Flow Tests. Journal of the American Water Works Association, v.68, n.5, p.264-268.

- BASCIÀ, A.; TERMINI, D. T. TUCCIARELLI. A Clustering Technique For Parameter Estimation In Pipe Flow Network Model (1999). Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications Vol I – University of Exeter, UK
- BERRETA, R. E.. Heurísticas e Meta-Heurísticas em Otimização Combinatória. Parte do material do curso junto ao ICMSC - USP, oferecido no 1o semestre de 1999.
- CALIMAN, R. O., SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDRHY, F. H. (2001). Determinação de parâmetros do modelo pressão-vazamento para um sub-setor da cidade de São Carlos-SP com utilização de Algoritmos Genéticos. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2001, Aracajú.
- “FORM AND PROCEDURES FOR FIRE FLOW TESTS” (1976) . Journal of the American Water Works Association, v.68, n.5, p.264-268, May.
- GRAYMAN, W.M.; CLARK, R.M.; MALES, R.M. (1988). Modeling Distribution System Water Quality: Dynamic Approach. J. Water Resour. Plng. and Mgmt., ASCE, v.114, n.3, p.295-312.
- KAVISKI, E.; MULLER, I. I. - Análise De Agrupamentos De Autocorrelações De Vazões Médias Diárias Censuradas. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte - 1999
- KHADAM, M.A.; SHAMMAS, N.K.; AL-FERAIHEEDI (1991). Water Losses from Municipal Utilities and their impacts. J. of the International Water Resources Association, IWRA, v.16, n.4, p. 254-261.
- MALLICK, K.N; AHMED, I.; TICKLE, K.; LANSEY, K.(1999). Determining Parameter Dimensions for Water Distribution Networks.
- PORTO, R.M.; REIS, L.F.R. (1992). Interpretação Hidráulica do Modelo de Jowitt-Xu de Minimização de Perdas por Vazamento II - Análise de Desempenho das Válvulas. In: Congresso Latino Americano de Hidráulica, 10. Anais. Cartagena, p.461-470.

- REIS, L.F.R.; PORTO, R.M. (1992). Interpretação Hidráulica do Modelo de Jowitt-Xu de Minimização de Perdas por Vazamento II - Análise de Perdas de Carga. In: Congresso Latino Americano de Hidráulica, 10. Anais. Cartagena, p.449-459.
- REIS, L.F.R.; PORTO, R.M. (1993). Redução de Perdas de Água em Redes de Abastecimento - Avaliação de Metodologia. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 17, Natal, p.3-19.
- REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., SANTOS, A., SILVA, F. G. B. (2002). Estudos de vazamentos para setores de rede da cidade de São Carlos -SP. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. /Submetido
- REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., SANTOS, A., SILVA, F. G. B. (2002). Estudos de vazamentos para setores de rede da cidade de São Carlos - SP In: REDE COOPERATIVA DE PESQUISA EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS - REUNIÃO FINAL, Vitória – E.S. Caderno de trabalhos técnicos.
- RIGHETTO, A.M. (1977). Desenvolvimento de Modelos de Simulação para o Dimensionamento de Redes de Distribuição de Água. Tese de Doutorado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- RIGHETTO, A.M. (1994). Cálculo Hidráulico de Redes de Distribuição de água a partir de Condições Transitórias : Adequação e Estudo de Casos. Tese de Livre Docência- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROSSMAN, L.; BOULOS, P. (1993). Discrete Volume-Element Method for Network Water-Quality Models. J. Water Resour. Plng and Mgmt., ASCE, v.115, n. 9, p.505-517.
- ROSSMAN, L.; CLARK, R. ; GRAYMAN, W. (1994). Modeling Chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems. J. Envir. Engrg., ASCE, v.120, n. 4, p.803-820.
- SANTOS, A., REIS, L. F. R., SILVA, F. G. B., GRATÃO, U., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F.H. (2000) Avaliação de parâmetros do modelo pressão-vazamento

para sub-setor da cidade de São Carlos-SP. In: IX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro. Anais do eletrônicos do evento

SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. & SCHWAB, M.(1997). Multiobjective genetic algorithm for pumping scheduling in water supply. In: AISB'97, Manchester, 1997. Evolutionary Computing workshop, Manchester. p.59.

SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., CHAUDHRY, F. H. (2002). Análise de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento aplicada a setor de rede real - uma aproximação que contempla vazamentos. REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. Aceito para publicação (2003)

SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R. (2002) Comparative Analysis of Different Schemes for Implementing Genetic Algorithms (GAs) in Calibration of Water Supply Distribution Systems. JOURNAL OF THE BRAZILIAN COMPUTER SOCIETY/Submetido

SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R.(2002) Alternativas para implementação e aplicação de um modelo de calibração de rede de distribuição de água via algoritmos genéticos - estudo de caso para a cidade de São Carlos,SP, Brasil In: 10 SILUBESA - Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Braga – Portugal. Anais do evento.

SILVA, F. G. B., REIS, J. A. T., CHEUNG, P. B., REIS, L. F. R.,CHAUDRHY, F. H. (2002). Aplicação de algoritmos genéticos à calibração de um modelo do processo de lodos ativados In: 10 SILUBESA - Simpósio luso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 2002, Braga - Portugal. Anais do evento.

SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., CHAUDRHY, F. H. (2002). Análise de calibração de redes de distribuição de água para abastecimento aplicada a setor de rede real - uma aproximação que contempla vazamentos In: REDE COOPERATIVA DE PESQUISA EM ENGENHARIA E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS. Vitória – E.S. Caderno de trabalhos técnicos.

- SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., SOARES, A. K. (2002). Calibração de rede de distribuição de água considerando as perdas por vazamentos explicitamente no modelo com o uso de algoritmos genéticos - aplicação para rede da Cidade de São Carlos - SP In: SEMINÁRIO: PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA - O ESTUDO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS, JOÃO PESSOA - PB. Anais eletrônicos do evento.
- SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R. (2002). Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética In: VI SIMPÓSIO ITALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, vitória – E.S. Anais eletrônicos do evento.
- SILVA, F. G. B., REIS, L. F. R., CALIMAN, R. O., PORTO, R. M., CHAUDRHY, F. H. (2001). Aplicação de método de determinação de rede de amostragem ótima para calibração de sistemas de distribuição de água para abastecimento através de Algoritmos Genéticos (AGs) In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2001, Aracajú. Anais do eletrônicos do evento.
- SILVA, F. G. B., GRATÃO, U., SANTOS, A., REIS, L. F. R., PORTO, R. M., CHAUDHRY, F. H. (1999) Controle operacional em sistemas de distribuição de água para abastecimento visando o controle de perdas: experiência em sub-setores da cidade de São Carlos - SP. In: V Simpósio do Curso de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da EESC-USP, 1999, São Carlos. Anais do eletrônicos do evento
- 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: SEMINÁRIO: PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA - O ESTADO DA ARTE E QUESTÕES AVANÇADAS JOÃO PESSOA - PB. Anais do eletrônicos do evento.

- SOUZA, R.S. (1994). Aspectos Computacionais da Análise de Redes de Distribuição de Água com Componentes Hidráulicos em Regime Permanente. Dissertação de Mestrado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SOUZA, R.S. (1998). Controle Operacional Otimizado de Redes de Distribuição de Água Usando a Teoria do Regulador Quadrático Linear. Tese de Doutorado- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- WALSKI, T.M.; GESSLER, J.; SJOSTROM, J. (1990). Water Distribution System. Simulation and Sizing, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 321p.
- YEH, W.; YOON, Y. (1981). Aquifer Parameter Identification with Optimal Parameter Dimension. Water Res. v.17, n.3, p.664-672.

APÊNDICE 1:

GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE PRESSÃO
E VAZÃO AO LONGO DO TEMPO PARA
ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DA
CURVA PRESSÃO – VAZAMENTO NOS
DOIS SETORES DE REDES REAIS

- SETOR MONTE CARLO

- PONTO CRÍTICO

- PONTO CRÍTICO*

- PONTO MÉDIO 1

- PONTO MÉDIO 2

- PONTO MÉDIO 3

- PONTO EXTREMO

- VAZÃO NA ENTRADA DO SETOR

- SETOR SÃO CARLOS 3

PONTO 1 - RODIZIO 1 - NÓ 65
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 2 - RODIZIO 1 - NÓ 142 - ENTRADA DO SUB-SETOR
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 3 - RODIZIO 1 - NÓ 87
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 4 - RODIZIO 1 - NÓ 76
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 5 - RODIZIO 1 - NÓ 124
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 6 - RODIZIO 1 - NÓ 48
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 7 - RODIZIO 1 - NÓ 16
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO 8 - RODIZIO 1 - NÓ 20
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
DETERMINAÇÃO CURVA PRESSÃO-VAZAMENTO

