

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de
Distribuição de Água de Cambuí (MG)

Thaís Dias de Castro Goulart

Itajubá, maio de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Thaisa Dias de Castro Goulart

Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de
Distribuição de Água de Cambuí (MG)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Modelagem matemática aplicada a meio ambiente e recursos hídricos

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

Maio de 2015

Itajubá – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Thaisa Dias de Castro Goulart

Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de
Distribuição de Água de Cambuí (MG)

Dissertação aprovada por banca em 13 de maio de 2015,
conferindo ao autor título de **Mestre em Ciências em Meio
Ambiente e Recursos Hídricos.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva (Orientador)

Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares

Prof^a.Dr^a. Marcia Viana Lisboa Martins

Itajubá

2015

DEDICATÓRIA

À minha família, minha mãe Eliane, meu pai Ricardo, a minha irmã Janaína e minha sobrinha Laura, e ao meu namorado Diogo, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando.

Esta vitória é o resultado da confiança e da força de cada um de vocês. E também a todos que contribuíram de uma forma ou de outra para a realização deste.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus que com seu amor incondicional e sabedor dos nossos medos e das nossas necessidades me deu força para seguir por este caminho possibilitando realizar com sucesso este trabalho.

Ao professor Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, orientador da dissertação, pela sua disponibilidade e pelo acompanhamento exercido durante a execução do trabalho.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos e pesquisa concedida durante o curso do meu mestrado. Ao Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos – NUMMARH, pela oportunidade de participação junto ao projeto vinculado a FINEP: Monitoramento, simulação e operação de sistemas de distribuição de água – 983-10.

Aos meus amigos e amigas que sempre me auxiliaram quando necessário. Aos meus colegas de programação Diego, Rodrigo, Iago e Lauro que estiveram comigo desenvolvendo a linguagem de programação e que me motivaram a persistir. Aos mestrandos e amigos Marielle, Fernando e Lucas que me acompanharam e auxiliaram na campanha de campo para a obtenção dos dados. Ao professor Dr. Alexandre Keppler Soares que também ajudou no estudo com importantes informações do modelo de demanda dirigida por pressão.

À companhia de água municipal, SAAE de Cambuí (MG), em especial ao diretor do SAAE Luiz Paulo que disponibilizou tempo para esclarecimento de dúvidas, fornecimento de dados e informações. Além da disponibilidade dos servidores, com destaque ao servidor Marcos que acompanhou todas as visitas de campo e nos auxiliou nas instalações e utilização dos equipamentos.

À empresa Geotec – Minas Sondagens e Serviços Ltda pelo auxílio de informações e dados pertinentes ao trabalho.

Aos funcionários da UNIFEI, Douglas e André, que disponibilizaram de seu tempo e auxiliaram em treinamentos, instalação de equipamentos e esclarecimento de dúvidas.

Aos professores do curso de pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pelos conhecimentos transmitidos nas disciplinas cursadas durante o mestrado.

A minha família. Ao meu pai Ricardo Faria Goulart, a minha mãe Eliane Maria Dias Goulart e a minha irmã Janaina Dias de Castro Goulart, que estão sempre me apoiando e me indicando o melhor caminho para atingir minhas ideais.

Ao meu namorado, Diogo Vieira Orlando, que esteve ao meu lado durante todo este tempo me dando palavras de incentivo, me ajudando a ser perseverante e compreendeu muitas vezes minha ausência e falta de tempo.

Enfim, a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Diante da indiscutível necessidade de um gerenciamento de qualidade dos recursos hídricos, principiando pelas redes de distribuição de água para o abastecimento humano, os modelos matemáticos da previsão do comportamento hidráulico das mesmas são essenciais, bem como a revisão dos seus parâmetros e o seu aprimoramento, frente às constantes mudanças físicas sucedidas ao longo do tempo em um sistema. A calibração das redes de distribuição de água é uma maneira de efetuar tais procedimentos nos modelos hidráulicos, mas diversas são as dificuldades encontradas na calibração de uma rede real, dentre elas a precariedade das informações nos cadastros das companhias de água. Diferentes métodos de calibração foram e são propostos na literatura, geralmente com equações analíticas e variadas técnicas de otimização. Este trabalho propõe o aprimoramento de módulos do método de calibração de redes de distribuição de água proposto por Silva (2003), onde empregando a ferramenta de busca dos algoritmos genéticos, o autor calibra duas redes de distribuição de água reais da cidade de São Carlos (SP), ajustando parâmetros principalmente de rugosidades e de vazamentos. O aprimoramento do modelo constitui a introdução de uma nova variável de decisão, a demanda nodal, que primeiramente atribui valores aleatórios de demanda aos nós e após trabalha segundo o modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). Os testes dos modelos implementados são testados para uma rede hipotética de distribuição de água e duas redes reais. A primeira rede real é a mesma ensaiada por Silva (2003), o setor “Monte Carlo” e a segunda rede real, sobre a qual foram realizados extensivos trabalhos de campo, é um setor da cidade de Cambuí (MG). O efeito da introdução do modelo da demanda dirigida por pressão nos resultados de calibração se mostrou mais significativo para a rede hipotética e para a rede real do setor “Monte Carlo”, obtendo valores simulados de pressão com erro absoluto médio menor que 0,5 mca para 100% dos nós da rede hipotética e menor que 0,75 mca para 95% da rede real do setor “Monte Carlo”. No setor real de Cambuí (MG) demonstra-se a necessidade de novos estudos para que os modelos de calibração se ajustem, como por exemplo os coeficientes de vazamento. Tais estudos naturalmente são necessários para calibração em redes de escala real.

Palavra-chave: Rede de distribuição de água, calibração, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

Given the indisputable need for a quality management of water resources, beginning in the water distribution networks for human consumption, the mathematical models of prediction of the hydraulic behavior are essential, as well as the review of its parameters and their improvement, forward to the constant physical changes over time in a system. The calibration of water distribution networks is a way to perform such procedures in hydraulic models, but many are the difficulties found in the calibration of a real network, among them the precariousness of the information in water companies. Different calibration methods were and are proposed in the literature, usually with analytical equations and various optimization techniques. This paper proposes the enhancement of modules calibration method proposed by Silva (2003), where using the search tool of genetic algorithms, the author calibrates two real water distribution system of the city of São Carlos (SP), mainly adjusting parameters roughness and leaks. The model improvement is the introduction of a new variable decision, the nodal demand, which first assigns random demand values to us and after works on the demand model run by pressure Tucciarelli, Criminisi and Termini (1999). The tests of the models implemented are tested for a hypothetical network of water distribution and two real networks. The first real network is the same tested by Silva (2003), the sector "Monte Carlo", and the second real network on which were carried out extensive field work, is a sector of the city of Cambuí (MG). The effect of the introduction of the model driven by demand pressure in the calibration results was more significant for the hypothetical network and to the real sector, "Monte Carlo" network, obtaining simulated pressure values with mean absolute error less than 0.5 mca to 100% of the nodes of the network hypothetical and less than 0.75 mca for 95% of the real sector network "Monte Carlo". In the real sector Cambuí (MG) demonstrates the need of new studies for the calibration models fit, such as the leakage coefficient. Such studies are of course necessary for the implementation of new algorithms in real-scale networks.

Keywords: Water distribution network, calibration, genetic algorithms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de abastecimento de água: (a) vista em planta; (b) vista de perfil com reservatório apoiado	26
Figura 2 – Variação do fator ρ_i para os modelos Pressão x Demanda	38
Figura 3 – Ciclo Básico de um Algoritmo Genético.	41
Figura 4 – Propriedades dos algoritmos genéticos	42
Figura 5 – Troca simples de elementos - Cruzamento de um ponto.	46
Figura 6 – Troca simples de elementos - Cruzamento de dois pontos.	46
Figura 7 – Fluxograma dos modelos AG simples e AG híbrido	50
Figura 8 – Fluxograma das etapas do trabalho.	53
Figura 9 – Localização do município de Cambuí (MG).....	54
Figura 10 – Localização do município pelo Google Earth.	54
Figura 11 – Croqui do abastecimento do município de Cambuí (MG).	57
Figura 12 – Localização do setor analisads.	58
Figura 13 – Diagrama da rede de distribuição de água que abastece o setor estudado. .	59
Figura 14 – Componentes do setor em estudo. (a) Estação de tratamento de água (ETA); (b) Reservatório R3;	60
Figura 15 – Componentes do setor em estudo. (a) Conjunto de bombas Meganorm no R3; (b) Reservatórios de R4.	61
Figura 16 – Diagrama das interligações e saídas dos reservatórios de R4.	62
Figura 17 – Tubulação da sobra de água que chega ao reservatório tipo caixa no R4...	63
Figura 18 – Tubulação que chega diretamente ao reservatório tipo caixa do R4.....	63
Figura 19 – Tubulações que saem do reservatório tipo caixa do reservatório R4.....	64
Figura 20 – Reservatórios de 50 m ³ situados antes do bairro Vila Mariana.....	65
Figura 21 – Traçado de toda a rede de distribuição de água	65
Figura 22 – Diâmetro das tubulações.	66
Figura 23 – (a) Interface d software DPPLOGGER; (b) Data Logger de pressão e pulso.	67
Figura 24 – (a) Etiquetagem dos data loggers e mangueiras; (b) Configuração dos data loggers.	68
Figura 25 – Obtenção dos dados de pressão junto ao manômetro de pressão.....	68
Figura 26 – Maleta do equipamento ultrassom e seus acessórios.	69
Figura 27 – (a) Instalação dos sensores na tubulação de ensaio. (b) Obtenção do valor de vazão com o ultrassom.	69
Figura 28 – Treinamento com DGPS na UNIFEI.	70
Figura 29 – Partes constituintes do DGPS. (a) antena; (b) GPS – Sistema de Posicionamento Global; (c) bipé; (d) bolha para nivelamento	71
Figura 30 – Setor de interesse da rede de distribuição de água em estudo.....	72
Figura 31 – (a) e (b) Local de posicionamento do conjunto base do DGPS; (c) ponto georreferenciado; (d) exemplificação da obtenção das cotas topográficas pelo conjunto móvel do DGPS.....	73
Figura 32 – Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão e vazão.....	75

Figura 33 – Caixa construída para alocação dos equipamentos: Ultrassom (medidor de vazão) e Data logger (medidor de pressão manométrica).	76
Figura 34 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Água Branca.....	78
Figura 35 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Vale do Sol.....	78
Figura 36 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Vale das Montanhas.	78
Figura 37 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Vila Mariana.	79
Figura 38 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em duas das residências no bairro Vale das Rosas.	79
Figura 39 – Foto da instalação do medidor de pressão, data logger, e do medidor de vazão, ultrassom, na caixa construída na entrada da rede no reservatório R4.	79
Figura 40 – Traçado da rede hipotética	83
Figura 41 – Esquema do Setor “Monte Carlo”, cidade de São Carlos (SP).....	85
Figura 42 – Registros de pressão, nó 96.....	90
Figura 43 – Registros de pressão, nó 140.....	90
Figura 44 – Registros de pressão, nó 141.....	91
Figura 45 – Registros de pressão, nó 142.....	91
Figura 46 – Registros de pressão, nó 143.....	92
Figura 47 – Registros de pressão, nó 144.....	92
Figura 48 – Registros de pressão, nó 146.....	93
Figura 49 – Registros de pressão, nó 147.....	93
Figura 50 – Registros de pressão, nó 148.....	94
Figura 51 – Registros de pressão, nó 153.....	94
Figura 52 – Registros de pressão, nó 159.....	95
Figura 53 – Registros de pressão, entrada da rede.	96
Figura 54 – Registros de vazão, entrada da rede.	96
Figura 55 – Fluxograma do AG empregando o modelo proposto por SILVA (2003)..	98
Figura 56 – Fluxograma do AG empregando o Modelo implementado com demanda aleatória.	99
Figura 57 – Fluxograma do AG empregando o Modelo implementado a demanda dirigida por pressão.	100
Figura 58 – Organograma das simulações realizadas.....	108
Figura 59 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo proposto por Silva (2003).	109
Figura 60 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo com rugosidade e demandas aleatórias.....	109
Figura 61 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo com rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão.	110
Figura 62 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG proposto por Silva (2003).	117

Figura 63 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG com rugosidade e demandas aleatórias.....	118
Figura 64 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG com rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão.....	118
Figura 65 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias iniciais distintas.	119
Figura 66 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias e demandas aleatórias iniciais distintas.	120
Figura 67 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias e demandas dirigidas por pressão distintas.	120
Figura 68 – Variação das rugosidades atribuídas aos trechos 3, 18 e 59 para cada semente aleatória testada – Modelo proposto por Silva (2003) e modelos implementados com demanda aleatória e demanda dirigida por pressão.	122
Figura 69 – Variação das demandas atribuídas aos nós 19, 26 e 38 para cada semente aleatória testada – Modelos implementados com demanda aleatória e demanda dirigida por pressão.	123
Figura 70 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para os três padrões de consumo para o modelo proposto por Silva (2003).	125
Figura 71 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para os três padrões de consumo para o modelo implementado com demanda aleatória. ...	126
Figura 72 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para os três padrões de consumo para o modelo implementado com demanda dirigida por pressão.	127
Figura 73 – Vazões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias na entrada da rede, para os três padrões de consumo e para os três modelos.	129
Figura 74 – Erros absolutos médios dos valores de pressão observado e simulado, para os três padrões de consumo e para os três modelos.....	131
Figura 75 – Erro relativo médio dos valores de vazões observadas e simulados, para os três padrões de consumo e para os três modelos.	132
Figura 76 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG proposto por Silva (2003).	133
Figura 77 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG com rugosidade e demandas aleatórias.....	133
Figura 78 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias iniciais distintas.	134
Figura 79 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias e demandas aleatórias iniciais distintas.	135
Figura 80 – Variação das rugosidades atribuídas aos trechos 18, 61 e 154 para cada semente aleatória testada – Modelo proposto por Silva (2003) e modelo implementado com demanda aleatória.	136
Figura 81 – Variação das demandas atribuídas aos nós 19, 46 e 147 para cada semente aleatória testada – Modelo implementado com demanda aleatória.	137

Figura 82 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para o padrão de consumo máximo para o modelo proposto por Silva (2003).....	138
Figura 83 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para o padrão de consumo máximo para o modelo implementado com demanda aleatória. ...	138
Figura 84 – Vazões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias na entrada da rede, para o padrão de consumo máximo e para os dois modelos.	139
Figura 85 – Erros absolutos médios dos valores de pressão observado e simulado, para o padrão de consumo máximo e para os dois modelos.	140
Figura 86 – Erro relativo médio dos valores de vazões observadas e simulados, para o padrão de consumo máximo e para os dois modelos.	141
Figura 87 – Relatório estatístico obtido no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.	142
Figura 88 – Comparação dos valores de pressão observados e calculados no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.	143
Figura 89 – Mapa de pressão obtido no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.	145
Figura 90 – Comparação entre os valores de pressão observados, simulados pelos modelos e pelo <i>software</i> Epanet para a rede hipotética – Padrão 3.....	146
Figura 91 – Relatório estatístico obtido no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.	148
Figura 92 – Comparação dos valores de pressão observados e calculados no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.	149
Figura 93 – Mapa das zonas de pressão obtido no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.	151
Figura 94 – Comparação entre os valores de pressão observados, simulados pelos modelos e pelo <i>software</i> Epanet para a rede real do setor “Monte Carlo” – Padrão 3.	152
Figura 95 – Relatório estatístico obtido no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) e (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória – Padrão 1.....	154

Figura 96 – Comparação dos valores de pressão observados e calculados no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) e (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória – Padrão 1.....	155
Figura 97 – Mapa das zonas de pressão obtido no <i>software</i> EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) e (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória – Padrão 1.....	157
Figura 98 – Comparação entre os valores de pressão observados, simulados pelos modelos e pelo <i>software</i> Epanet para a rede real do setor de Cambuí (MG) – Padrão 1.	158
Figura 99 – Exemplo da listagem dos consumos dos usuários para o Bairro Água Branca no mês de julho de 2014.....	182
Figura 100 – Variação de pressão no nó 96 no dia 09 de outubro de 2014, das 11:00h às 15:00h.	193
Figura 101 – Propriedades dos nós e trechos da rede real do setor “Monte Carlo”	196
Figura 102 – Continuação das propriedades dos nós e trechos da rede real do setor “Monte Carlo”	197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice de perdas na distribuição (indicador IN_{049}) dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2011, segundo tipo de prestador de serviços, região geográfica e Brasil.....	29
Tabela 2 – Resumo dos modelos de Pressão x Demanda.....	39
Tabela 3 – Localização dos registros existentes na rede de distribuição de água do setor em estudo.....	66
Tabela 4 – Nós escolhidos para monitoramento de pressão manométrica.....	75
Tabela 5 – Consumo nodal de cada nó da rede do setor de Cambuí (MG).....	80
Tabela 6 – Parâmetros do AG adotados nas modelagens.....	105
Tabela 7 – Valores de pressões e vazões simulados no <i>software</i> Epanet e obtidos pelo modelo de calibração proposto por Silva (2003).....	112
Tabela 8 – Valores de pressões e vazões simulados no <i>software</i> Epanet e obtidos pelo modelo de calibração implementado com demanda aleatória.....	113
Tabela 9 – Valores de pressões e vazões simulados no <i>software</i> Epanet e obtidos pelo modelo de calibração implementado com demanda dirigida por pressão.....	114
Tabela 10 – Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de calibração proposto por Silva (2003) para três diferentes populações aleatórias.....	115
Tabela 11 – Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de calibração implementado com demanda aleatória para duas diferentes populações aleatórias.....	115
Tabela 12 – Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de calibração implementado com a demanda dirigida por pressão para quatro diferentes populações aleatórias.....	116
Tabela 13 – Comparação de valores de demanda obtidos pelo modelo de calibração implementado com a demanda aleatória para duas diferentes populações aleatórias..	116
Tabela 14 – Comparação de valores de demanda obtidos pelo modelo de calibração implementado com a demanda dirigida por pressão para quatro diferentes populações aleatórias.....	116
Tabela 15 – Dados da rede em estudo.....	177
Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG).....	185
Tabela 17 – Dados de pressão dos nós monitorados no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG).....	191
Tabela 18 – Valores e horários das pressões mínimas, médias e máximas no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG).....	192
Tabela 19 – Dados de vazão na entrada da rede monitorados no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG).....	194
Tabela 20 – Valores e horários das vazões mínimas, médias e máximas no dia 09 de outubro de 2014 na entrada do setor de Cambuí (MG).....	194
Tabela 21 – Propriedades dos nós da rede hipotética.....	195
Tabela 22 – Propriedades dos trechos da rede hipotética.....	195

Tabela 23 – Valores de pressão e vazão simulados no <i>software</i> Epanet para a rede hipotética	195
Tabela 24 – Valores de pressão e vazão observados para a rede real do setor de “Monte Carlo”	197

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Rede de distribuição de água do setor de Cambuí (MG): Bairros Água Branca, Vale do Sol, Vale das Montanhas, Vila Mariana e Vale das Rosas.....	175
ANEXO B – Localização dos nós na rede de distribuição do setor de Cambuí (MG): Bairros Água Branca, Vale do Sol, Vale das Montanhas, Vila Mariana e Vale das Rosas	176
ANEXO C – Informações fornecidas pelo SAAE do município de Cambuí (MG).....	177
ANEXO D – Relatório da estação geodésia utilizado como base e fornecido pela empresa Geotec – Minas Sondagens e Serviços Ltda.	183
ANEXO E – Dados obtidos nas campanhas de campo à Cambuí (MG) em 2014.....	185
ANEXO F – Informações referentes a rede hipotética.....	195
ANEXO G – Dados do setor de rede real “Monte Carlos” obtidos pelo trabalho de Silva (2003)	196

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnica
AG	Algoritmo Genético
AGs	Algoritmos Genéticos
ANA	Agência Nacional de Águas
B1	Bomba Meganorm kbs 20-50
B2	Bomba Meganorm kbs 20-50
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DPPLOGGER	<i>Software</i> do Equipamento Data Logger
EEA	Estação de Elevatória de Água
EPANET	<i>Software do Environmental Protection Agency</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
FINEP	Financiadora Nacional de Estudos e Pesquisa
FºFº	Ferro Fundido
GEOTEC	Minas Sondagens e Serviços Ltda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MIGHA	Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo
MINLP	Modelo de Programação Não-Linear Inteira Mista
MIT	<i>Massachussettes Institute of Technology</i>
MLP	<i>MultiLayer Perceptrons</i>
MSHDP	Modelos de Simulação Hidráulica Dirigidos pela Pressão
NGER	Número de Gerações
NPOP	Número de População
NUMMARH	Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos
OP	Ordem de Preferencia
PLC	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PVC	Cloreto de Polivinila
R3	Reservatório
R4	Reservatório
RNA	Rede Neural Artificial

SAAE	Sistema Autônomo de Água e Esgoto
SAM	Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
SNIS	Sistema Nacional em Informação sobre Saneamento Básico
SRS	<i>Stochastic Remainder Sampling</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
UFPA	Universidade Federal do Pará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
WRc	<i>Water Research Centre - UK</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Coefficiente de Hazen-Williams (adimensional)
c	Número de condições de demanda representando horários de consumo máximo, médio e mínimo
d_i	Pré-disposição ao consumo (demanda requerida) no nó i
H_i	Carga hidráulica atuante no nó i
H_i^{des}	Carga hidráulicamente mínima desejada no nó i
H_i^{min}	Carga hidráulica mínima no nó i
M	Conjunto de pontos de observação de valores de vazão
N	Conjunto de pontos de observação de valores de pressão
P	Carga de pressão (mca)
P_m	Probabilidade de mutação
$Q_{d,i}$	Vazão disponibilizada para consumo
Z_i	Valor encontrado pelo modelo de calibração para a variável de decisão ou de estado i
Z_i^*	Valor real de i
w_H	Peso atribuído ao desvio de pressão
w_Q	Peso atribuído ao desvio de vazão
ρ_i	Fator que varia de acordo com a pressão

Sumário

RESUMO	7
1. INTRODUÇÃO	22
2. OBJETIVOS.....	24
2.1. Objetivos Gerais	24
2.2. Objetivos Específicos	24
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1. Operação dos sistemas de abastecimento de água	25
3.2. Calibração de modelos de Redes de Distribuição de Água	29
3.3. Modelos Matemáticos de Previsão de Demanda	34
3.4. Algoritmos Genéticos	39
3.4.1. Representação das Soluções	43
3.4.2. Função Objetivo	43
3.4.3. Operadores Genéticos.....	44
3.4.4. Critérios de Parada.....	47
3.4.5. Aplicação de AGs para otimização de Sistemas de Distribuição de Água	47
4. MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1. Etapas do projeto em estudo	52
4.2. Caracterização da área de estudo	54
4.2.1. Informações do município do setor estudado	54
4.2.2. Companhia de abastecimento de água de Cambuí (MG) - SAAE	55
4.2.3. Informações de projeto do sistema de distribuição de água em Cambuí (MG)	56
4.3. Treinamentos com equipamentos e dados iniciais para campanha de campo ..	67
4.3.1. Equipamentos	67
4.3.2. Delimitação dos nós na rede de distribuição de água do setor	71
4.4. Campanhas de campo em sistemas de escala real	73
4.4.1. Campanha de campo topográfica	73
4.4.2. Escolha dos pontos de monitoramento de pressão e vazão	74
4.4.3. Medidas de pressão e vazão.....	77
4.4.4. Cálculo do consumo nodal	80

4.5.	Redes usadas nos testes teóricos	83
4.5.1.	Rede hipotética	83
4.5.2.	Rede real do setor “Monte Carlo”	84
4.6.	Modelo hidráulico empregado no modelo de calibração proposto por Silva (2003)86	
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1.	Resultados experimentais de campo	89
5.2.	Melhoria de rotina computacional proposta por Silva (2003) para calibração de redes de distribuição de água usando algoritmos genéticos.....	96
5.2.1.	Parâmetros dos Algoritmos Genéticos	104
5.2.2.	Análise do modelo de calibração.....	105
5.3.	Implementação de rotina computacional proposta por Silva (2003) a partir dos dados obtidos em Cambuí.....	106
5.4.	Simulações computacionais	108
5.4.1.	Resultados obtidos para a rede hipotética.....	108
5.4.2.	Resultados obtidos para a rede real do setor “Monte Carlo”.....	117
5.4.3.	Resultados obtidos para a rede real do setor de Cambuí.....	132
5.5.	Implementação de dados obtidos com o uso do EPANET	141
5.5.1.	Resultados obtidos para a rede hipotética.....	141
5.5.2.	Resultados obtidos para a rede real do setor “Monte Carlo”.....	147
5.5.3.	Resultados obtidos para a rede real do setor de Cambuí (MG).....	153
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	159
6.1.	Conclusões	159
6.1.1.	Conclusão sobre o aprimoramento de alguns módulos do modelo proposto por Silva (2003).....	159
6.1.2.	Conclusão sobre as aplicações dos modelos de calibração	160
6.2.	Recomendações	164
7.	REFERÊNCIAS	165

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a gestão eficiente dos recursos hídricos é visível e preocupante em todo o mundo, com o desenvolvimento econômico e o crescimento demográfico fica evidente a necessidade da gestão compartilhada destes. No saneamento básico, principalmente no setor de sistemas de distribuição de água potável, ocorrem perdas significantes de energia e de água tratada.

As perdas de água podem ser ocasionadas por diferentes fatores como: pressões elevadas na rede, envelhecimento das tubulações e conexões, ou até mesmo acidentes repentinos.

De acordo com a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2013), as perdas de água (reais e aparentes) no cenário brasileiro são da ordem de 40% nos últimos doze anos e superando 60% em algumas empresas de saneamento. A redução destes índices de perdas resultaria em um bom desempenho de operação das redes de distribuição de água, com redução do volume de água a ser captado e tratado, redução do consumo de energia elétrica, e assim diminuindo os custos financeiros para as companhias de saneamento e evitando a exploração de novos mananciais, que ficam cada vez mais distantes dos centros de consumo.

A energia elétrica envolvida neste tipo de processo esta vinculada as estações de captação de água bruta nos mananciais, nas estações de tratamento de água e nas estações de bombeamento de água tratada. É bastante difícil à contabilização das perdas da energia elétrica que estão envolvidas no funcionamento destes sistemas. Estas se devem principalmente as perdas de água, a falta de monitoramento dos parâmetros que regulam o sistema, a equipamentos antigos e ultrapassados, pelas precárias técnicas de operação, manutenção e gerenciamento.

Assim, a dinâmica destes sistemas torna complexa a tarefa dos operadores, já que são inúmeras as variáveis nesta problemática, trazendo a necessidade do monitoramento contínuo e adequado ao porte do sistema para que o emprego de modelos computacionais possa auxiliar a introdução de novas técnicas de operação e gerenciamento das companhias.

Atualmente, alguns trabalhos, assim como este, vêm sendo desenvolvidos empregando a técnica dos algoritmos genéticos objetivando a criação de ferramentas que apontem soluções para a minimização das perdas de água e energia. O algoritmo genético é um artifício que utiliza ferramentas aleatórias na busca da evolução de uma população de soluções. O

funcionamento de um algoritmo genético é inspirado na teoria da seleção natural dos seres vivos.

O trabalho baseia-se no aprimoramento de alguns módulos do modelo proposto por Silva (2003) com a técnica de algoritmo genético, cujo objetivo principal é a calibração da rede de distribuição de água através dos valores ótimos de rugosidades. Foram desenvolvidos e introduzidos o estudo de demanda nodal na tentativa de melhorar o resultado da calibração.

Dentro deste contexto o trabalho foi desenvolvido e aplicações feitas para uma rede teórica e duas redes reais, primeiro para uma rede real estudada também por Silva (2003) e segundo para a rede real do setor da cidade de Cambuí (MG), onde foram realizadas aplicações de calibração para cinco bairros do município (Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas), todos abastecidos pela autarquia do SAAE Cambuí (MG). Para a realização do trabalho foram analisados dados de pressão, vazão e consumo nos sistemas de distribuição de água, obtendo-se a calibração para estes sistemas de distribuição de água em termos das rugosidades absolutas e consumo nodal.

O projeto deste trabalho está vinculado a uma Agência Brasileira de Inovação, Fundo de Financiamento de Estudos de Projetos e Programas – FINEP, onde envolvem seis universidades federais do país, UNIFEI, UFMG, UFMS, UFMT, UFPA e UFRGS.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

- Aprimoramento de modelo de calibração de redes de distribuição de água;
- Aplicação do modelo de calibração em redes de distribuição de água reais e uma hipotética.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos alcançados no trabalho foram os seguintes:

- Reprodução da metodologia de calibração de redes de distribuição de água, através do modelo desenvolvido por Silva (2003) em FORTRAN;
- Implementação do modelo desenvolvido por Silva (2003) em FORTRAN, possibilitando a calibração também através da solução ótima das demandas nodais para setores isolados de redes de distribuição de água;
- Calibração de uma rede hipotética e uma rede real do setor “Monte Carlo” estudada por Silva (2003), empregando o modelo implementado com a com a solução ótima de demandas nodais;
- Calibração da rede real de distribuição de água de um setor da cidade de Cambuí (MG), empregando o modelo proposto por Silva (2003) e o modelo implementado com a solução ótima de demandas nodais;
- Simulação do comportamento hidráulico dos setores de rede de distribuição de água hipotética e reais do setor “Monte Carlo” e do setor de Cambuí (MG) através do *software* EPANET para auxílio nas análises do comportamento das redes em estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Operação dos sistemas de abastecimento de água

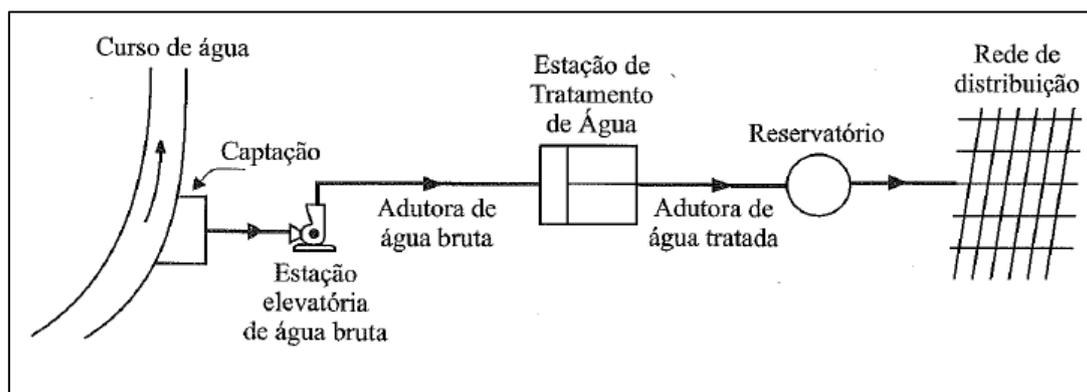
O sistema de abastecimento de água de uma localidade trata-se de um conjunto de estruturas e equipamentos destinados a transportar a água desde sua captação, na forma bruta, chegando ao consumidor final nas condições sanitárias adequadas de tratamento. De acordo com Porto (2006), a concepção geométrica do sistema de abastecimento de água varia de acordo com o porte da cidade a ser abastecida, com as características viárias e topográficas.

As partes constituintes de um sistema de abastecimento de água são definidas como (TSUTIYA, 2006, p.9):

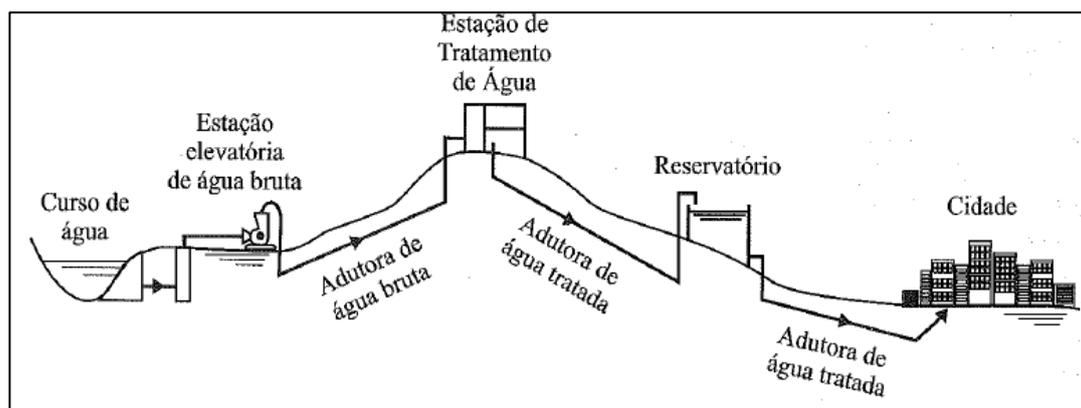
- Manancial: fonte de água superficial ou subterrânea, de onde é captada a água para o abastecimento. A água captada deve atender a quantidade necessária da vazão de projeto e o padrão de qualidade;
- Captação: componentes ligados diretamente ao manancial e destinados a retirada de água do mesmo;
- Estação elevatória de água (EEA): em geral é um conjunto de obras e componentes destinados a recalcar a água para a parte seguinte que constitui o sistema de abastecimento. A EEA pode-se ser encontrada no recalque da água bruta, no recalque da água tratada ou até mesmo na rede de distribuição propondo a elevar a pressão e/ou vazão em pontos críticos, sendo do tipo “booster”.
- Adutora: tubulação que transporta a água para as partes anteriores a rede de distribuição dentro do sistema de abastecimento de água. A adutora não distribui água aos usuários finais.
- Estações de tratamento de água (ETA): é a parte do sistema de abastecimento de água destinada a adequar as características químicas, físicas e biológicas da água bruta para o padrão de potabilidade.
- Reservatório: componente destinado à acumulação da água para posterior distribuição garantindo o atendimento em horários de elevado consumo e regularizando as pressões nas redes de distribuição de água. Os reservatórios podem ser apoiados em elevados, dependendo da topologia da rede de distribuição.

- Rede de distribuição de água potável: conjunto de tubulações, acessórios e outros dispositivos que se destinam a conduzir a água tratada aos pontos de consumo nas condições adequadas de vazão, pressão e qualidade.

Na Figura 1 são exemplificadas as partes constituintes de um sistema de abastecimento de água.



(a)



(b)

Figura 1 – Sistema de abastecimento de água: (a) vista em planta; (b) vista de perfil com reservatório apoiado. (Fonte: TSUTIYA, 2006, p.16)

O procedimento operacional dos sistemas de abastecimento de água é baseado em dados e na descrição do status do sistema. Esses dados são capturados, processados e transmitidos para os tomadores de decisões, que preveem os acontecimentos futuros. Obradovic e Lonsdale (1998) descrevem três níveis para um gerenciamento adequado de sistemas de abastecimento de água, baseado no aspecto temporal:

- Gerenciamento de longo prazo: planejamento de novas fontes de recursos hídricos para o atendimento de demandas futuras;
- Gerenciamento de médio prazo: planejamento do funcionamento do conjunto moto-bomba em horários diferente do horário de ponta, quando as tarifas mais elevadas;
- Gerenciamento de curto prazo: treinamento da equipe técnica e obtenção de equipamentos para redução de perdas de água.

De acordo com Carrijo (2004), existem diferentes maneiras de se operar um sistema de abastecimento de água, variando de acordo com sua dimensão e complexidade, com a experiência da equipe técnica, com a disponibilidade de equipamentos adequados para o comando, monitoramento e para os cálculos e com a disponibilidade de modelos matemáticos para avaliação dos dados. E aspectos com a segurança, a confiabilidade e os custos envolvidos na operação do sistema também são relevantes. Odan (2013) afirma que nas redes de distribuição de água existem variáveis incertas adotadas no projeto, na operação ou na reabilitação, em especial as demandas, as rugosidades e os diâmetros da rede.

Cunha (2009), afirma que há varias formas de realizar a operação dos sistemas de abastecimento de água: o controle manual, o controle automático, o automático programado e o controle centralizado, dentro do ponto de vista que a operação de um sistema é uma sequencia de manobras realizadas nos componentes, tais como: válvulas e bombas.

O controle manual é efetuado por operadores locais que não possuem subsídios suficientes do sistema como um todo. No controle automático basicamente a simplicidade do controle manual é mantida, mas o operador passa a ser dispositivos, como: boias em reservatórios, pressostatos controlando as estações elevatórias de água, entre outros. O controle automático programado é realizado por Controladores Lógicos Programados (CLPs). E o controle centralizado ocorre com o apoio de uma central de controle, que se fundamenta em informações obtidas via rádio, telefone ou telemetria, para ordenar a operação a equipe local de manobra ou efetuar a manobra através de comandos remotos nos componentes do sistema.

O objetivo, em geral, das companhias de água que operam os sistemas de abastecimento de água é garantir o atendimento dos usuários de maneira permanente e ininterrupta, mas são poucas as empresas que se preocupam em realizar seu trabalho visando a minimização das perdas de água e dos custos elétricos.

Para o aprimoramento da operação dos sistemas é necessário traçar os objetivos a serem alcançados e a definição das regras operacionais, para tanto é preciso ter-se o conhecimento do sistema (topologia e características hidráulicas e mecânicas) e a integração de uma ferramenta com um modelo de otimização. Cunha (2009), afirma que os objetivos a serem alcançados devem reunir distintos segmentos de caráter técnico, econômico, social e político. No âmbito técnico resume-se a minimização dos custos de operação e/ou confiabilidade do sistema. Caso, a demanda e a oferta de água apresentem-se de modo equilibrado o foco se resume a minimização dos custos operacionais. Mas caso a demanda se apresente superior a água produzida, o objetivo volta à minimização dos danos causados pela falha no atendimento.

A fim de desenvolver uma ferramenta flexível e de fácil utilização dos supervisores da operação de sistemas de abastecimento de água, fornecendo um conjunto de regras operacionais, Carrijo (2004) avaliou um modelo computacional concebido de três módulos: o módulo de simulação hidráulica, o módulo de otimização multiobjectivo e o módulo de extração das melhores regras operacionais para um sistema. O estudo foi feito em uma parte do sistema de macro distribuição de água potável da cidade de Goiânia, em Goiás. O trabalho basicamente propôs a avaliar dois objetivos: o econômico e de confiabilidade hidráulica, utilizando o simulador hidráulico EPANET2 acoplado ao compilador Borland Builder C++ 5.0. Foram investigados três algoritmos evolucionários multiobjectivos, um não eletista, e dois eletista, com intuito de analisar qual apresentava melhor conjunto de soluções. Após concluir qual o método de otimização multicritério utilizar, o autor definiu o algoritmo de máquina, ainda pouco utilizado para problemas de abastecimento de água, para a escolha e seleção das melhores estratégias. E para concluir o estudo implementou também um método de análise multicriterial chamado ordem de preferencia (OP) utilizado para escolha de um número menor de soluções da frente de Pareto com o objetivo de definir uma estratégia operacional ótima dentre as várias soluções possíveis constantes da frente.

Foi nas últimas décadas que o planejamento da operação dos sistemas de abastecimento de água ganhou destaque e novos estudos sobre modelos matemáticos desenvolvidos para auxiliar nas tomadas de decisões, para que esta fosse feita de forma estruturada. A complexidade dos sistemas cresceu em conjunto com o aumento e diversificação de demanda (CUNHA, 2009).

A Tabela 1 apresenta os índices de perdas de água para cada região do Brasil. E segundo o SNIS (2011), o valor do índice de perdas para todo o conjunto de prestadores de

serviço, 38,8%, manteve-se o mesmo do ano de 2010 não mantendo a tendência de queda do ano de 2009.

Tabela 1 – Índice de perdas na distribuição (indicador IN₀₄₉) dos prestadores de serviços participantes do SNIS¹ em 2011, segundo tipo de prestador de serviços, região geográfica e Brasil

Regiões	Tipos de prestador de serviços					Total
	Regional	Micro-regional	Direito publico	Direito privado	Empresa privada	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte	52,7	-	43,0	-	49,9	49,7
Nordeste	53,1	-	37,9	13,1	-	51,
Sudeste	33,1	52,8	37,7	28,6	32,9	34,4
Sul	36,6	25,0	31,1	51,4	42,6	35,4
Centro-Oeste	30,0	19,3	38,2	59,0	28,9	33,8
Brasil	39,4	49,1	37,0	37,2	38,7	38,8

(Fonte: SNIS, 2011)

3.2. Calibração de modelos de Redes de Distribuição de Água

A calibração consiste na determinação dos parâmetros hidráulicos relevantes para o emprego do modelo de simulação hidráulica, tendo em vista a reprodução realista do comportamento do sistema em análise. De acordo com Walski (1986), dentro de um ponto de vista simplista a calibração pode ser dividida em duas etapas: (1) comparação das pressões e vazões prevista no modelo de simulação hidráulica com as pressões e vazões observadas com o sistema trabalhando dentro das mesmas condições operacionais; (2) ajuste dos dados de entrada no modelo hidráulico a fim de aumentar a consistência dos resultados previstos e observados. O autor afirma que um modelo é considerado calibrado quando apresenta resultados de vazão e pressão com uma precisão razoável, para um conjunto de condições. E que a confiança na precisão dos resultados do modelo deve aumentar com o aumento da gama de condições para o qual o modelo é calibrado.

O sucesso dos modelos de simulação hidráulica das redes de distribuição de água está associado ao processo de calibração (WALSKI, 1983, ORMSBEE, 1989). O processo de calibração auxilia na avaliação do comportamento do sistema sob diferentes condições de carga e no planejamento de expansão da rede de distribuição de água (BHAVE, 1988),

¹ Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

Segundo Colombo (2007), os procedimentos de calibração podem ser classificados em método iterativo, método explícito (analítico ou direto) e método implícito (ou inverso), sendo definidos como:

- Método Iterativo: os parâmetros desconhecidos são testados a cada iteração (ensaio) comparando-se os resultados das pressões e vazões medidas e calculadas pelo modelo hidráulico, sendo o processo baseado em tentativa e erro.
- Método explícito (analítico ou direto): o resultado da calibração é de maneira direta, sem o uso de iterações e empregando um conjunto de equações que descrevam com maior lealdade o comportamento hidráulico da rede.
- Método implícito (ou inverso): consiste na minimização do erro entre os valores simulados e observados, através do procedimento de otimização. A vantagem do método, segundo o autor, é que como se trata de um procedimento geral, é possível calibrar quantas variáveis fizerem-se necessárias. Destacando-se que quanto maior o número de variáveis, maior será o grau de indeterminação do problema.

O método de calibração iterativo foi empregado em trabalhos clássicos como de Walski (1983), Walski (1986) e Bhave (1988).

Walski (1986) estudou o sistema pertencente à cidade de Oneonta, New York. O modelo de simulação continha 271 nós, 307 trechos, 9 válvulas redutoras de pressão e 6 reservatórios. Os grandes consumidores foram identificados e atribuíam-se o uso da água aos nós mais próximos já o restante da água produzida foi considerada distribuída uniforme em todo o sistema. O modelo desenvolvido era calibrado pelo coeficiente C de Hazen-Williams, consistindo em equilibrar o sistema para o uso da água, empregando o método de Newton Raphson para resolução das equações.

O trabalho de Bhave (1988) consistiu na modificação do método proposto por Walski (1983) para o ajuste do coeficiente de rugosidade e demanda nodais, que segundo o autor são parâmetros que apresentam maior imprecisão e geralmente aproximados por tentativa e erro.

Ormsbee e Wood (1986) sugeriram um método explícito para calibração de redes de distribuição de água. O algoritmo é formulado em termos de coeficiente de perda de carga e é desenvolvido a partir das equações básicas de escoamento, para diferentes cenários operacionais, como por exemplo, operação do sistema no horário de pico da demanda.

Outra aplicação do método explícito foi proposta por Boulos e Wood (1990), o algoritmo determina diretamente uma variedade de projeto, operação e parâmetros de

calibração. A solução do problema é baseada nas equações de equilíbrio da rede, e otimizada no sentido de encontrar exatamente as restrições especificadas de pressão e vazão. Sendo as equações adotadas não lineares o método de Newton-Raphson foi utilizado na resolução. O método se mostrou satisfatório para modelagem em tempo real, que exige cálculo rápido e confiável dos parâmetros.

O autor Ormsbee (1989) desenvolveu um método matemático implícito para calibração de redes hidráulicas. O modelo de calibração utiliza um algoritmo de otimização não linear para ajustar parâmetros nas condições de funcionamento estático ou dinâmico. A função objetivo do modelo foi minimizar a diferença entre os valores de pressão e vazão observados e previstos, para diferentes condições de carga. Os melhores resultados foram encontrados empregando-se duas etapas no processo. Na primeira etapa os valores de rugosidade das tubulações foram ajustadas com base nas condições de estado estacionário (perda de carga elevada), já na segunda etapa a distribuição de demanda foi calibrada com base em longo período (perda de carga baixa).

Wu *et al.* (2002) desenvolveram um algoritmo genético implícito para a calibração de redes, contendo três funções objetivos para a avaliar a discrepância entre os valores de pressão e vazão previsto no modelo e observados em campo, sendo: Função (1) minimizar a soma dos quadrados de diferença; Função (2) minimizar a soma das diferenças absolutas; e Função (3) minimizar a diferença máxima absoluta. O algoritmo desenvolvido é capaz de identificar coeficientes de rugosidades das tubulações, demandas nodais e status de válvulas.