PONTO INTERMEDIÁRIO - RODIZIO 1
VAZÃO X HORAS DO DIA

PONTO - ENTRADA DO SETOR - RODIZIO 1
VAZÃO X HORAS DO DIA

APÊNDICE 2:

GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE PRESSÃO
AO LONGO DO TEMPO PARA ENSAIOS
CONTÍNUOS DE MONITORAMENTO:
SETOR MONTE CARLO

Ponto crítico

Ponto crítico*

Ponto médio 1

Ponto médio 2

Ponto médio 3

Ponto extremo

APÊNDICE 3:

GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE PRESSÃO E
VAZÃO AO LONGO DO TEMPO PARA
ENSAIOS CONTÍNUOS DE
MONITORAMENTO: SETOR
SÃO CARLOS 3 – CONJUNTO
MONITORADO 1

PONTO 1 - RODIZIO 1 - NÓ 65
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
OBSERVAÇÃO CONTÍNUA DE PRESSÃO

PONTO 2 - RODIZIO 1 - NÓ 142 - ENTRADA DO SUB-SETOR
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
OBSERVAÇÃO CONTÍNUA DE PRESSÃO

PONTO 3 - RODIZIO 1 - NÓ 87
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
OBSERVAÇÃO CONTÍNUA DE PRESSÃO

PONTO 4 - RODIZIO 1 - NÓ 76
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
OBSERVAÇÃO CONTÍNUA DE PRESSÃO

PONTO 5 - RODIZIO 1 - NÓ 124
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
OBSERVAÇÃO CONTÍNUA DE PRESSÃO

PONTO 6 - RODIZIO 1 - NÓ 48
PRESSÃO X HORAS DE OBSERVAÇÃO
OBSERVAÇÃO CONTÍNUA DE PRESSÃO

APÊNDICE 4:

RESULTADOS DA EVOLUÇÃO DE
PRESSÕES MEDIDAS AO LONGO DAS
ITERAÇÕES E COMPARAÇÃO COM AS
CALCULADAS PARA OUTRAS
POPULAÇÕES ALEATÓRIAS DE
SOLUÇÕES INICIAIS DISTINTAS: SETOR
SÃO CARLOS 3 – MÓDULO 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 2 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 2 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 2 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 2 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 2 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 3 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 3 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 3 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 3 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 3 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 4 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 4 conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 4 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 4 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 4 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 5 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 5 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 5 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 5 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 5 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 6 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 6 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 6 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 6 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 6 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 7 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 7 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 7 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 7 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 7 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 8 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 8 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 8 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 8 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 8 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 9 -conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 9 -conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 9 -conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 9 -conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 9 -conjunto 5

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 10 - conjunto 1

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 10 - conjunto 2

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 10 - conjunto 3

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 10 - conjunto 4

Pressões medidas e simuladas para iterações do método – população aleatória 10 - conjunto 5

APÊNDICE 5:

RESULTADOS DA EVOLUÇÃO DE
PRESSÕES MEDIDAS AO LONGO DAS
ITERAÇÕES E COMPARAÇÃO COM AS
CALCULADAS PARA OUTRAS
POPULAÇÕES ALEATÓRIAS DE
SOLUÇÕES INICIAIS DISTINTAS: SETOR
SÃO CARLOS 3 – MÓDULO 2

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 2 - RODRIGO

PRESSÃO MÁXIMA

pressão máxima

PRESSÃO MÉDIA

PRESSÃO MÍNIMA

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 3

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 4

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 5

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 6

PRESSÃO MÁXIMA

PRESSÃO MÉDIA

PRESSÃO MÍNIMA

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 7

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 8

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 9

POPULAÇÃO ALEATÓRIA 10

PRESSÃO MÁXIMA

PRESSÃO MÉDIA

PRESSÃO MÍNIMA