Também com o intuito de propor um modelo de calibração de redes de distribuição de água em termos de rugosidades, Silva e Reis (2002), apresentaram um algoritmo genético verificado em um setor da rede de distribuição da cidade de São Carlos (SP), mostrando-se ótimos resultados. No modelo era considerado singularidades nos trechos de tubulações e perdas por vazamento, sendo as rugosidades as variáveis a serem determinadas e as variáveis de ajuste os valores observado de pressão e vazão.

Silva *et al.* (2003) aplicaram o modelo de calibração proposto por Silva e Reis (2002) para outro setor real em São Carlos (SP), Monte Carlo. E Santos (2010), aplicou o modelo de calibração também para um setor na cidade de Itajubá (MG).

Soares (2003) apresentou uma rotina computacional que lança mão do procedimento iterativo de avaliação de perdas por vazamentos e demandas dependentes da pressão. O modelo de calibração de redes de distribuição de água implementa a biblioteca livre GALIB, do Departamento de Engenharia Mecânica do “*Massachusetts Institute of Technology*”-

MIT, com um código escrito em C++ e acoplado ao simulador hidráulico EPANET. Os testes foram realizados em uma rede hipotética empregando técnicas de Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex).

O software desenvolvido por Soares (2003) foi utilizado por Colombo (2007), alimentado com dados coletados campo na cidade de Guariba e Itarapuã. A calibração foi feita visando identificar uma estratégia de redução de perdas.

Para realizar um análise comparativa de calibração de rugosidades absolutas de redes de distribuição de água entre o método iterativo do gradiente hidráulico alternativo (MIGHA) e o AGs, Costa *et al.* (2008) aplicou ambos os métodos para um rede hipotética, simulando o comportamento hidráulico também no software EPANET, e verificou que ambos apresentaram resultados aceitáveis. Embora o AGs tenha realizado o trabalho com um tempo computacional maior, os resultados foram mais precisos.

Borges *et al.* (2008), também realizaram estudos de calibração para o Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo (SAM). Os autores utilizaram o modelo simulador computacional WATERCAD. A calibração empregou os dados reais da operação, adquiridos por um SCADA (sistema de supervisão e controle). Foram ajustados os resultados de pressão observados e simulados.

Um procedimento de otimização para a calibração de modelos hidráulicos empregando AGs é sugerida pelos autores Tabesh, Jamasb e Moeini (2011). No trabalho são investigados valores de coeficiente de Hazen–Williams, demandas nodais e diâmetros das tubulações. Os autores consideraram perdas por vazamento nas equações hidráulicas e quatro cenários de consumo para a calibração, mínimo, normal, máximo e crítico. Para a simulação das perdas por vazamentos no software EPANET são consideradas duas abordagens: (1) considera-se qualquer ponto de vazamento, como um orifício único e a simulação no software EPANET ocorrem primeiramente para demandas nodais fixadas, sendo calculado o coeficiente de descarga em cada nó. Como resultado as pressões máximas e vazamentos máximos aparecem quando o consumo é mínimo no período noturno; (2) um equacionamento é incorporado a equação da continuidade nodal. Para avaliar o modelo os autores empregaram a calibração para uma rede hipotética de 16 trechos, 12 nós e um reservatório de nível fixo. Segundo os autores os resultados da segunda abordagem mostraram-se mais satisfatórios para qualquer um dos cenários estudados, isso porque a demanda é considerada fixa na primeira abordagem, situação que não demonstra a realidade do comportamento hidráulico das redes de distribuição de água.

Ganem *et al.* (2012) realizaram a calibração do software EPANET adotando um configuração experimental de rede em laboratório. A rede contava com medidores de vazão e de pressão que monitoram o sistema. Para a calibração os autores realizaram um conjunto de simulações de modo a ajustar os dados de pressão e vazão obtidos pelo programa aos resultados lidos nos instrumentos instalados. As rugosidades dos trechos e o coeficiente de perda de carga singular foram as variáveis que sofreram modificações

Apresentando uma alternativa de calibração pelo método iterativo das rugosidades absolutas e demandas nodais, Salvino *et al.* (2012), desenvolveram um AGs visando a reabilitação de redes de distribuição de água de grande porte, detecção de vazamentos e obstruções. O algoritmo foi aplicado para parte da rede de distribuição da cidade de Maceió (AL) tendo resultados de diferenças satisfatórios e com baixo tempo computacional, mas para identificação de pontos para reabilitação, os autores apontam a necessidade de mais pontos de medição para produzir bons resultados.

Também utilizando os AGs como método de busca Zaque, Soares e Lima (2012), desenvolveram um modelo matemático para análise hidráulica e diagnóstico de sistemas de distribuição de água com abastecimento intermitente, com auxílio do software EPANET 2. Foram analisadas oito situações para avaliar a influência do número de cenários na calibração, considerando as rugosidades absolutas como variáveis a serem determinadas e perdas por vazamentos, sendo que para cada situação foram realizadas cinco simulações. O modelo apresentou resultados mais satisfatórios para as calibrações com 6 ou 12 cenários.

Nasirian, Maghrebi e Yazdani (2013), desenvolveram um estudo de calibração de pressão em duas redes hipotéticas. O algoritmo é combinado com o método passo-a-passo para a calibração e detecção de perdas de água. Este método inicia-se com a calibração normal para a rede estudada e detecta e elimina nós que não fornecem nenhuma contribuição em perdas de água, em seguida, a rede é re-calibrada. O processo é repetido até que o número de exigências é satisfeitos e os locais exatos de vazamentos identificados. Os resultados mostraram que a detecção de perdas é possível para uma rede na condição estacionária, mas é necessário um grande número de observações de pressão nodal.

Silva *et al.* (2013), também apresentaram um trabalho de calibração empregando o *software* EPANET em conjunto com a biblioteca de otimização *Galib* para uma rede real na cidade de São Lourenço (MG). A variável de decisão adotada era a rugosidade e a função objetivo baseada no erro entre as pressões simuladas e observadas em campo, os resultados mostraram-se bons.

Rocha (2013) realizou uma análise comparativa entre os métodos rede neural artificial RNA, algoritmo genético AG e o método iterativo de gradiente hidráulico alternativo MIGHA na estimativa de rugosidade através da calibração de redes. A metodologia de estimação utilizou dados adquiridos por meio de uma rede hipotética. O MIGHA e os AGs utilizaram uma função objetivo que, em conjunto com o simulador hidráulico EPANET, ajustam sucessivamente as rugosidades até que a função objetivo assumisse um valor mínimo. Enquanto a RNA, treina a rede com dados fornecidos e, com base nisso, estima os valores de rugosidades. No AG o método de calibração foi realizado dez vezes, a cada execução foi adotado uma população de 100 indivíduos e 100 iterações. As probabilidades de cruzamento e mutação foram, respectivamente, 95% e 5%. No MIGHA em cada teste, o programa foi rodado doze vezes, com 100 iterações. O RNA foi do tipo MLP (MultiLayer Perceptrons), empregando a função sigmoide, treinando 5.000 exemplos e validados 500 outros, realizando 1.000.000 iterações em cada exemplo. Os resultados demonstraram que o MIGHA não estima muito bem um conjunto-resposta de rugosidades, mas no que tange a comparação dos valores de pressão observada e calculada o MIGHA apresentou resultados melhores. Os AGs e as RNAs mostraram-se mais precisos no coerente às rugosidades estimadas, porém os valores de pressão observada e calculada apresentaram uma diferença maior.

3.3. Modelos Matemáticos de Previsão de Demanda

O conjunto de regras para um funcionamento pleno e eficiente de qualquer sistema necessita da obtenção de dados e de informações consistentes, assim o modelo de previsão de demanda de um sistema de distribuição de água é uma importante ferramenta para se maximizar a eficiência hidro energética dos mesmos, pois com o conhecimento das demandas os modelos computacionais seriam capazes de prever o comportamento hidráulico do sistema de modo mais realista. De acordo com Borges e Filho (2006)^a, são essenciais principalmente quando se deseja otimizar os custos operacionais como: energia elétrica e vida útil dos equipamentos. As previsões das redes de distribuição podem ser realizadas graças ao desenvolvimento de modelos computacionais matemáticos, que têm possibilitado o surgimento de técnicas avançadas nas questões relacionadas ao projeto e dimensionamento ótimo de redes de distribuição de água, incluindo o problema do controle operacional das perdas físicas.

De acordo com Borges e Filho (2006)^a, os modelos de previsão de demanda de água são utilizados para diminuir as incertezas dos modelos de simulações, que são alimentados por demandas de consumo de água existentes ou por demandas previstas, sendo a base para a programação operacional e tomada de decisões.

Os autores afirmam que os fatores como clima, dia, hora, estação do ano, renda média da região, perdas físicas, tarifas e o tipo de consumo afetam diretamente o consumo de água. E que as demandas previstas de água estão em geral dentro da projeção de consumo do tipo anual, média diária, máxima diária, mínima horária e máxima horária. Os modelos de previsão são baseados em dados históricos e previsões associativas. Nas séries históricas são observadas as variáveis que as influenciam, como: tendência, sazonalidade, variações irregulares e variações randômicas.

Para a previsão de demanda de água diferentes ferramentas podem ser empregadas desde a estatística convencional, como a regressão linear simples ou múltipla e a análise de série temporal, até técnicas de sistemas inteligentes como algoritmo genéticos, redes neurais, lógica de *Fuzzy* entre outros (Borges e Filho^a, 2006).

O horizonte da previsão de demanda de água pode ser de curto ou longo prazo, sendo mais comuns estudos para previsão mensal e anual. Medidas de racionamento ou operação em tempo real estão ligadas a previsão de curto prazo.

A previsão de longo prazo, é comumente adotada em planejamento e operação de recursos hídricos (Wood *et al.*, 2002 apud SILVA *et al.*, 2006) incluindo os sistemas de abastecimento de água (Chiew, *et al.*, 2002 apud SILVA *et al.*, 2006).

De acordo com Santos (2011), o consumo de água tem variações:

- anuais: tendência de crescimento do consumo com o decorrer do tempo, consequência do aumento populacional.
- mensais: variações de consumo ao longo dos meses, devido as mudanças climáticas.
- diárias: variações que ocorrem ao longo do dia.
- horárias: variações que ocorrem nas diversas horas do dia e,
- instantâneas: variações que ocasionadas por acidentes não previstos, como: incêndios, vazamentos, manutenção da rede, entre outros.

Os dados necessários para a previsão podem ser agrupados em duas classes:

- variáveis socioeconômicas: população, renda, custo da energia e características das moradias e,

- variáveis climáticas: chuvas e temperaturas máximas do ar.

As variáveis socioeconômicas causam efeitos de longo prazo sobre as demandas, enquanto as variáveis climáticas influenciam em curto prazo nas variações sazonais. (Miaou, 1990 apud ODAN, 2013).

Estudos sobre modelos de previsão de demanda foram realizados por Jain, Varshiney e Joshi (2001) na cidade de Kanpur, na Índia. O modelo de curto prazo baseou-se em variáveis climáticas, dados de chuva e temperatura máxima do ar, em conjunto com dados de consumo. Os autores desenvolveram seis modelos diferentes de redes neurais artificiais, cinco modelos de regressão e dois de séries temporais. Segundo os autores foi comprovada uma eficiência maior dos modelos de redes neurais artificiais quando comparados com os demais. Os dados de entrada do estudo foram demanda de água da semana, temperatura média máxima da semana e precipitação, confirmando a correlação entre a variação de temperatura e chuva com a demanda de água, sendo impulsionado pela temperatura e interrompido pela ocorrência de chuvas.

Borges e Filho (2006)^b desenvolveram um trabalho de integração de um modelo previsão de demanda a um modelo de simulador em tempo real no sistema adutor metropolitano de São Paulo. O modelo de previsão de demanda de água foi baseado na Série de Fourier, resultando em demandas previstas para as próximas 24 horas do modelo de operação. Os resultados confirmaram os ganhos operacionais, aumentando a agilidade e confiança no processamento de dados e assim atendendo a complexidade do sistema.

Também na região metropolitana de São Paulo, Santos (2011) utilizou a ferramenta de rede neural artificial para estimar a previsão de demanda de água em sistemas de distribuição de água, as análises foram baseadas em dados de consumo, dados climatológicos e socioambientais no período de 2001 a 2005. O emprego do método proposto foi satisfatório.

Em 2011, Qi e Chang aplicaram a técnica de equações de regressão para previsão de demanda para o estado de Manatee County, na Flórida, no período de 2003 a 2009. O modelo dinâmico foi baseado na em dois estimadores macroeconômicos: taxa de desemprego e renda média anual. Estes dados foram a fonte para obtenção do consumo per capita no local. A validação do modelo foi feita através dos dados de consumo real da população e mostrou-se bem sucedido. Segundo os autores o modelo permite estimar e prever a demanda futura de água sob o impacto da mudança macroeconômica.

Odan e Reis (2012) realizaram estudos sobre a previsão da demanda de água no sistema de distribuição de água na cidade de Araraquara, São Paulo. O estudo apoiou-se na

comparação de diferentes modelos de rede neural artificial. Os modelos de redes neurais artificiais testadas foram baseados nas redes neurais híbridas, que consistia em modelar a diferença entre a série de *Fourier* e os dados de consumo observados. O modelo considerou não apenas variáveis meteorológicas, mas também a sazonalidade encontrada na série histórica. Neste trabalho, as estimativas foram feitas 24 horas antes de cada intervalo de tempo, cujos valores eram utilizados para executar a operação de uma rede de água para as próximas 24 horas. O modelo de previsão utilizado produziu resultados promissores.

Odan (2013) afirma que atualmente, as técnicas das redes neurais artificiais têm sido apontadas como uma ferramenta eficiente para a modelagem e previsão da demanda de água.

De acordo com Sarker, Trinidad e Imteaz (2013) a modelagem de demanda de água é uma questão importante na atual situação de racionamento do uso da água em Melbourne, na Austrália. O governo vem traçando estratégias para garantir o abastecimento de água para os próximos 50 anos.

Os autores reconhece a importância de incorporar nos modelos de previsões de demanda os níveis de temperatura e precipitação, mas são poucos os trabalhos que detêm esta informação. No trabalho do autor, os dados são baseados no consumo total diário de água, na temperatura máxima diária e na precipitação diária coletados no período de janeiro 1980 a dezembro de 2009. Os resultados mostram que para a temperatura o limite na região é de $15,53^{\circ}$, nota-se que quando a temperatura é superior a este limite o consumo de água aumenta à medida que a temperatura aumenta, mas abaixo deste valor o consumo parece ser independente da temperatura e o aumento do consumo pode ser então atribuído ao aumento da população ou a outros fatores. Para a precipitação, o consumo de água aumenta à medida que a precipitação diminui, mas acima do limite de 4,08 mm para a região as chuvas não vão mais contribuir para a redução do consumo. Segundo Sarker, Trinidad e Imteaz (2013) o estudo pode ser uma ferramenta valiosa na melhoria da previsão da demanda de água em centros urbanos.

Na literatura também são encontrados o emprego de modelos de simulação hidráulica dirigido pela pressão (MSHDP), adotando diferentes relações entre demanda e as respectivas pressões de serviço. Destacam-se os seguintes autores nesta linha de pesquisa Fujiwara e Li (1998), Martínez, Conejos e Vercher (1999), Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), Tabesh, Jamasb e Moeini (2011). Nestes modelos são consideradas as máximas relações entre demanda efetivamente atendida e a demanda potencial no nó i , dado por ρ_i . Onde ρ_i é um fator que varia de acordo com Figura 2, para cada uma das metodologias.

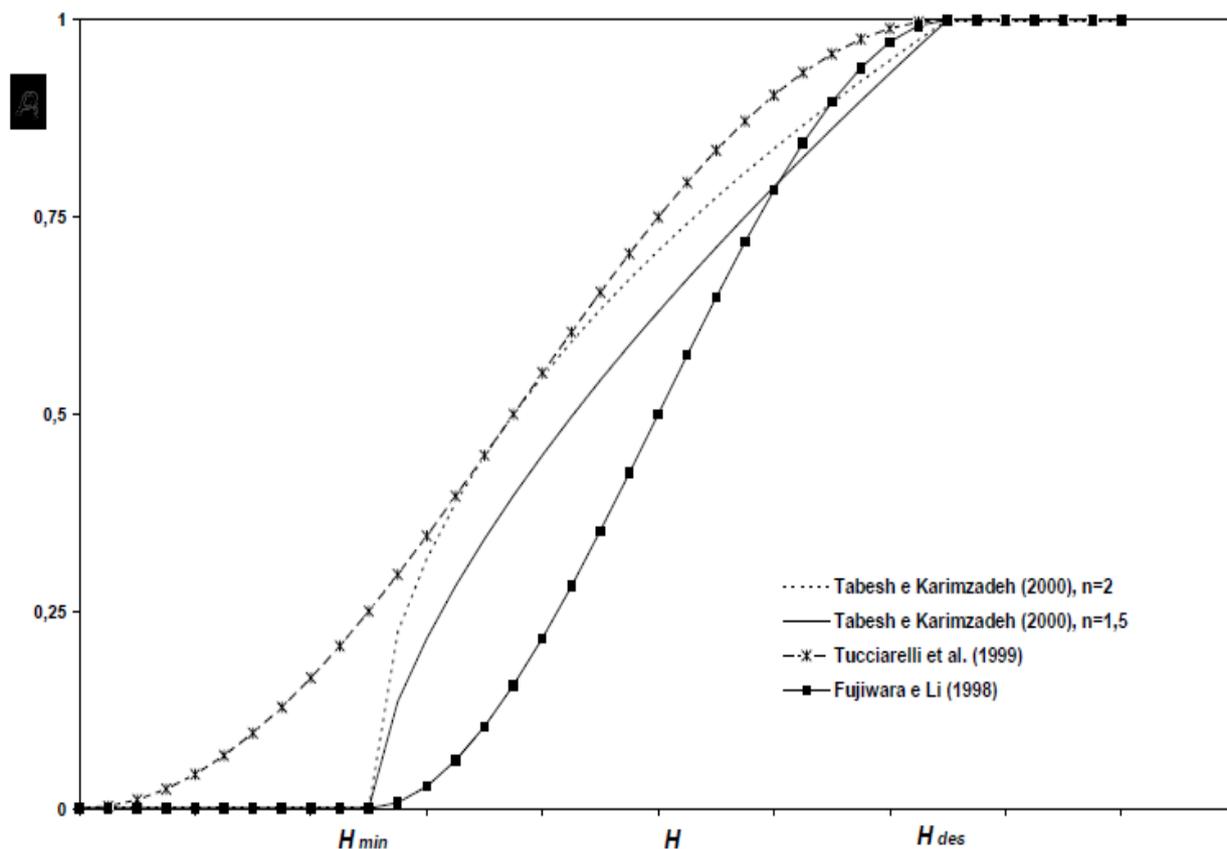


Figura 2 – Variação do fator ρ_i para os modelos Pressão x Demanda. (Fonte: SOARES, 2003)

Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), aplicaram o modelo de demanda no processo de calibração de uma rede de distribuição de água, propondo um modelo pressão x demanda senoidal, apresentando a seguinte relação:

$$Q_{d,i} = d_i \quad \text{se } H_i \geq H_i^{des} \quad \text{Equação (3.1)}$$

$$Q_{d,i} = d_i \cdot \text{sen}^2 \left[\frac{H_i}{2 \cdot H_i^{des}} \right] \quad \text{se } H_i^{min} < H_i < H_i^{des} \quad \text{Equação (3.2)}$$

$$Q_{d,i} = 0 \quad \text{se } H_i \leq H_i^{min} \quad \text{Equação (3.3)}$$

Sendo $Q_{d,i}$ a vazão disponibilizada para consumo (demanda efetivamente atendida) e d_i a pré-disposição ao consumo (demanda requerida) no nó i , H_i^{des} a carga hidráulicamente

mínima desejada para suprir integralmente a demanda, H_i é a carga hidráulica atuante e H_i^{min} a carga hidráulica mínima (dependente da topografia e do padrão do consumidor) no nó i .

A seguir é apresentado na Tabela 2 um resumo dos trabalhos citados anteriormente.

Tabela 2 – Resumo dos modelos de Pressão x Demanda

Modelo	$H_i \leq H_i^{min}$	$H_i^{min} < H_i < H_i^{des}$	$H_i \geq H_i^{des}$	Obs.
FUJIWARA e LI (1998)	0	$\frac{(H_i - H_i^{min})^2 \cdot (3 \cdot H_i^{des} - 2 \cdot H_i - H_i^{min})}{(H_i^{des} - H_i^{min})^3}$	1	$H_i^{min} \approx 5m$
MARTÍNEZ, CONEJOS e VERCHER (1999)	0	$K_i (H_i - H_i^{min})^\gamma$	1	$\gamma = 0,5$ (descarga p/ atmosfera) $\gamma = 0,21$ (Valência, Espanha)
TUCCIARELLI, CRIMINISI e TERMINI (1999)	0	$Q_{d,i} = d_i \cdot \text{sen}^2 \left[\frac{H_i}{2 \cdot H_i^{des}} \right]$	1	$H_i^{min} = 0$
TABESH, JAMASB e MOEINI (2011)	0	$\left(\frac{H_i - H_i^{min}}{H_i^{des} - H_i^{min}} \right)^{\frac{1}{n}}$	1	$1,5 \leq n \leq 2$ $H_i^{min} = 5 \text{ a } 6 \text{ m}$

(Fonte: Adaptado de SOARES, 2003)

Observando a Tabela 2 nota-se a diferença entre as constantes adotadas pelos autores nas formulações e na faixa de pressões mínimas e desejáveis para o abastecimento. De acordo com Soares (2003), os parâmetros devem ser ajustados para cada sistema em estudo, precisando, assim, de uma análise mais particularizada.

3.4. Algoritmos Genéticos

De acordo com Soares (2003), os Algoritmos Genéticos (AGs) são apontados como promissores na resolução de problemas não-lineares, tais como os de calibração de redes de distribuição de água.

Esta técnica foi criada e desenvolvida por John Henry Holland e sua equipe nas décadas de 60 e 70, na Universidade de Michigan. A grande diferença proposta por Holland era que os AGs não fossem desenvolvidos com o intuito de solucionar problemas específicos, mas capaz de estudar o fenômeno da adaptação como ele ocorre na natureza e traçar caminhos pelos quais os mecanismos da adaptação natural pudessem ser importados para os sistemas computacionais (Goldberg, 1989 apud SOARES, 2003).

De acordo com a literatura, a publicação do livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems* em 1975, nos Estados Unidos, por John Holland foi o marco dos AGs aplicados na resolução de problemas de engenharia.

Os AGs são métodos de otimização por busca baseados na Teoria da Seleção Natural das Espécies, proposta pelo naturalista Charles Darwin em 1859, a sobrevivência dos mais aptos. Assim, explica-se o fato da terminologia possuir muitos termos da biologia.

Um conjunto possível de soluções para o problema no AG é denominada de população de cromossomos, assim cada uma das populações são chamadas de cromossomo e referidas como *string*. A primeira etapa de um AG é a geração da população inicial de soluções. Durante o processo de otimização cada população é avaliada perante o resultado da função objetivo e recebe um valor, denominado de aptidão (*fitness*). Frequentemente os AGs envolvem três operadores: seleção, cruzador (*crossover*) e mutação, os quais são repetidamente empregados em busca da melhor solução para o problema em questão, na Figura 3 é apresentado o ciclo básico de um AG. A seleção é o mecanismo que escolhe pares para possíveis recombinações, embasado no valor aptidão que cada solução recebeu. O cruzador promove a troca parcial dos elementos entre o par de cromossomos pais, resultando em dois cromossomos filhos. Já a mutação possibilita a introdução de novo material genético às populações. Segundo Soares (2003), a mutação é vista mais como uma forma de recuperação de material genético perdido do que a procura de uma melhor solução.

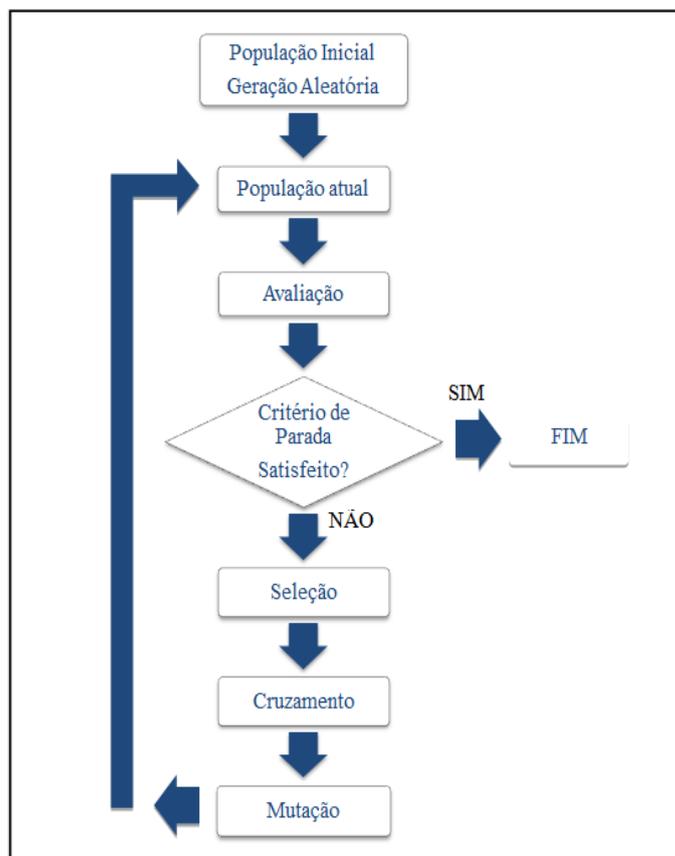


Figura 3 – Ciclo Básico de um Algoritmo Genético.

A seguir está apresentada uma lista com os principais termos encontrados na literatura (Goldberg, 1989 apud SOARES, 2003; Michalewicz e Attia, 1994 apud SOARES, 2003; CUNHA, 2009):

- Cromossomo e genoma: ambos representam a estrutura de dados que codifica uma solução para o problema, isto é, um cromossomo ou um genoma representa um ponto no espaço de busca;
- Gene: é uma característica codificada no cromossomo, ou seja, o elemento no vetor que representa o cromossomo;
- Indivíduo: é um simples membro que compõem a população, sendo representado pelo cromossomo e referente valor da aptidão;
- Genótipo: é a informação presente no cromossomo ou genoma;
- Fenótipo: é o objeto, estrutura ou organismo formado a partir das informações contidas no genótipo, portanto é o cromossomo decodificado;
- Alelo: são os valores que as variáveis de decisão do problema podem admitir;

- Epistasia: interação entre genes do cromossomo, ou seja, quando um valor de gene influencia no valor do outro gene; e

- Elitismo: proposto por DeJong (1975 apud CARRIJO, 2004) o mecanismo possibilita a transferência do melhor cromossomo de uma geração para outra sem alterações, já que existe a chance de o cromossomo ser perdido devido à aplicação dos operadores cruzador e mutação. Cunha (2009), afirma que o AG com elitismo encontra mais rapidamente a solução que o AG sem o elitismo, observando que o AG ocasionalmente encontra máximos locais.

O AG ideal apresenta velocidade, acurácia e robustez, ou seja, consegue apontar rapidamente um ótimo global tendo uma grande variabilidade, mas os AGs reais são diferentes, quando apresentam um significativo tempo de execução baixo e boa acurácia a sua probabilidade de erro é maior e de maneira geral outro tipo de AG real é quando apresentam tempo de execução, variabilidade e robustez medianas, como representado na Figura 4.

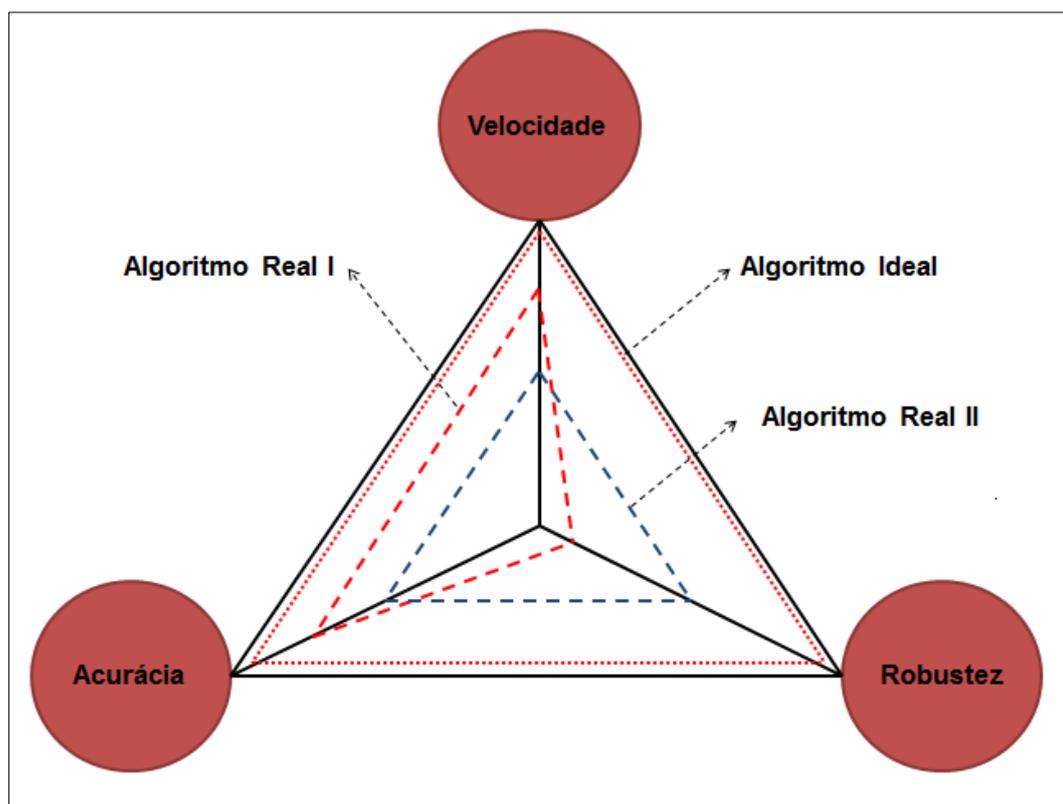


Figura 4 – Propriedades dos algoritmos genéticos. (Fonte: Adaptado de ESSS, 2015)

Quando comparados com as técnicas de busca direta convencionais os Algoritmos Genéticos destacam a não necessidade de conhecimento matemático complexo, facilitando sua implementação; capacidade de otimizar um número extenso de variáveis, operando com

funções objetivo com superfícies complexas e reduzindo a incidência de mínimos e máximos locais; adaptação rápida a computação paralela; demonstram como resultado um conjunto de soluções ótimas e não apenas uma solução; aplicação da hibridização (COLOMBO, 2007).

O autor afirma ainda que os AGs apresentam uma grande desvantagem, mesmo sendo eficazes no julgamento do espaço de soluções, são lentos e oscilam ao redor da solução ótima.

3.4.1. Representação das Soluções

Cada solução (cromossomo) do problema em questão é demonstrada por uma cadeia (*string*) de informações (valores binários ou reais) necessárias para a sua perfeita descrição, sendo constituintes das variáveis de decisão do problema.

A representação binária das soluções é habitualmente empregada em AGs, sendo fácil de utilizar, manusear e teoricamente simples de explorar. Contudo, para problemas com parâmetros contínuos que se almeja trabalhar com uma precisão alta, é preciso realizar o armazenamento de cromossomos longos na memória do computador, sendo os mesmos decodificados para avaliação da função objetivo. Esta particularidade pode fazer com que o AG convirja de forma demorada.

Já na representação real (com ponto flutuante), cromossomos menores são gerados e existe uma facilidade maior na origem de novos operadores.

3.4.2. Função Objetivo

A função objetivo é destinada a conexão entre o AG e o problema em análise. É utilizada para avaliar as soluções para seu emprego nos operadores, seleção e cruzador. A função reconhece como entrada uma cadeia de *bits* e, como saída, um valor real.

Carrijo (2004) salienta a necessidade de um processo para estimar a diferença que um cromossomo esta da possível solução ótima. Este procedimento pode ou não ser exato, em problemas de grande complexidade, técnicas heurísticas poderão ser empregadas.

A função objetivo é considerada normalizada se seus valores variam entre 0 e 1. Assim, se um cromossomo recebe o valor aptidão igual a 1 (máximo valor), este seria a solução ótima, caso contrário, se cromossomo recebesse o valor 0 (mínimo valor), este representaria a pior solução para o caso em estudo.

Entretanto, não é preciso que a função objetivo seja totalmente normalizada, já que é basicamente uma função que compara os cromossomos entre si, sendo os valores relativos de maior importância. Para aumentar a agilidade do operador seleção, é fundamental que a função objetivo não apresente resultados negativos. Outra propriedade relevante dos AGs é que esta ferramenta da busca aceita piorar os resultados da função objetivo para posteriormente melhorar.

3.4.3. Operadores Genéticos

3.4.3.1. Seleção

O mecanismo de seleção acontece após o processo de avaliação das soluções perante a função objetivo. Inspirado no processo de seleção natural dos seres vivos, o AG seleciona para continuar e reproduzir, as soluções com melhor valor aptidão.

Colombo (2007), afirma que os tipos de seleção mais usuais são Roda da Roleta, Ordenamento, Torneio, Uniforme, Amostragem Determinística e *Stochastic Remainder Sampling* (SRS).

O modo da Roda da Roleta, as probabilidades de seleção são calculadas para cada cromossomo segundo a razão de sua aptidão e da aptidão da população acumulada. Posteriormente, ocorre a geração de um número aleatório no intervalo de zero até o valor da aptidão acumulada e, assim, a solução selecionada segue para os operadores cruzador e mutação. Por não aceitar aptidões negativas este método pode apresentar uma desvantagem, a convergência prematura.

A seleção adotando Ordenamento define uma aptidão arbitrária máxima para o primeiro cromossomo da população e uma aptidão arbitrária mínima (frequentemente zero) para o último cromossomo. As aptidões dos demais cromossomos são calculadas interpolando os dois extremos através de uma reta.

Na seleção por Torneio, são escolhidos, aleatoriamente e com probabilidades semelhantes, n cromossomos da população (geralmente, considera-se $n = 2$) comparando os valores de aptidão, sendo o melhor cromossomo selecionado.

A seleção Uniforme não leva em consideração a aptidão do cromossomo, selecionando aleatoriamente os cromossomos a serem cruzados e mutados. A probabilidade de seleção é a mesma para todos os cromossomos.

A seleção por Amostragem Determinística, semelhante a seleção por Roda da Roleta as probabilidades são calculadas. Em seguida, cada probabilidade é multiplicada pelo número de cromossomos da população. Os cromossomos são selecionados baseados no valor da parte inteira do valor calculado, e a população ordenada de acordo com a parte decimal deste mesmo valor. O restante da população é selecionada do topo da lista ordenada. A seguir, selecionam-se uniformemente os cromossomos que sofrerão a ação dos operadores genéticos.

O processo da *Stochastic Remainder Sampling* (SRS) inicia como na Amostragem Determinística e trata as partes fracionárias de modo diferente, sendo consideradas probabilidades. Sendo assim, um cromossomo com aptidão 1,5 terá uma cópia idêntica na população intermediária e uma probabilidade de 50% de existir outra cópia. Posteriormente, selecionam-se uniformemente os cromossomos.

3.4.3.2. Cruzador

O cruzamento ou recombinação é o mecanismo de criação de novas soluções (novos indivíduos filhos) através das soluções atuais (pais). O procedimento ocorre entre dois cromossomos selecionados com uma probabilidade pré-fixada entre 0,6 e 1,0, assim, os cromossomos selecionados têm esta probabilidade de serem empregados no cruzamento.

Existem dois tipos de operadores para a recombinação: os Operadores Convencionais e os Operadores Aritméticos (CUNHA, 2009).

Os Operadores Convencionais são mais conhecidos, sendo do tipo de n pontos e uniforme. No cruzamento de n pontos, os modos acessíveis na biblioteca são o de um ponto e o de dois pontos. A metodologia deste tipo de operador é “seccionar” os cromossomos pais em uma (Figura 5) ou duas (Figura 6) seções, respectivamente, em posições aleatórias. Com as seções recombinadas são geradas dois novos cromossomos (filhos).

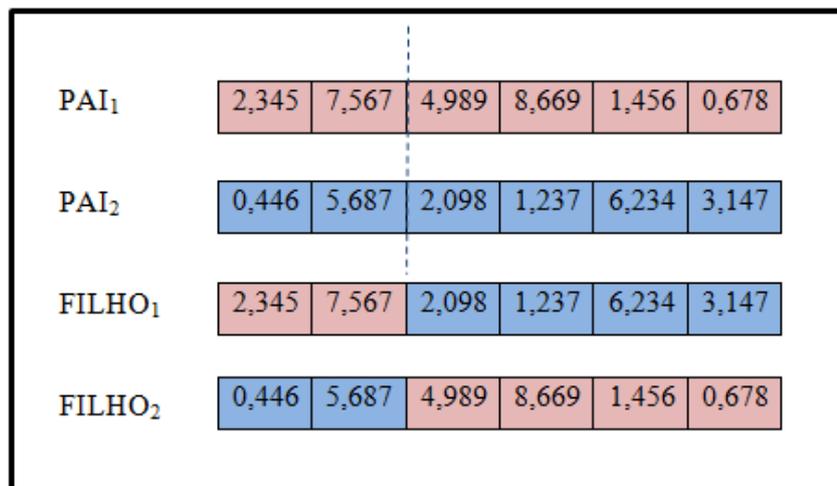


Figura 5 – Troca simples de elementos - Cruzamento de um ponto.

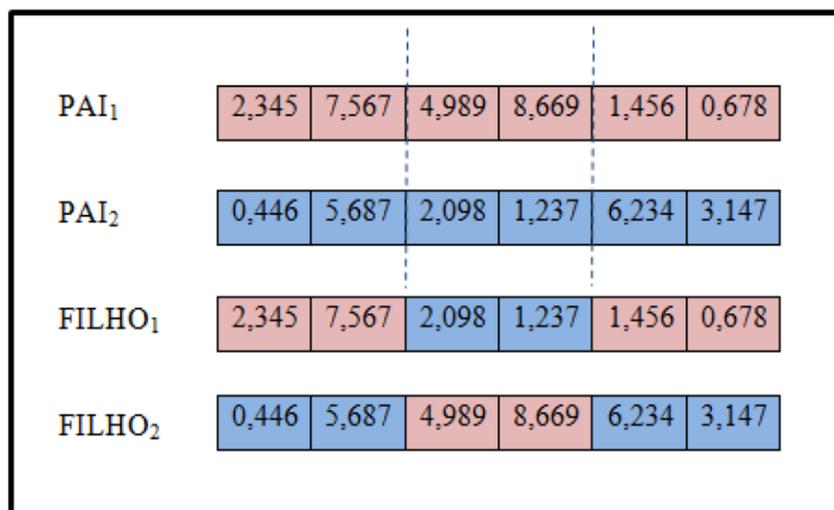


Figura 6 – Troca simples de elementos - Cruzamento de dois pontos.

A funcionalidade dos Operadores Convencionais é boa quando se trata de representação binária, já na representação real é apontada uma desvantagem, devido ao fato de só ocorrer a troca de valores e não a geração de novos dados. Com isso, os Operadores Aritméticos são vistos como a melhor opção para a reprodução real. Neste operador há dois modos de recombinação acessível: Recombinação BLX- α ou Recombinação Mistura (*Blend crossover*) e a Recombinação Aritmética (CUNHA, 2009).

Na Recombinação BLX- α ou mistura, o novo cromossomo é gerado a partir de dois cromossomos (pais) seguindo a seguinte combinação:

$$\text{FILHO} = \text{PAI}_1 + b * (\text{PAI}_2 - \text{PAI}_1) \quad \text{Equação (3.4)}$$

Sendo b um valor variável para cada par de genes e pertencente ao intervalo $(-\alpha, 1+\alpha)$.

Na Recombinação Aritmética uma recombinação linear é efetuada entre os cromossomos pais, gerando dois novos cromossomos filhos da seguinte maneira:

$$\text{FILHO}_1 = b \cdot \text{PAI}_1 + (1 - b) \cdot \text{PAI}_2 \quad \text{Equação (3.5)}$$

$$\text{FILHO}_2 = (1 - b) \cdot \text{PAI}_1 + b \cdot \text{PAI}_2 \quad \text{Equação (3.6)}$$

Estando b variando entre 0 e 1.

3.4.3.3. Mutação

Este operador possibilita a introdução de novo material genético às soluções já existentes, por meio da substituição de genes dos cromossomos, melhorando a diversidade das soluções na população.

Na representação binária a substituição do gene é efetuada *bit a bit* e na representação real através de variável por variável, permitindo que cada *bit* ou gene seja modificado por um baixa taxa de mutação (P_m) entre 0,001 e 0,1 (CUNHA, 2009).

3.4.4. Critérios de Parada

Até que o critério de parada seja satisfeito são efetuadas as avaliações convenientes ao processo, posteriormente à função dos operadores seleção e cruzador.

Inúmeros critérios de parada para AGs são descritos na literatura, tais como: a predeterminação do número de gerações; por um determinado numero de gerações iterar até que não haja um aprimoramento expressivo do cromossomo que recebeu o máximo valor aptidão ou até que a oscilação dos valores aptidões que cada solução recebeu seja considerado insignificante (CARRIJO, 2004).

3.4.5. Aplicação de AGs para otimização de Sistemas de Distribuição de Água

Recentemente foram publicados trabalhos que empregam AGs em modelos de redes de distribuição de água, dentre eles Shamir e Salomons (2008), que aplicaram o AG buscando a otimização do sistema operacional de uma rede de distribuição de água de pequeno porte na

cidade de Haifa, no norte de Israel. A rede estudada abastecia cerca de 60.000 de pessoas e variava em mais de 450 metros de altitude, possuía 867 nós, 987 trechos, 9 reservatórios, 17 bombas em 5 estações de bombeamento e 8 válvulas redutoras de pressão. Para o estudo os autores usaram um modelo reduzido da rede no AG, que reproduziria o seu desempenho ao longo do tempo. O modelo reduzido continha 77 nós, 92 trechos, permanecendo todas as bombas e válvulas, estas foram as variáveis de decisão do AG. O sistema do *software RM-GA*, descrito pelos autores, foi projetado para gerar um plano operacional ideal em um horizonte de 24 horas com previsão de demanda. Foram adotados dados de quantidades diárias de água produzidas em uma estação de bombeamento, do ano de 2004, para produzir um padrão de demanda por hora. O *software* foi também construído para atuar com um sistema *SCADA*, que importava os dados do sistema físico, os horários de funcionamento das bombas e tarifas da energia elétrica. Uma vez encontrada uma rotina de operação ótima, para o modelo reduzido, a validação do resultado era encontrada comparando a semelhança dos níveis dos reservatórios com o modelo completo. E ao empregar à rotina no modelo completo, os valores de pressão nos nós deveriam estar próximos dos valores encontrados no modelo reduzido. A fidelidade do modelo reduzido foi comprovada, uma vez que o custo da energia elétrica dependia apenas do horário de funcionamento das bombas, das tarifas de energia e dos níveis dos reservatórios. Os autores ressaltam que o tempo computacional foi diminuído cerca de 15 vezes com o modelo reduzido e o custo operacional mostrou uma economia na ordem de 10% para a cidade de Haifa.

Ormsbee, Lingireddy e Chase (2009), também empregaram os AGs na tentativa de minimizar o consumo de energia elétrica em um sistema de distribuição de água. Os autores propuseram três formulações matemáticas diferentes, com restrições operacionais, para a programação ideal das bombas. Cada formulação proposta requeria uma solução de um problema altamente não linear, exigindo um modelo numérico externo para avaliar e satisfazer as restrições operacionais. Dois AGs diferentes foram examinados para a resolução do problema.

Os autores F. di Pierro *et al.* (2009), aplicaram os AGs para alcançar o projeto ótimo de redes de distribuição de água de porte médio no sul da Itália e de grande porte no Reino Unido. Os AGs híbridos multi-objetivo de representação binária, resultaram o diâmetro das tubulações a fim de minimizar o custo total da rede. Os AGs híbridos foram comparados com AGs e mostraram-se mais eficientes, resultando em custos menores para as mesmas redes de

distribuição de água. Os autores defendem o uso dos AGs híbrido proposto no trabalho para projetos eficiente de redes de distribuição de água em grande escala.

Costa, Castro e Ramos (2010), apresentaram um algoritmo genético híbrido que permite determinar mais rapidamente estratégias de operação com custos energéticos reduzidos, sendo o objetivo principal encontrar o *status* de funcionamento de bombas. A função objetivo representava o custo da energia consumida pelas bombas do sistema. Os autores propuseram um modelo composto por dois módulos que trabalharam em conjunto, de forma que a rotina computacional hidráulica fosse chamada para simular a cada alternativa gerada pelo AG. O AG híbrido foi formulado através da união do AG simples com um método de correção de soluções, para que a cada iteração, uma melhoria fosse garantida, não somente tendo uma evolução randômica. A análise do modelo foi realizada em um sistema real da cidade de Ourém, em Portugal, composto por 22 captações, 10 estações de tratamento, 36 estações elevatórias e 64 reservatórios. Tanto o AG híbrido quanto o AG simples mostraram resultados que aproveitaram bem as diferenças das tarifas horárias, ligando as bombas nos horários que precediam as tarifas mais elevadas, visando o aumento dos níveis dos reservatórios de forma que, no período de tarifa elevada, o abastecimento se desse por gravidade. O AG híbrido apresentou a vantagens, convergindo 5 vezes mais rápido que o AG simples, os autores acreditam que o modelo é capaz de ser empregado em qualquer rede de distribuição de água, bem como a sua aplicação em tempo real. O *layout* dos modelos são apresentados na Figura 7.

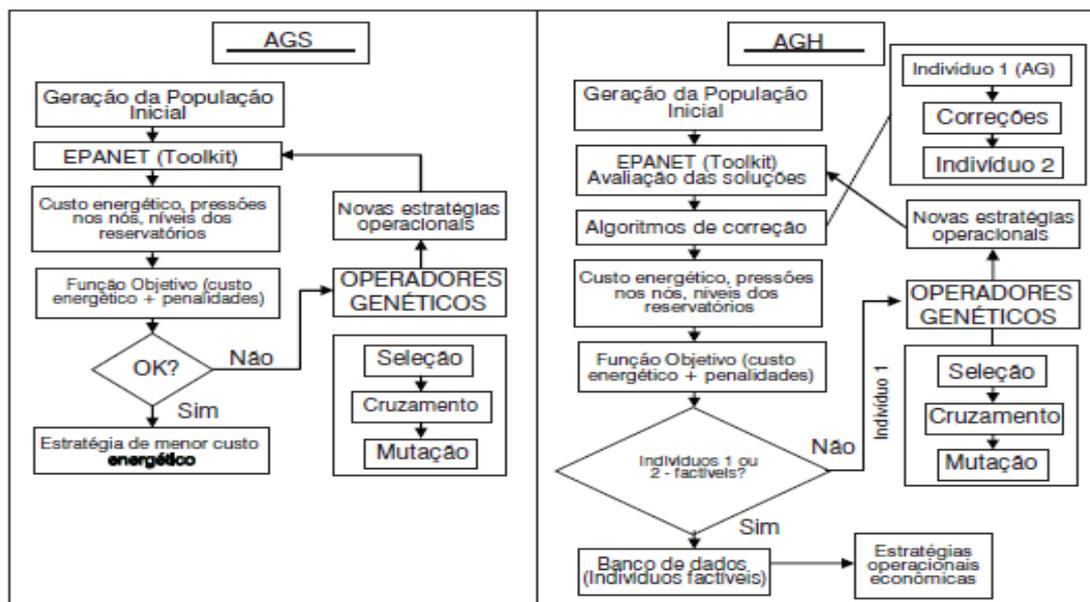


Figura 7 – Fluxograma dos modelos AG simples e AG híbrido. (Fonte: COSTA, CASTRO e RAMOS, 2010)

Tudor e Lavvric (2010), estudaram a otimização de uma rede de distribuição de água integrada a uma estação de tratamento das águas residuais, para maximizar a reutilização da água tratada. O AG escrito em Matlab adotou como função objetivo encontrar a melhor topologia da rede de distribuição de água para garantir o fornecimento necessário de água aos consumidores através maximização de reciclagem da água. O procedimento foi testado em uma rede hipotética e comparado com um caso base, ou seja, uma rede que apenas utiliza a água. Os autores observaram que uma rede integrada pode substituir 55% da água fresca necessária ao abastecimento, fato importante devido à escassez da água doce. Outro importante resultado é com relação aos custos operacionais e da rede, já que redes menores necessitam de menos energia para o bombeamento.

Pérez *et al.* (2011), utilizaram os AGs para auxiliar na detecção de vazamentos e localização de sensores de pressão na rede de distribuição de água da Praça Del Diamant em Barcelona, o método baseia-se na análise das variações de pressão produzido pelo vazamento na rede, utilizando a representação binária. O processo de detecção de vazamento é obtido através da comparação das pressões e vazões reais com as estimadas usando a simulação matemática do modelo de rede. Os autores concluíram que para o setor em estudo a metodologia apresentou bons resultados, mesmo quando havia incertezas em relação à demanda na simulação.

Arsene, Gabrys e Al-Dabass (2012), também empregaram o AG para criar um sistema de apoio à decisão eficiente e eficaz para o monitoramento operacional de sistemas de distribuição de água, envolvendo a detecção de vazamentos na rede. A abordagem para o diagnóstico de vazamentos e outras falhas operacionais apoiaram-se na análise dos padrões de pressão e vazão por sistema especialista *Fuzzy Min-Man Neural*. Para tal, os autores utilizaram três algoritmos numéricos: um algoritmo simulador de pressão e vazão por mínimos quadrados, um algoritmo estimador do estado de demanda e um algoritmo de análise de limite de confiança, para quantificar a incerteza. Os três algoritmos foram baseados na teoria dos grafos.

Já Chen *et al.* (2012) combinaram o uso do AG com o Método Mestre/Escravo no estudo da síntese de processos que envolve redes de distribuição de água, onde processos que utilizam água e operações de tratamento são combinados em uma única rede. Os custos de bombeamento, material das tubulações e as técnicas de tratamento também foram incluídos no modelo de programação não-linear inteira mista (MINLP) discutidos pelos autores, e eles pontam a escassez de estudos sobre sistemas de redes unificados que integram o uso da água e o tratamento de águas residuais. Assim, em uma formulação geral, a função objetivo propunha minimizar os custos anuais de consumo de água doce, das águas residuais tratadas dentro das unidades de tratamento, e de bombeamento e material das tubulações. O AG foi adotado para prevenir que a solução ficasse presa em um ótimo local, sendo a melhor solução usada na próxima iteração. O programa era encerrado quando o número de gerações máximas fosse atingindo ou quando a função objetivo deixasse de melhorar. Os autores concluíram o bom desempenho do modelo proposto.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Etapas do projeto em estudo

O trabalho apresenta três etapas básicas para o seu desenvolvimento, que consistem em contato com a companhia responsável pelo abastecimento do município selecionado para os estudos, campanha de campo para aquisição de dados de pressão e vazão no setor isolado do município em questão e estudos de modelagem matemática e simulações computacionais, como apresenta o fluxograma da Figura 8. Na primeira etapa, após a seleção do município para a realização dos estudos, o contato com a companhia responsável pelo abastecimento é essencial na coleta de informações do setor, tais como: traçado da rede de distribuição, diâmetros, material das tubulações, localização de válvulas, operação do sistema entre outros dados físicos.

Na etapa 2 do projeto, se inicia com o treinamento dos equipamentos que serão utilizados em campo para o monitoramento e coleta dos dados de pressão e vazão no setor de estudo. Os treinamentos foram realizados em laboratórios, com os seguintes equipamentos data loggers de pressão e pulso, ultrassom e DGPS. Tais equipamentos foram utilizados em campo para medidas de pressão, vazão e dados topográficos, respectivamente.

Na terceira e última etapa do projeto, foram realizados os estudos e simulações computacionais com o objetivo de implementação de módulos do modelo de calibração proposto por Silva (2003). Assim, a primeira fase a ser concluída foi o entendimento do AG desenvolvido por Silva (2003), que permite a calibração de redes de distribuição em termos das rugosidades absolutas dos trechos. Posteriormente, iniciou-se os estudos de implementação da calibração das redes de distribuição em termos das rugosidades e também das demandas nodais. A primeira implementação alcançada foi a calibração com as demandas sendo geradas de modo aleatório e em segundo obteve-se a calibração com a demanda nodal dirigida por pressão. E por fim, com os dados de rugosidade e demanda das redes testadas foram realizadas simulações hidráulicas no *software* Epanet, a fim de comparar os resultados obtidos pelos AGs e pelo *software* Epanet empregando as variáveis de decisão (rugosidade e demanda) obtidas em cada um dos modelos de calibração.

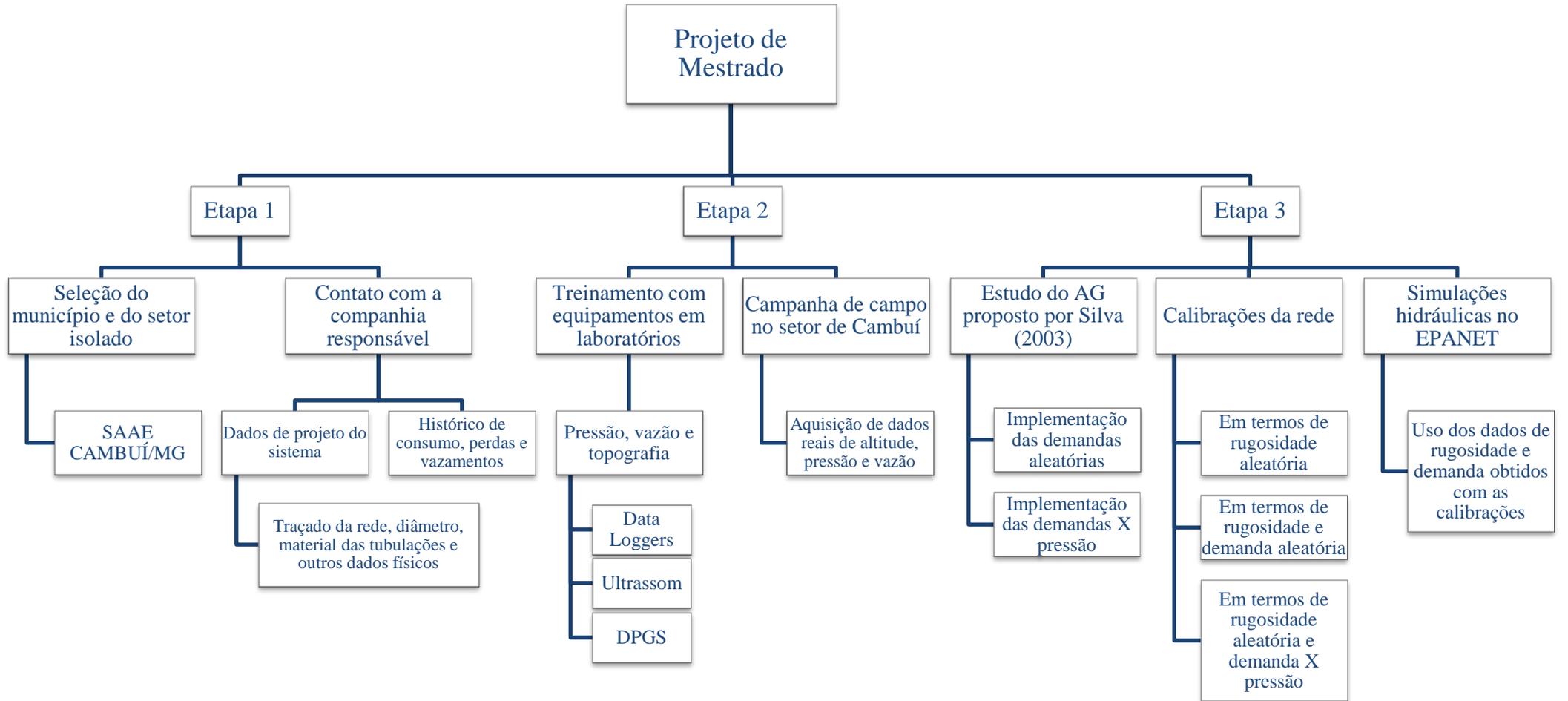


Figura 8 – Fluxograma das etapas do trabalho.

4.2. Caracterização da área de estudo

4.2.1. Informações do município do setor estudado

O setor de redes de distribuição de água estudado pertencem ao município de Cambuí (MG), localizado no Sul de Minas Gerais (Figura 9 e 10), com uma população estimada de 28.123 habitantes (IBGE, 2014). Situada aproximadamente a 110 km do município de Itajubá (MG), passando pelas cidades de Piranguinho, Santa Rita do Sapucaí e Pouso Alegre na BR - 459, é uma cidade situada às margens da rodovia BR 381 - Fernão Dias.

A companhia de água que atende todo o município é o SAAE – Sistema Autônomo de Água e Esgoto.

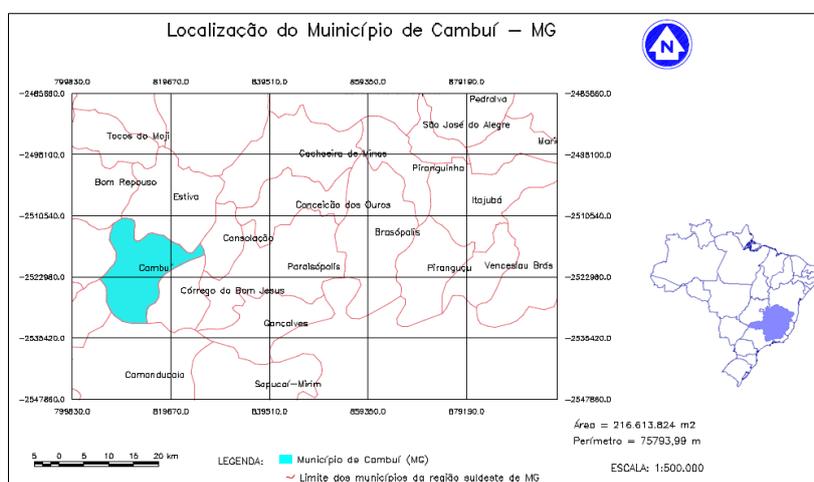


Figura 9 – Localização do município de Cambuí (MG).



Figura 10 – Localização do município pelo Google Earth.

(Fonte: Google Earth, 2014)

A principal motivação da escolha da área de estudo foi o fato de possuir um setor isolado, não apresentando qualquer influência dos demais e ainda por:

- Ser uma região com relevo montanhoso, onde as pressões geralmente trabalham próximo dos limites inferior e superior das faixas recomendadas de pressão;
- Ter facilidade de acesso às informações e aos mapas das redes de distribuição de água do setor;
- Disponibilidade da companhia SAAE de Cambuí (MG) em colaborar no estudo, auxiliando nas instalações para alocação dos equipamentos, no contato com os moradores, no fornecimento de materiais que auxiliaram nas campanhas de campo, entre outras contribuições da companhia.

4.2.2. Companhia de abastecimento de água de Cambuí (MG) - SAAE

A companhia de água da cidade de Cambuí, SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto é uma autarquia municipal, com presença jurídica de direitos públicos, com autonomia financeira e administrativa. O SAAE de Cambuí (MG) foi regulamentado pela Lei municipal nº 1.287 de 06 de dezembro de 1994, com o intuito de resolver problemas relacionados as dificuldades de cumprir a legislação, mantendo a qualidade da água e atendendo todos os consumidores do município de maneira satisfatória (SAAE, 2014a).

As finalidades de sua criação foram atender objetivos como:

“Estudar, projetar e executar diretamente ou mediante contrato com organizações especializadas em engenharia sanitária, as obras relativas à construção, ampliação ou remodelação dos sistemas públicos de abastecimento de água potável, coleta e tratamento de esgotos, buscando a plena satisfação dos usuários e a preservação do meio ambiente.” (SAAE, 2014a)

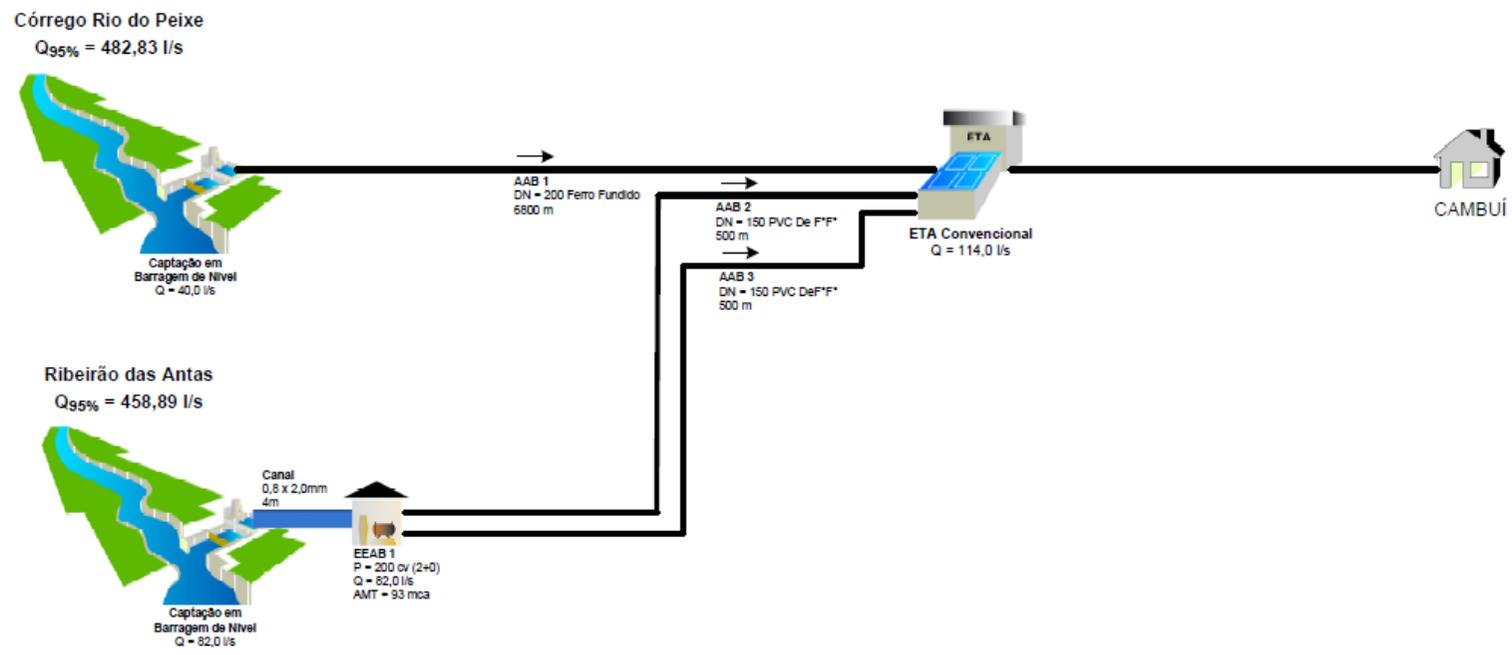
Trazendo melhorias na saúde pública e no gerenciamento dos serviços sanitários, o SAAE de Cambuí (MG) conta atualmente com 58 servidores distribuídos entre administração, elevatória de água bruta, estação de tratamento de água, manutenção do sistema de água e manutenção do sistema de esgoto (SAAE, 2014a).

4.2.3. Informações de projeto do sistema de distribuição de água em Cambuí (MG)

De acordo com o SAAE (2014), o município de Cambuí (MG) é abastecido pela captação de água bruta do Ribeirão das Antas, uma média de captação de 75 l/s, e pela captação na Usina Cachoeira 5 Irmãos no Córrego Rio do Peixe, com média de captação de 35 l/s. O consumo médio de água da cidade é aproximadamente 85 l/s. A água captada passa por tratamento na estação (ETA) antes de ser disponibilizada para os consumidores. O Ribeirão das Antas faz parte da bacia hidrográfica do Rio Grande, tendo sua qualidade da água monitorada pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão de Águas).

Na Figura 11 é apresentado um pequeno croqui do abastecimento do município de Cambuí (MG).

ATLAS DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA



POPULAÇÃO URBANA (hab)	SISTEMA PRODUTOR	TIPOS DE CAPTAÇÃO	SITUAÇÃO	SISTEMA ISOLADO CAMBUÍ			Nº		
<ul style="list-style-type: none"> Bairro/Distrito/Povoado Até 5.000 De 5.000 a 50.000 	<ul style="list-style-type: none"> Adutora Estação Elevatória Estação de Tratamento de Água Dessalinizador 	<ul style="list-style-type: none"> Tratamento Filtros Reservatório Apoiado Reservatório Elevado 	<ul style="list-style-type: none"> Existente Projetado Em Obras 	<ul style="list-style-type: none"> Captação Fio d'Água/Tomada Direta Barragem/ Açude Poço 	<ul style="list-style-type: none"> Bateria de n poços Charantz Carro-pipa 	Município: Cambuí	Estado: MG	Data: 12/04/2010	Nº 0000
<ul style="list-style-type: none"> De 50.000 a 250.000 De 250.000 a 1.000.000 Mais de 1.000.000 									Código
						Fonte: SAAE			

Figura 11 – Croqui do abastecimento do município de Cambuí (MG). (Fonte: ANA, 2015).

4.2.3.1. Setor em estudo

Dentro do setor selecionado encontram-se os bairros Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas, como apresenta a Figura 12.



Figura 12 – Localização do setor analisado.

(Fonte: Google Earth, 2014)

Na Figura 13 é apresentado o diagrama detalhado da rede de distribuição de água que abastece o setor estudado do município de Cambuí (MG).

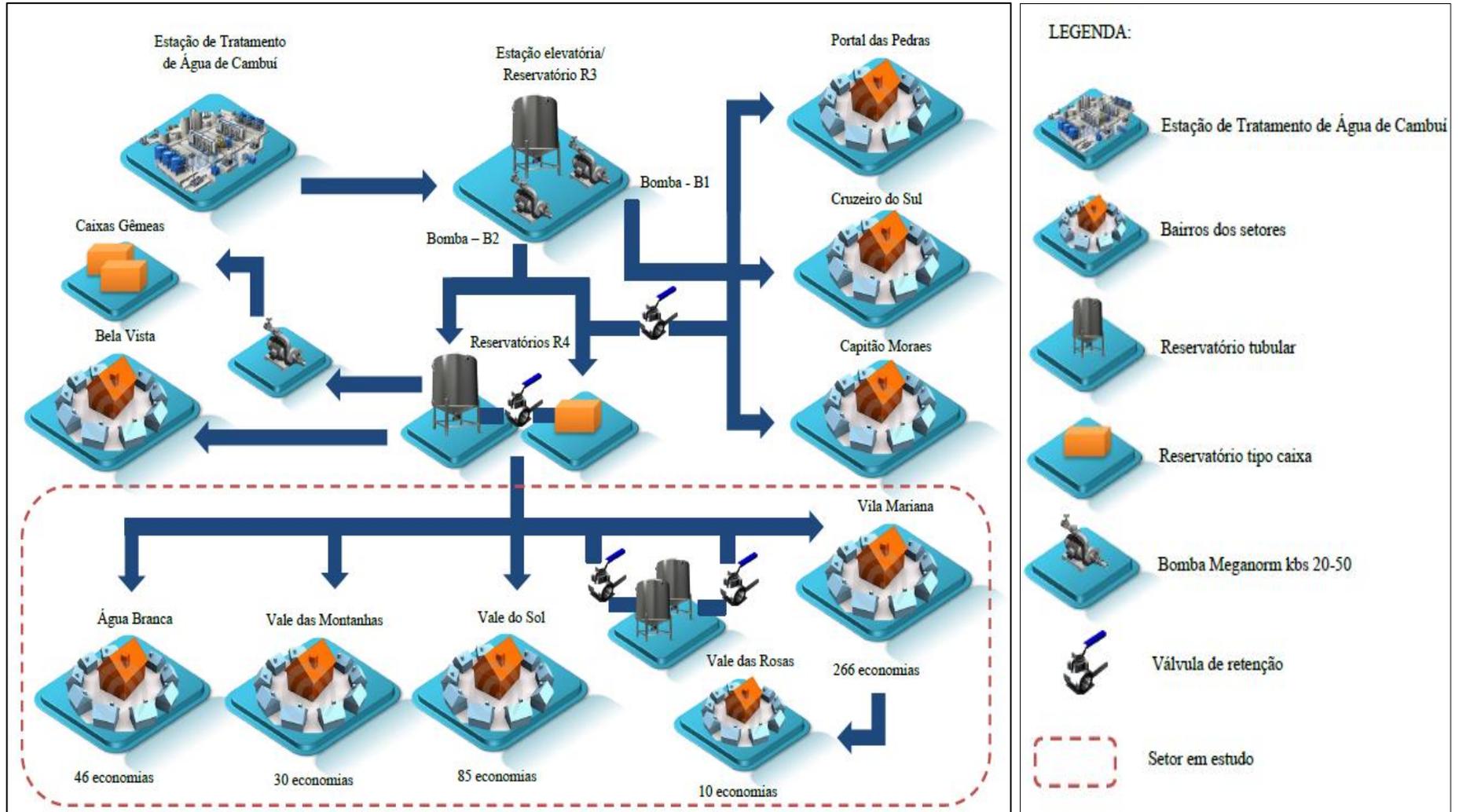


Figura 13 – Diagrama da rede de distribuição de água que abastece o setor estudado.

Após passar pela Estação de Tratamento de Água (ETA) a água que será direcionada para o setor em análise é armazenada em um reservatório de 400 m³ por gravidade, denominado de reservatório R3. Seguindo, a água é bombeada por um conjunto de duas bombas iguais em paralelo (Meganorm kbs 20-50), B1 e B2. Como mostra o diagrama da Figura 13, a bomba B1 abastece os bairros Portal das Pedras, Cruzeiro do Sul e Capitão Moraes. Já a bomba B2 eleva a água a aproximadamente 42 metros de altura para outros dois reservatórios, denominados de R4 e que estão interligados por uma válvula de retenção, sendo que um é uma caixa quadrada de 100 m³, que após atingir seu volume máximo direciona a água para ser reservada no outro reservatório tubular de 50 m³. Vale ressaltar que havendo sobra de água, após o abastecimento dos bairros Portal das Pedras, Cruzeiro do Sul e Capitão Moraes pela bomba B1, esta água é também direcionada para os reservatórios de R4.

Nas Figuras 14 e 15 é possível observar a ETA, o reservatórios R3, o conjunto de bombas que trabalha no sistema e os reservatórios de R4, respectivamente. O funcionamento dos reservatórios de R4 é controlado por sensores, quando o nível máximo dos reservatórios é atingido a bomba B2 em R3 é automaticamente desligada.

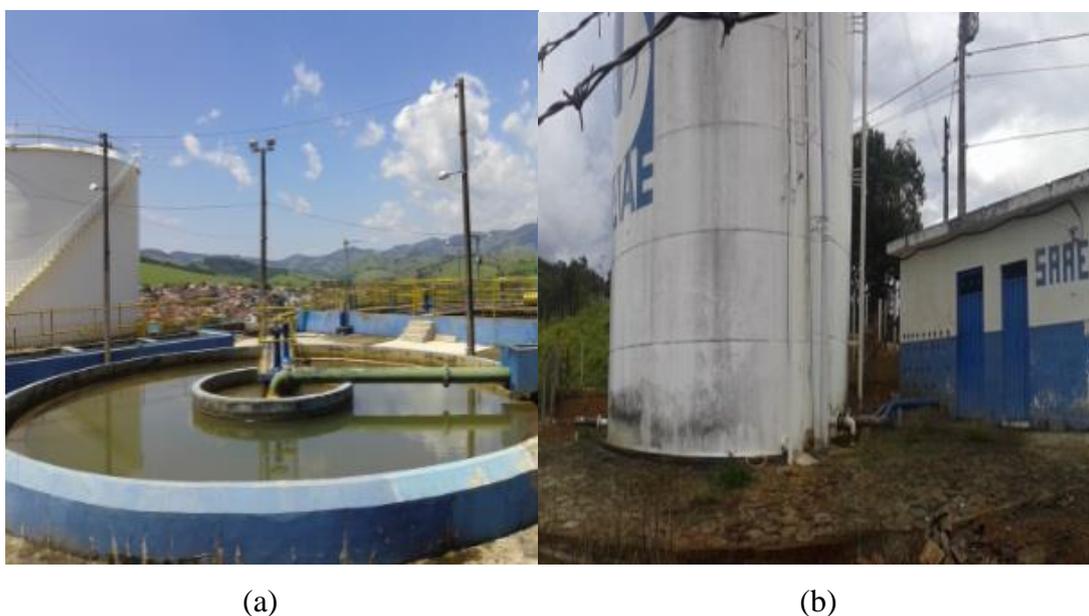


Figura 14 – Componentes do setor em estudo. (a) Estação de tratamento de água (ETA); (b) Reservatório R3;

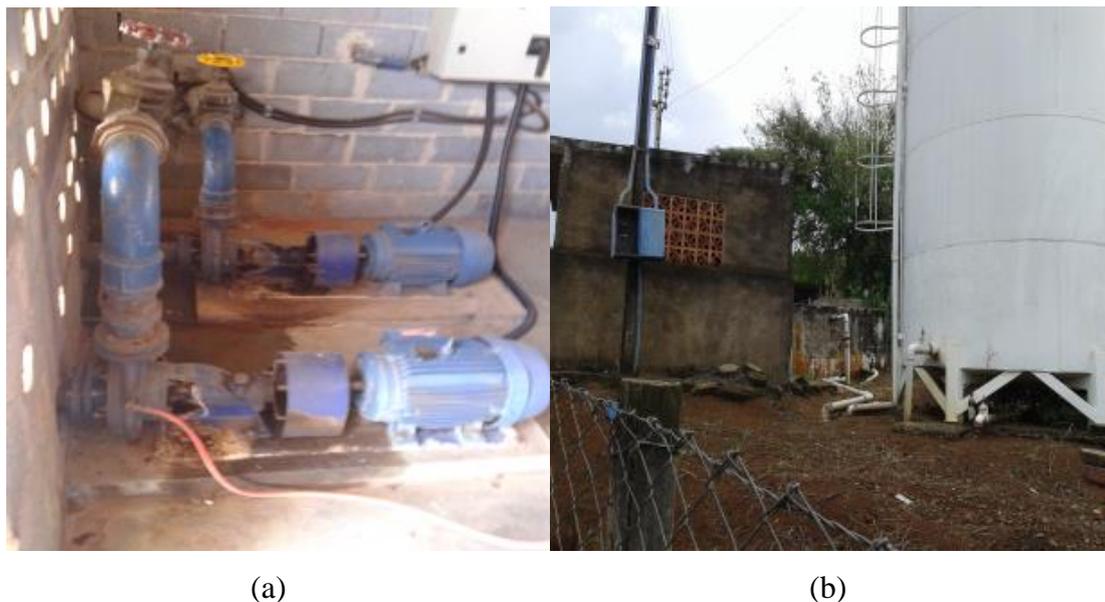


Figura 15 – Componentes do setor em estudo. (a) Conjunto de bombas Meganorm no R3; (b) Reservatórios de R4.

Dos reservatórios de R4 a água irá abastecer por bombeamento as caixas Gêmeas, dois reservatórios de 48 m³, por gravidade o bairro Bela vista e os bairros onde se encontram o setor em estudo, Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas. A Figura 16 apresenta mais detalhadamente as interligações e saídas dos reservatórios de R4.

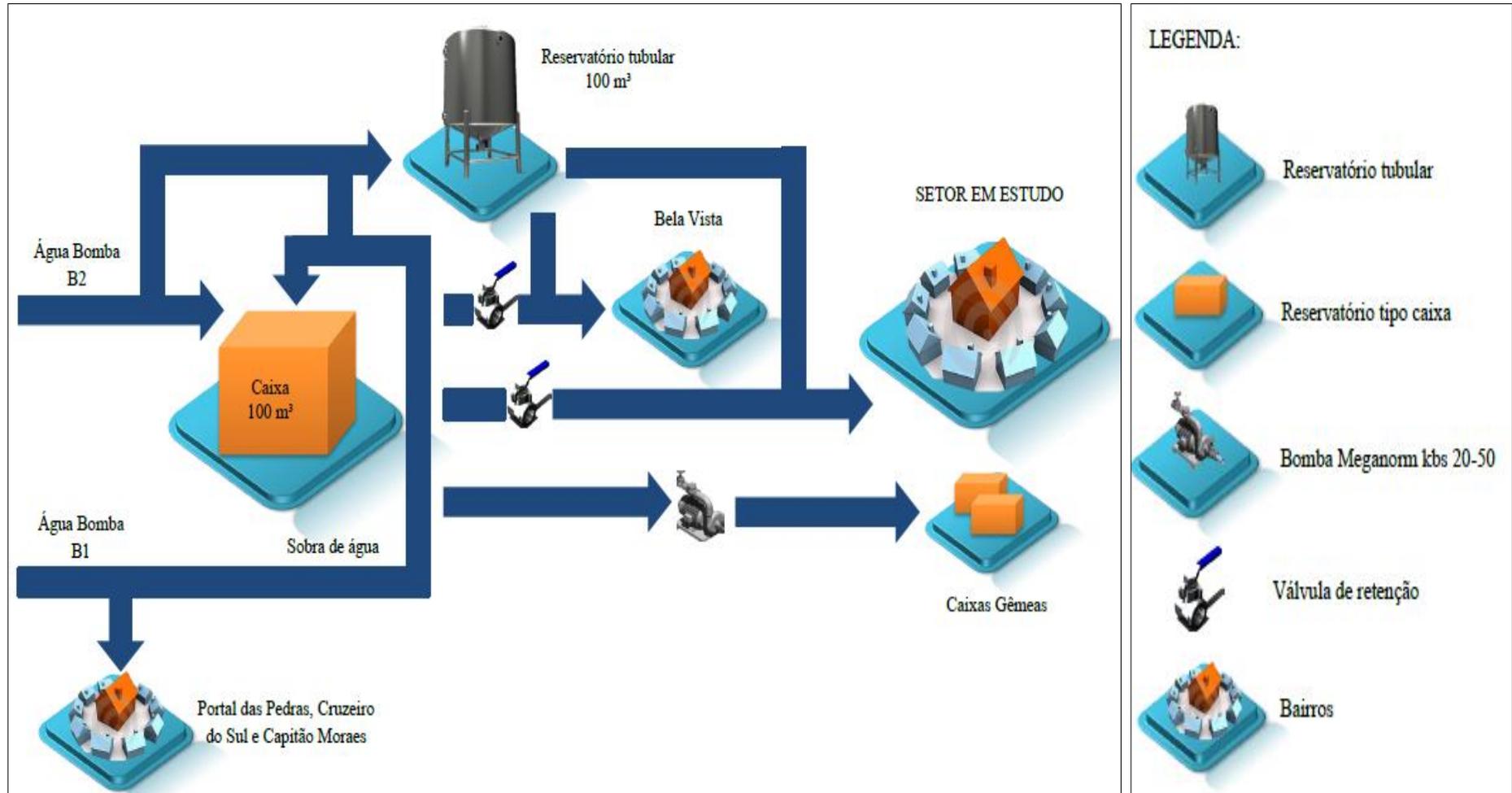


Figura 16 – Diagrama das interligações e saídas dos reservatórios de R4.

Nas Figuras 17, 18 e 19 é possível notar as tubulações da sobra de água que chega ao reservatório tipo caixa do reservatório R4, a tubulação que chega diretamente, após bombeamento da bomba B2, no reservatório tipo caixa do R4 e as tubulações que saem do mesmo para abastecer o bairro Belo Vista, as caixas Gêmeas e o setor de interesse do trabalho, respectivamente.



Figura 17 – Tubulação da sobra de água que chega ao reservatório tipo caixa no R4.



Figura 18 – Tubulação que chega diretamente ao reservatório tipo caixa do R4.

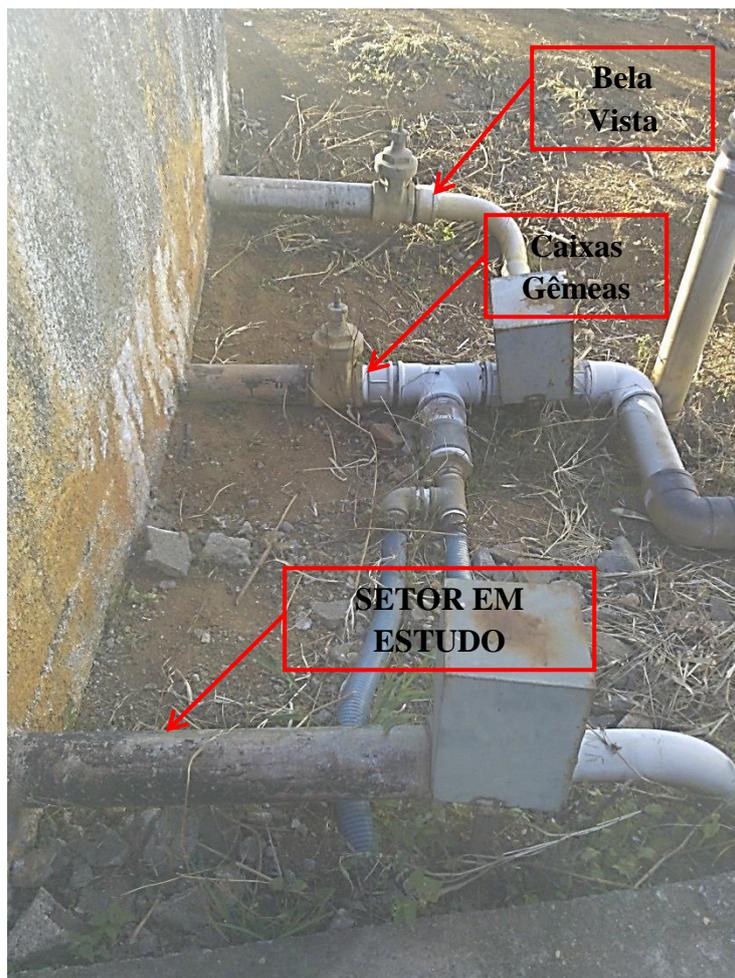


Figura 19 – Tubulações que saem do reservatório tipo caixa do reservatório R4.

Dentro do setor em estudo existem ainda outros dois reservatórios de 50 m³ (Figura 20), situados antes do bairro Vila Mariana que entram em funcionamento nos finais de semana quando o consumo de água é mais intenso.



Figura 20 – Reservatórios de 50 m³ situados antes do bairro Vila Mariana.

A Figura 21 apresenta o traçado da rede de distribuição de água descrita anteriormente.



Figura 21 – Traçado de toda a rede de distribuição de água. (Fonte: Equipe NUMMARH, 2014)

O material das tubulações da rede de distribuição de água, desde reservatório R3 até chegar aos bairros de interesse, é PVC com seus diâmetros variando de 32 a 150 mm, como apresenta a Figura 22, e as tubulações estão instaladas no terço médio das ruas (SAAE, 2014).

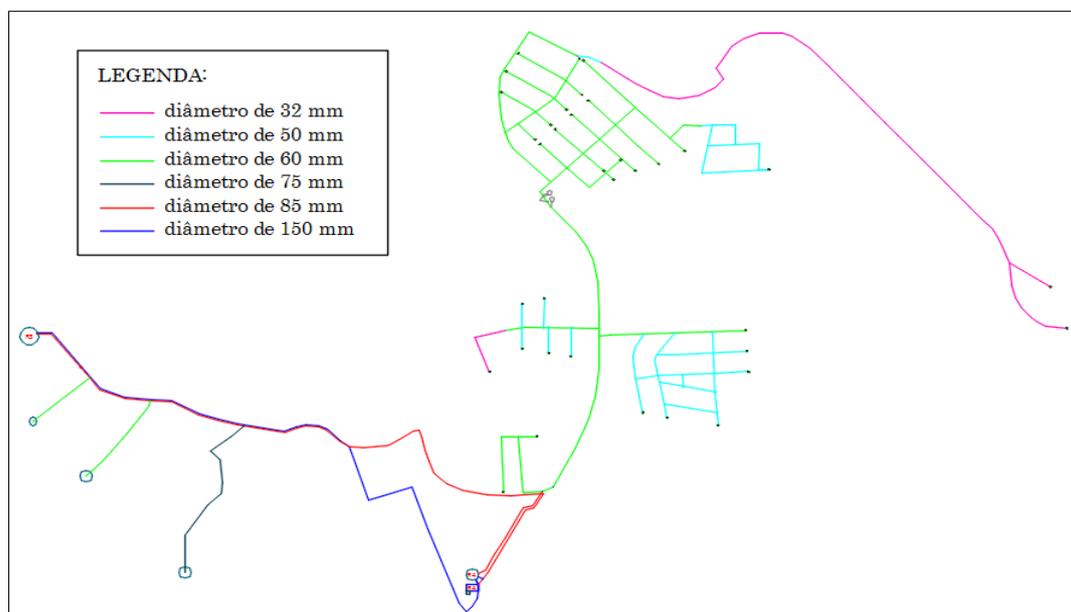


Figura 22 – Diâmetro das tubulações.

De acordo com o SAAE (2014), existem registros para o controle de vazão na rede de distribuição de água do setor em estudo (Ver ANEXO B). Na Tabela 3 é apresentada a localização dos registros e também suas aberturas.

Tabela 3 – Localização dos registros existentes na rede de distribuição de água do setor em estudo

Localização dos registros	Bairro	Situação
Rua João Pimentel, n° 10	Água Branca	Aberto
Rua Guajajaras, esquina com Rua Bento Jacinto	Vale do Sol	30% aberto
Av. João Lopes de Souza, esquina com Rua Bento Jacinto	Vale das Montanhas	30% aberto
Av. Mariana Ramos Ribeiro	Vila Mariana	Aberto
Rua Herve de Campo Vargas (início da rua)	Vila Mariana	Aberto

4.3. Treinamentos com equipamentos e dados iniciais para campanha de campo

4.3.1. Equipamentos

4.3.1.1. Data Logger de pressão e pulso

O data logger de pressão e pulso se destina à medição e monitoramento em tempo real da variação de pressão manométrica nos cavaletes dos consumidores ou na própria tubulação caso exista um registro na mesma. A maleta possui sensor de pressão, coletor de pulsos, circuitos eletrônicos, data logger e display, além do *software* DPPLOGGER utilizado para configuração, leitura e monitoramento dos dados. Na Figura 23 é apresentado o equipamento e a interface do software.

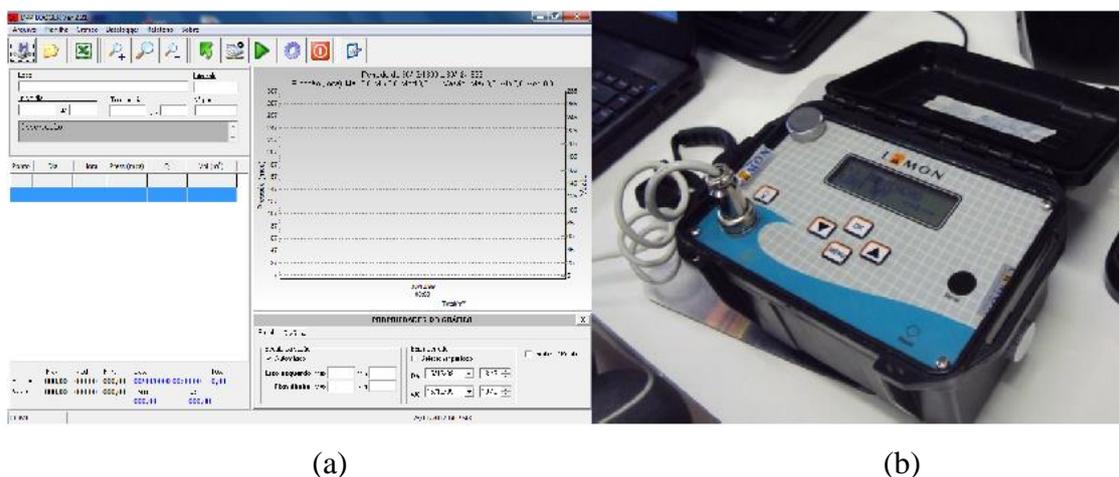


Figura 23 – (a) Interface d software DPPLOGGER; (b) Data Logger de pressão e pulso.

O primeiro procedimento a ser realizado para o treinamento foi à etiquetagem dos loggers e suas respectivas mangueiras facilitando a identificação de possíveis equipamentos com danos. Posteriormente, com o apoio do manual os equipamentos foram configurados para iniciar as medidas junto a um cavalete de um manômetro no laboratório de Estruturas Hidráulicas da UNIFEI, podendo assim verificar a veracidade dos dados medidos (Figura 24 e 25).

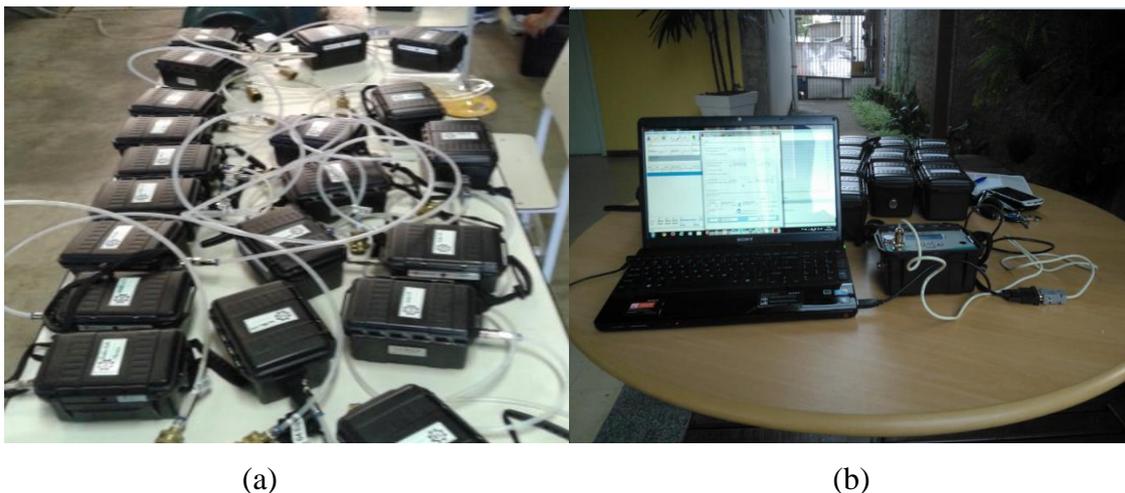


Figura 24 – (a) Etiquetagem dos data loggers e mangueiras; (b) Configuração dos data loggers.



Figura 25 – Obtenção dos dados de pressão junto ao manômetro de pressão.

4.3.1.2. Ultrassom

O ultrassom é um equipamento utilizado para medição de vazão em tempo real. Possui uma maleta com medidor portátil, sensores, gel de acoplamento, haste de posicionamento os sensores com régua graduada, cabos, tiras de tecido para fixação dos sensores, bateria e *software* de operação, como mostra a Figura 26. Entre as informações obtidas estão parâmetros como: vazão média, vazão mínima, vazão máxima, velocidade de escoamento, totalização, índice de qualidade da medida e status do equipamento.



Figura 26 – Maleta do equipamento ultrassom e seus acessórios.

A configuração do equipamento é feita através do seu próprio display, com entrada de dados a respeito da tubulação, por exemplo: espessura, material, diâmetro interno, produto que passa pela tubulação, vazão máxima entre outros. Posteriormente é preciso informar ao equipamento qual o tipo de sensor e qual a configuração utilizada na medição. Finalizando a configuração é possível iniciar-se a instalação dos sensores na tubulação e começar a medição de vazão.

O treinamento foi realizado no laboratório de Estruturas Hidráulicas da UNIFEI, sendo realizados todos os procedimentos e configurações necessárias para o trabalho com o equipamento (Figura 27), a veracidade das medidas foi comprovada com a comparação das medidas feita pelo Venturi no mesmo momento e na mesma tubulação.



(a)

(b)

Figura 27 – (a) Instalação dos sensores na tubulação de ensaio. (b) Obtenção do valor de vazão com o ultrassom.

4.3.1.3. DGPS – Sistema de Posicionamento Global Diferencial

O treinamento com o DGPS foi operado nas dependências da UNIFEI, onde existe um marco normalizado pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Figura 28). O equipamento é composto por dois conjuntos de: GPS – Sistema de Posicionamento Global, antena, haste de 2 metros e bipé com bolha para nivelamento (Figura 29). Um conjunto é denominado base, este fica posicionado no marco georreferenciado. O outro conjunto, denominado móvel, é posicionado nos diferentes pontos que se deseja conhecer os dados de altitude, latitude e longitude.

O equipamento trabalha supondo que todos os pontos estão condicionados aos mesmos erros, podendo este erro ser corrigido através do software de pós-processamento pela correção diferencial.



Figura 28 – Treinamento com DGPS na UNIFEI.

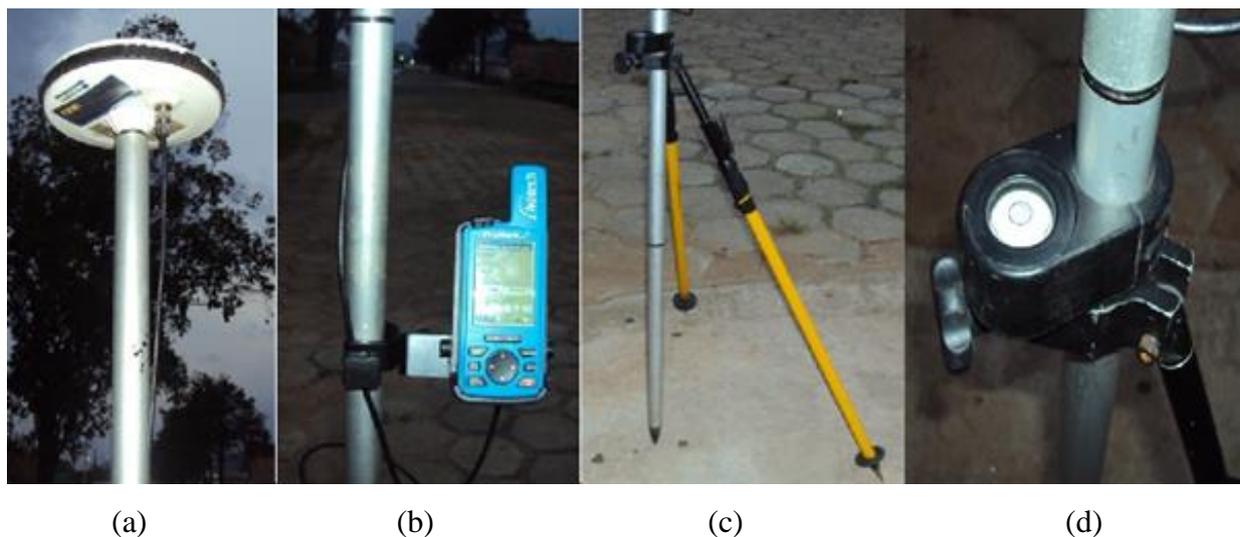


Figura 29 – Partes constituintes do DGPS. (a) antena; (b) GPS – Sistema de Posicionamento Global; (c) bipé; (d) bolha para nivelamento. (Fonte: LAMOGLIA, 2013)

4.3.2. Delimitação dos nós na rede de distribuição de água do setor

Nós são pontos de derivação de vazão e/ou mudança de diâmetro das tubulações. Assim a partir do mapa de traçado da rede de distribuição fornecido pelo SAAE foram localizados tais nós, permitindo-lhes posteriormente atribuir informações que serão utilizadas e trabalhadas na modelagem e simulação hidráulica.

A Figura 30 apresenta os 159 nós determinados no mapa da rede de distribuição de água do setor de interesse, assim como os 166 trechos, o sentido do escoamento e os reservatórios de R4. Na Tabela 15 do ANEXO C são apresentadas as informações dos trechos da rede em estudo.

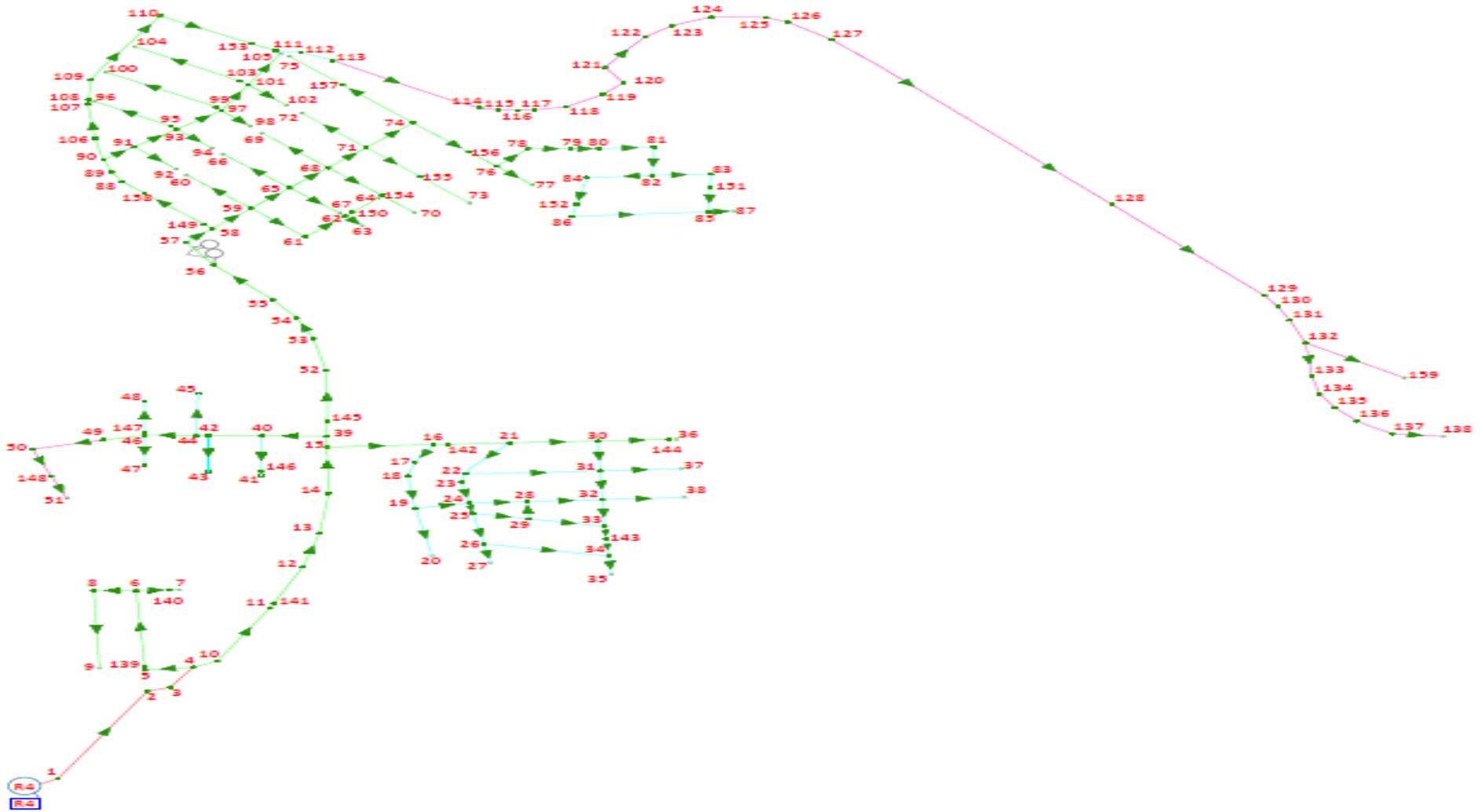


Figura 30 – Setor de interesse da rede de distribuição de água em estudo.

4.4. Campanhas de campo em sistemas de escala real

4.4.1. Campanha de campo topográfica

A obtenção das cotas topográficas dos nós identificados (Figura 30) foi à primeira campanha realizada à Cambuí (MG) pela equipe NUMMARH – Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos.

A equipe utilizou o equipamento DGPS, posicionando o conjunto base no ponto georreferenciado anteriormente pela empresa Geotec – Minas Sondagens e Serviços Ltda (ANEXO D) a aproximadamente 1.016,00 metros de altitude (Figura 31) e através das coordenadas UTM alcançaram-se as coordenadas e altitudes da entrada do setor no reservatório R4 e de todos os nós pré-determinados de modo preciso. A Tabela 16 do ANEXO E apresenta os resultados da campanha, após o processamento dos dados no Laboratório e Geoprocessamento da UNIFEI.

Os dados topográficos dos nós foram destinados à montagem dos arquivos de entrada para as simulações e modelagens hidráulicas, para tanto houve a correção destes dados em relação entre a cota topográfica da rua e a cota topográfica da tubulação da rede de distribuição de água. E ainda auxiliaram na escolha dos pontos de monitoramento de pressão, como veremos adiante.

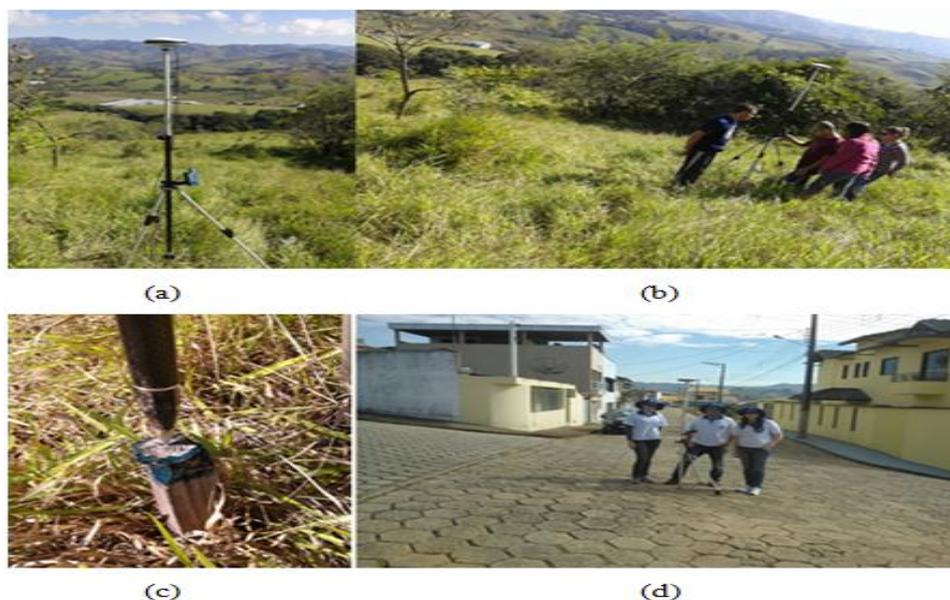


Figura 31 – (a) e (b) Local de posicionamento do conjunto base do DGPS; (c) ponto georreferenciado; (d) exemplificação da obtenção das cotas topográficas pelo conjunto móvel do DGPS.

4.4.2. Escolha dos pontos de monitoramento de pressão e vazão

Silva, Viana e Ribeiro (2013), utilizam um algoritmo genético baseado na teoria da entalpia para determinar pontos ótimos de monitoramento de pressão em uma rede real, na cidade de São Lourenço (MG), aplicando o método desenvolvido por Schaetzen (2000), segundo o qual a amostragem ótima dos pontos deve obedecer ao critério de maximização da sensibilidade das pressões às rugosidades dos trechos e a maximização de uma função de entropia.

Diante do conhecimento do autor os pontos de monitoramento de pressão manométrica com os data loggers de pressão e pulso foram baseados nas cotas topográficas de cada nó, e o critério de escolha foi feito de tal maneira que houvesse a maior representatividade do sistema. Assim, os nós de baixa cota topográfica e alta cota topográfica foram os principais escolhidos por poderem estar trabalhando próximos dos máximos e mínimos de pressão, respectivamente. E nós com cotas topográficas medianas também foram selecionados.

O monitoramento de vazão aconteceu na entrada da rede de distribuição de água do setor em estudo com o intuito de monitorar todo o volume de água que abastece os bairros. Além do monitoramento de vazão neste ponto também foi efetuada medida de pressão manométrica.

A Figura 32 apresenta o mapa das zonas de elevação, elaborado no *software* EPANET, da rede de distribuição de água do setor em estudo com os devidos nós onde ocorreram as medidas de pressão e vazão em suas proximidades, isso porque o monitoramento ocorreu nos cavaletes das residências com veremos a seguir.

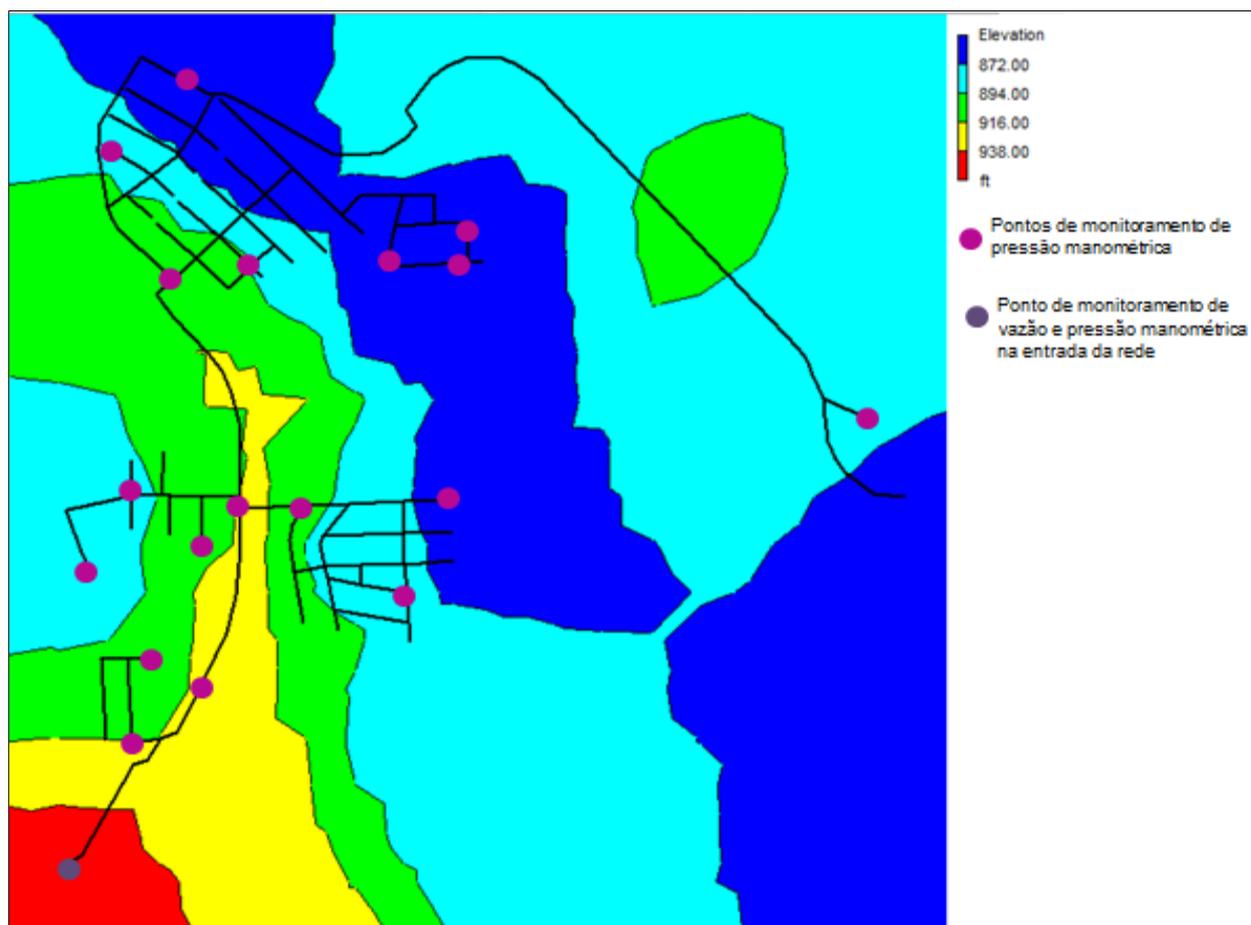


Figura 32 – Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão e vazão.

A equipe possuía 20 data loggers em operação e 1 medidor de vazão (ultrassom), que foram distribuídos da seguinte maneira:

- 1 data logger (Logger 01) e 1 ultrassom no reservatório R4 – Entrada do setor;
- 18 data loggers espalhados na rede de distribuição do setor, como apresenta a Tabela 4 e a Figura 31.
- 1 data logger (Logger 04) foi mantido fora de operação para reserva.

Tabela 4 – Nós escolhidos para monitoramento de pressão manométrica

Nós	Bairro	Rua	Cota (m)	Nº. Logger
85	Vale das Rosas	Ananias A. da Rosa/Nº116	866,12	8
96	Vila Mariana	R. Benigna V. Rodrigues/Nº17	891,58	2
139	Água Branca	R. João R. Pimentel/Nº10	918,32	12
140	Água Branca	R. José Benedito Ribeiro/Nº82 ^a	896,87	11

Continuação da Tabela 4 – Nós escolhidos para monitoramento de pressão manométrica

Nós	Bairro	Rua	Cota (m)	Nº. Logger
141	Água Branca	Av. Bento Jacinto/Nº110	923,33	17
142	Vale do Sol	R. Guajajaras/Nº101	900,04	21
143	Vale do Sol	R. Ianomane/Nº122	874,46	13
144	Vale do Sol	R. Guajajaras/Nº236	870,04	5
145	Água Branca	Av. Bento Jacinto/Nº476	921,67	9
146	Vale das Montanhas	R. Alameda dos Ipês/Nº54	910,67	6
147	Vale das Montanhas	Av. João Lopes de Souza/Nº242	887,26	3
148	Vale das Montanhas	R. Miguel Lousada/Nº570	877,13	14
149	Vila Mariana	R. Belinha Ramos/Nº111	911,36	15
150	Vila Mariana	R. Samuel Guimenti/Nº298	892,12	10
151	Vale das Rosas	Salustiano M. dos Santos /Nº31	866,27	22
152	Vale das Rosas	José Soares da Silva/Nº70	863,80	23
153	Vila Mariana	Av. Mariana R.Ribeiro/Nº118	860,03	19
159	Vila Mariana	Rod. Cristovão Sheradia/km03	894,04	20

4.4.2.1. Obras necessárias para o monitoramento de vazão e pressão

Para monitorar a vazão e a pressão no ponto de entrada para o setor, construiu-se uma caixa para a alocação dos equipamentos como mostra a Figura 33.



Figura 33 – Caixa construída para alocação dos equipamentos: Ultrassom (medidor de vazão) e Data logger (medidor de pressão manométrica).

4.4.3. Medidas de pressão e vazão

A segunda campanha de campo realizada em outubro de 2014 em Cambuí (MG) pela equipe NUMMARH – Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos foi destinada a obtenção de dados de pressão nos nós de monitoramento selecionados previamente e de pressão e vazão na entrada da rede de distribuição de água para o setor.

Os equipamentos de pressão, data loggers, e o equipamento de vazão, ultrassom, foram programados para iniciar as medidas no dia 08 de outubro de 2014 a 14 de outubro de 2014, de maneira sincronizada.

As medidas de pressão foram efetuadas nas torneiras das residências com ligação direta da rua, próximas aos respectivos nós selecionados, como mostra as Figuras 34 a 38. E na entrada da rede a medida de vazão e pressão foi realizada diretamente na tubulação, como é apresentado na Figura 39. Nas residências tomaram-se os devidos cuidados para a proteção dos equipamentos contra chuva, animais e risco de roubo. Vale ressaltar que por falta de segurança não foi possível manter continuamente os data loggers instalados no bairro Vale das Rosas, assim foram efetuadas algumas medidas pontuais de pressão no bairro.



Figura 34 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Água Branca.



Figura 35 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Vale do Sol.



Figura 36 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Vale das Montanhas.



Figura 37 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em uma das residências no bairro Vila Mariana.



Figura 38 – Foto do medidor de pressão, data logger, instalado em duas das residências no bairro Vale das Rosas.



Figura 39 – Foto da instalação do medidor de pressão, data logger, e do medidor de vazão, ultrassom, na caixa construída na entrada da rede no reservatório R4.

4.4.4. Cálculo do consumo nodal

O cálculo dos consumos nodais é essencial para estudos de calibração de redes já que o seu valor afeta diretamente o resultado da pressão nodal.

As informações de consumo de três meses (julho, agosto e setembro de 2014) dos bairros Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas foram disponibilizadas pelo SAAE de Cambuí (MG), com o intuito de estimar as demandas nodais da rede de distribuição de água em estudo, a Figura 99 do ANEXO C apresenta um exemplo do formato das contas de água.

Com este histórico de consumo das economias (residências) efetuou-se um processo estatístico de cálculo dos consumos nodais, através da equivalência entre os comprimentos de cada trecho e o comprimento total da rua, após saber-se o valor de consumo total de cada rua dos bairros. Calculou-se então o consumo equivalente de cada trecho e distribuiu a metade do consumo para cada um dos nós de montante e jusante do trecho. Este método do consumo por metro da tubulação foi adotado por não se saber exatamente a localização de cada residência para se efetuar o cálculo do consumo por número de ligações, o que pode ser uma fonte de erros. Na Tabela 5 é apresentado o resultado dos consumos nodais para o setor, nota-se que o sistema é de baixo consumo total, apresentando valores de demanda nodal de baixa ordem.

Tabela 5 – Consumo nodal de cada nó da rede do setor de Cambuí (MG)

Nós	Consumo nodal (m ³ /mês)	Consumo nodal (l/s)	Nós	Consumo nodal (m ³ /mês)	Consumo nodal (l/s)
Entrada	-5863,0601	-2,1890	15	77,5821	0,0290
1	125,9438	0,0470	16	52,3611	0,0195
2	116,2889	0,0434	17	4,1435	0,0015
3	37,5546	0,0140	18	5,5976	0,0021
4	48,2681	0,0180	19	20,1531	0,0075
5	18,5668	0,0069	20	5,8018	0,0022
6	101,3357	0,0378	21	69,1378	0,0258
7	1,7486	0,0007	22	51,5606	0,0193
8	150,6713	0,0563	23	5,7750	0,0022
9	144,1667	0,0538	24	27,7625	0,0104
10	43,8500	0,0164	25	20,8593	0,0078
11	38,3406	0,0143	26	26,3019	0,0098
12	44,1293	0,0165	27	3,7211	0,0014
13	43,9386	0,0164	28	25,6907	0,0096
14	50,6855	0,0189	29	30,3333	0,0113

Continuação da Tabela 5 – Consumo nodal de cada nó da rede do setor de Cambuí (MG)

Nós	Consumo nodal (m³/mês)	Consumo nodal (l/s)	Nós	Consumo nodal (m³/mês)	Consumo nodal (l/s)
30	73,3833	0,0274	71	149,8832	0,0560
31	83,0465	0,0310	72	72,6400	0,0271
32	44,6510	0,0167	73	49,2970	0,0184
33	27,4287	0,0102	74	134,5969	0,0503
34	25,8984	0,0097	75	49,3411	0,0184
35	4,70610	0,0018	76	58,4956	0,0218
36	3,1962	0,0012	77	32,9578	0,0123
37	25,3754	0,0095	78	3,3211	0,0012
38	15,8460	0,0059	79	5,4845	0,0020
39	25,6081	0,0096	80	6,7048	0,0025
40	26,3318	0,0098	81	4,5414	0,0017
41	1,0679	0,0004	82	17,0712	0,0064
42	41,8241	0,0156	83	11,7011	0,0044
43	31,5513	0,0118	84	25,5735	0,0095
44	70,4144	0,0263	85	31,0251	0,0116
45	35,9487	0,0134	86	28,7735	0,0107
46	18,1000	0,0068	87	3,6413	0,0014
47	3,0467	0,0011	88	17,4603	0,0065
48	3,1314	0,0012	89	10,5548	0,0039
49	18,0359	0,0067	90	25,4906	0,0095
50	27,9024	0,0104	91	52,8095	0,0197
51	13,7759	0,0051	92	35,6387	0,0133
52	49,0409	0,0183	93	63,5504	0,0237
53	32,3812	0,0121	94	37,2584	0,0139
54	26,1900	0,0098	95	55,4627	0,0207
55	40,8907	0,0153	96	50,8905	0,0190
56	43,6386	0,0163	97	55,6044	0,0208
57	25,7985	0,0096	98	29,1677	0,0109
58	29,4268	0,0110	99	68,6223	0,0256
59	106,7578	0,0399	100	64,3581	0,0240
60	49,4764	0,0185	101	78,6103	0,0293
61	40,4349	0,0151	102	46,7938	0,0175
62	21,2235	0,0079	103	93,5317	0,0349
63	15,3225	0,0057	104	85,7274	0,0320
64	3,5400	0,0013	105	17,9144	0,0067
65	121,6875	0,0454	106	24,5824	0,0092
66	60,5806	0,0226	107	17,2556	0,0064
67	39,5063	0,0147	120	4,9910	0,0019
68	113,0463	0,0422	121	8,0941	0,0030
69	54,1576	0,0202	122	8,1161	0,0030
70	23,1663	0,0086	123	5,9873	0,0022

Continuação da Tabela 5 – Consumo nodal de cada nó da rede do setor de Cambuí (MG)

Nós	Consumo nodal (m³/mês)	Consumo nodal (l/s)
124	7,5989	0,0028
125	6,1217	0,0023
126	6,0980	0,0023
127	36,8637	0,0138
128	50,4271	0,0188
129	19,7569	0,0074
130	4,1197	0,0015
131	5,7262	0,0021
132	17,6958	0,0066
133	7,5068	0,0028
134	5,0189	0,0019
135	4,9555	0,0019
136	5,9248	0,0022
137	6,9431	0,0026
138	3,6101	0,0013
139	93,0000	0,0347
140	6,8287	0,0025
141	26,4966	0,0099
142	31,2519	0,0117
143	7,6879	0,0029
144	32,3728	0,0121
145	38,8472	0,0145
146	8,8333	0,0033
147	3,4533	0,0013
148	30,2243	0,0113
149	38,1667	0,0142
150	4,4156	0,0016
151	10,0000	0,0037
152	24,3333	0,0091
153	87,1967	0,0326
154	65,3986	0,0244
155	113,4856	0,0424
156	82,4711	0,0308
157	124,8291	0,0466
158	53,9691	0,0201
159	9,2958	0,0035

4.5. Redes usadas nos testes teóricos

Para o desenvolvimento do trabalho os ensaios de calibração foram realizados para uma rede hipotética e para a rede real do setor “Monte Carlo”, São Carlos/SP, estudada por Silva (2003) na estruturação do seu Algoritmo Genético.

4.5.1. Rede hipotética

A rede mostrada na Figura 40 é composta de 7 nós e 8 trechos. A sua utilização foi realizada nos estudos de calibração da rede em termos das rugosidades absolutas, em termos das rugosidades absolutas e demanda aleatória e em termos de rugosidades absolutas e da demanda dirigida por pressão através do modelo proposto por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). Adotou-se esta rede principalmente pela redução do tempo computacional. A rede é um exemplo modificado do proposto no manual do *software* Epanet 2.0 Brasil.

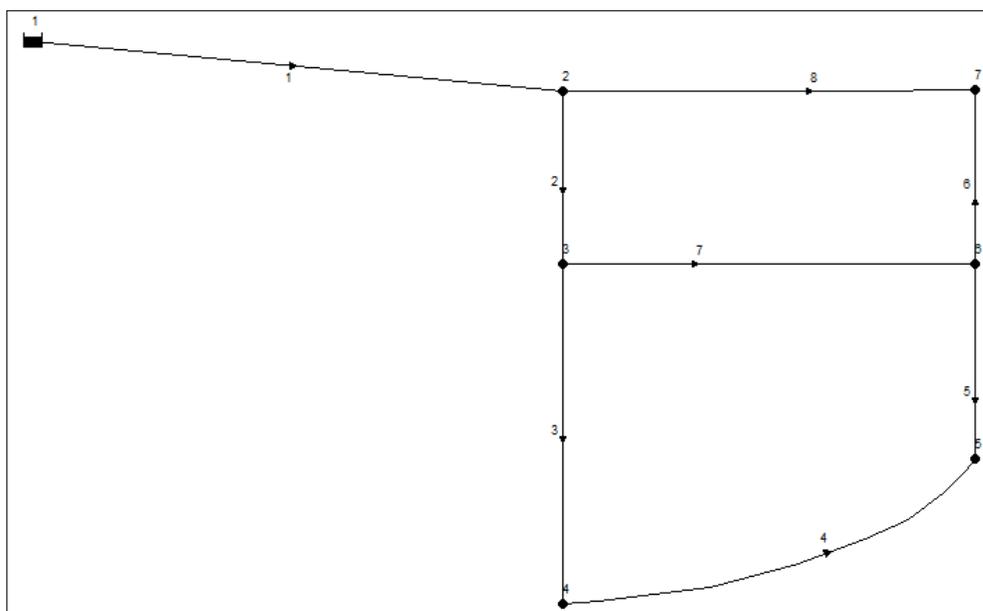


Figura 40 – Traçado da rede hipotética. (Fonte: Adaptado do manual Epanet 2.0 Brasil)

Para o estudo da calibração da rede hipotética foi considerado como dados observados de pressão e vazão os valores obtidos pela simulação no *software* Epanet para os três padrões de consumo, consumo máximo (padrão 1), consumo médio (padrão 2) e consumo mínimo (padrão 3). As informações referentes aos dados de pressão e vazão desta rede encontra-se no Anexo F.

4.5.2. Rede real do setor “Monte Carlo”

O segundo sistema estudado para os estudos de calibração em termos de rugosidade absoluta e demanda nodal foi à rede de distribuição do setor denominado “Monte Carlo”, da cidade de São Carlos (SP). A rede real de “Monte Carlo” extraída do trabalho de Silva (2003) é ilustrada no esquema da Figura 41. A rede é composta por 58 nós, 83 trechos, com uma extensão de 9173 m em PVC e $\text{F}^{\text{º}}$, com 1051 ligações. A população abastecida pela rede foi estimada em 5000 habitantes na época do estudo (SILVA, 2003). O sistema é um setor isolado tendo como nó de entrada o nó 28. No Anexo G estão contidos os dados de pressão e vazão obtidos em campo por Silva (2003).

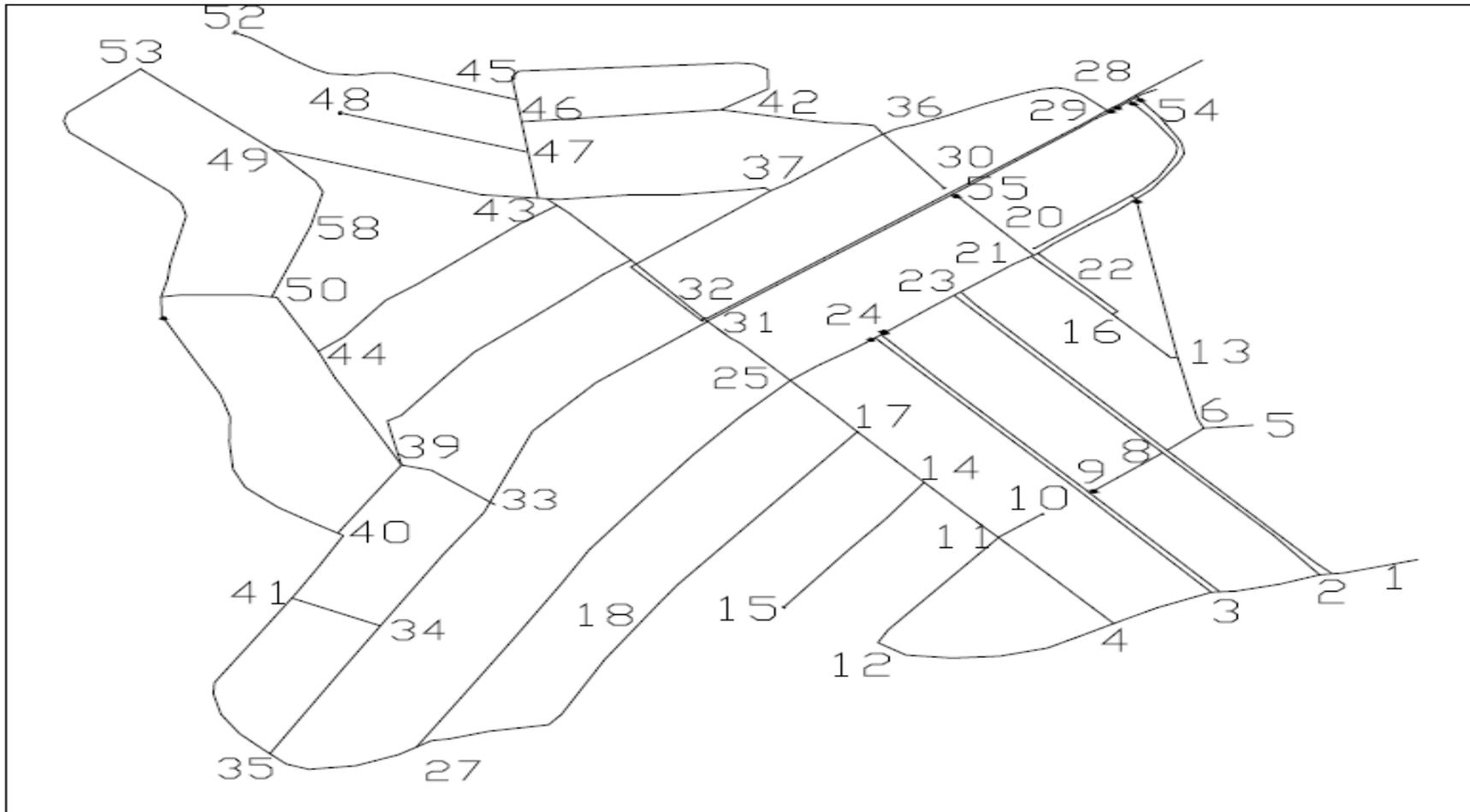


Figura 41 – Esquema do Setor “Monte Carlo”, cidade de São Carlos (SP). (Fonte: SILVA, 2003)

4.6. Modelo hidráulico empregado no modelo de calibração proposto por Silva (2003)

O modelo hidráulico empregado no trabalho foi o mesmo utilizado por Silva (2003), no qual o resultado da função objetivo de cada alternativa de solução é realizado através de uma rotina que efetua avaliações hidráulicas, sendo o cálculo das perdas de carga realizado pela fórmula universal. Na avaliação hidráulica, além de outros parâmetros, são obtidos os valores de pressão e vazão para cada nó e trecho da rede em análise respectivamente, partindo dos dados de entrada do sistema. Com estes valores é possível obter o valor da função objetivo.

Segundo Silva (2003) a formulação do modelo hidráulico das redes de distribuição de água geralmente envolvem as equações da continuidade para cada nó e a equação da energia para cada trecho.

A equação da continuidade para cada nó é escrita como:

$$\sum_{j \in j_i} Q_{ij} + C_i = 0; \text{ para todos os nós } i. \quad \text{Equação (4.1)}$$

Sendo Q_{ij} a vazão no elemento hidráulico que une os nós i e j , C_i o consumo no nó i e j_i são todos os nós ligados ao nó i . O sentido do fluxo, Q_{ij} , é positivo de i para j .

O nó j pode ser também um reservatório, tendo sua carga conhecida. E empregando a fórmula universal, a vazão Q_{ij} pode ser encontrada.

A formulação dos vazamentos são relacionados com as pressões da rede (Germanopoulos e Jowitt, 1989 apud SILVA, 2003):

$$S_{i,j} = c_i \cdot L_{ij} \cdot (P_{ij}^{av})^{1,18} \quad \text{Equação (4.2)}$$

Sendo $S_{i,j}$ o vazamento na tubulação que une os nós i e j , c_i uma constante da rede, L_{ij} o comprimento da tubulação limitada por i e j e P_{ij}^{av} é a pressão média ao longo da tubulação. Assim segundo Silva (2003), a Equação (4.2) pode ser reescrita em termos das cargas hidráulicas no nós correspondentes, como:

$$S_{i,j} = c_i \cdot L_{ij} \cdot [0,5 \cdot (H_i - h_i + H_j - h_j)]^{1,18} \quad \text{Equação (4.3)}$$

Sendo h_i o nível do terreno no nó i . A Equação (4.1) também pode ser reescrita como (SILVA,2003):

$$\sum_{j \in j_i} Q_{ij} + C_i + 0,5 \cdot \sum_{j \in j_i} S_{i,j} = 0; \text{ para pressão no nós } i. \quad \text{Equação (4.4)}$$

Sendo o vazamento $S_{i,j}$ distribuído igualmente entre os nós i e j .

De acordo com Silva (2003), outro dado relevante do modelo hidráulico é o cálculo do fator temporal de consumo.

Segundo o autor, geralmente para os estudos de calibração em redes a vazão total para o abastecimento (Q_e) é inclusa e monitorada em campo. Contudo, não se sabe ao certo, qual a parcela dessa vazão (Q_e) é destinada ao consumo dos usuários e aos vazamentos da rede. Assim, supondo que a distribuição espacial do consumo seja completamente conhecida e que existem os vazamentos, temos:

$$Q_e = C_{setor} + V_{setor} \quad \text{Equação (4.5)}$$

Sendo C_{setor} o consumo ou demanda total do setor e V_{setor} o vazamento total do setor. O autor define as variáveis como:

$$C_{setor} = \sum_{i=1}^{nós} C_i \quad \text{Equação (4.6)}$$

e

$$V_{setor} = \sum_{j=1}^{trechos} V_j \quad \text{Equação (4.7)}$$

Para expressar a variação do consumo das horas do dia, o autor emprega um fator multiplicador dos consumos ou demandas de referência (C_{ref}), como apresentado:

$$C_i = fator \cdot C_{ref.i} \quad \text{Equação (4.8)}$$

$$C_{setor} = fator \cdot C_{ref.setor} \quad \text{Equação (4.9)}$$

Sendo i os nós da rede,

$$C_{ref.setor} = \sum_{i=1}^{nós} C_{ref.i} \quad \text{Equação (4.10)}$$

Sendo C_{ref} o consumo de referência, encontrado com base no consumo mensal médio por quadra do setor e distribuídos aos nós de acordo com as áreas de influência dos mesmos.

Substituindo a Equação (4.9) na Equação (4.5), temos:

$$fator = \frac{Q_e - V_{setor}}{C_{ref.setor}} \quad \text{Equação (4.11)}$$

De acordo com Silva (2003), o fator é reavaliado iterativamente até que a convergência para um determinado valor seja alcançada. O processo iterativa inicia com o vazamento na condição nulo. Com o fator calculado encontra-se as vazões e os vazamentos dos trechos. Assim, há a possibilidade de avaliar qual a parcela de Q_e atribuída ao vazamento do sistema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados experimentais de campo

Após o fim das medições, obtiveram-se as variações de pressão e vazão nos pontos da rede de distribuição e na entrada da rede, durante os dias medidos. Para efeito deste trabalho optou-se em escolher um dia de medidas dos data loggers e do ultrassom, 09 de outubro de 2014, dia que apresentou um comportamento mais definido dos perfis de pressão nos nós.

Nas Tabelas 17 e 18 do ANEXO E constam os valores de pressões de uma em uma hora para o dia escolhido e os valores e horários mínimos, médios e máximos de pressão, respectivamente. E nas Tabelas 19 e 20, também do ANEXO E, constam os valores de vazões de uma em uma hora para o dia escolhido e os valores e horários mínimos, médios e máximos de vazão, respectivamente, para a entrada da rede. As Figuras 42 a 52 apresentam os gráficos da variação de pressão manométrica nos nós de monitoramento contínuo do dia selecionado que não apresentaram problemas na obtenção das informações, como ocorreu com os data loggers 9, 10, 12 e 15. Os monitoramentos pontuais dos loggers 8, 22 e 23, no bairro Vale das Rosas, não foram empregados neste estudo.

De uma maneira geral, não há variações significativas nos valores de pressão dos nós durante o dia, ou seja, o sistema não é sensível às variações de consumo residenciais, pois estes são muito baixos. As maiores pressões ocorrem no período da madrugada, exceto pelo nó 147. Observa-se que este ponto apresenta valores de pressão sempre abaixo do limite recomendado pela norma ABNT, e que os valores de pressões são praticamente constantes, a pouca oscilação de pressão que ocorre pode ser causada por uma perda de carga localizada.

Constata-se pelos gráficos que a maioria dos outros pontos monitorados estão a maior parte do tempo variando entre 10 e 50 mca, valores estes que se enquadram aos limites estabelecidos pela norma ABNT.

Outro fato importante é que ao analisar os gráficos dos nós 140, 141 e 159, há indícios de manobra de registros na rede no período da campanha de campo, isto pode explicar o fato de repentinas quedas de pressão nos gráficos, chegando a quase -10 mca no nó 159, ponto mais distante da rede de distribuição.

O ponto mais baixo monitorado é o nó 153, onde se observa os valores altos de pressão, aproximando-se de 80 mca, já no ponto mais alto monitorado, nó 141, o valor máximo se aproxima de 35 mca.

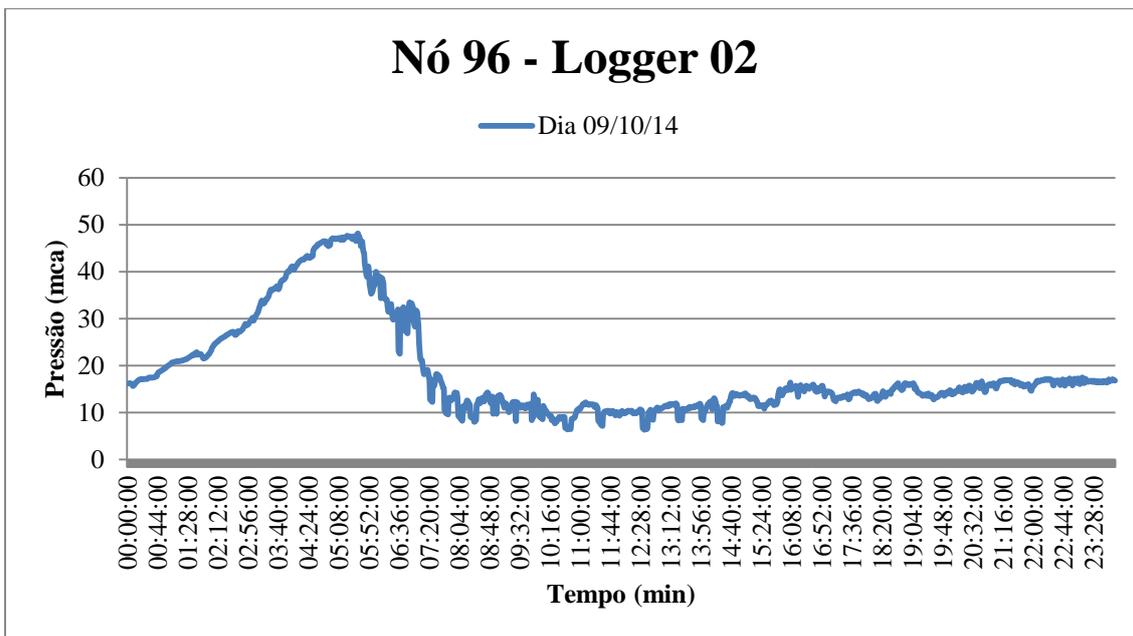


Figura 42 – Registros de pressão, nó 96.

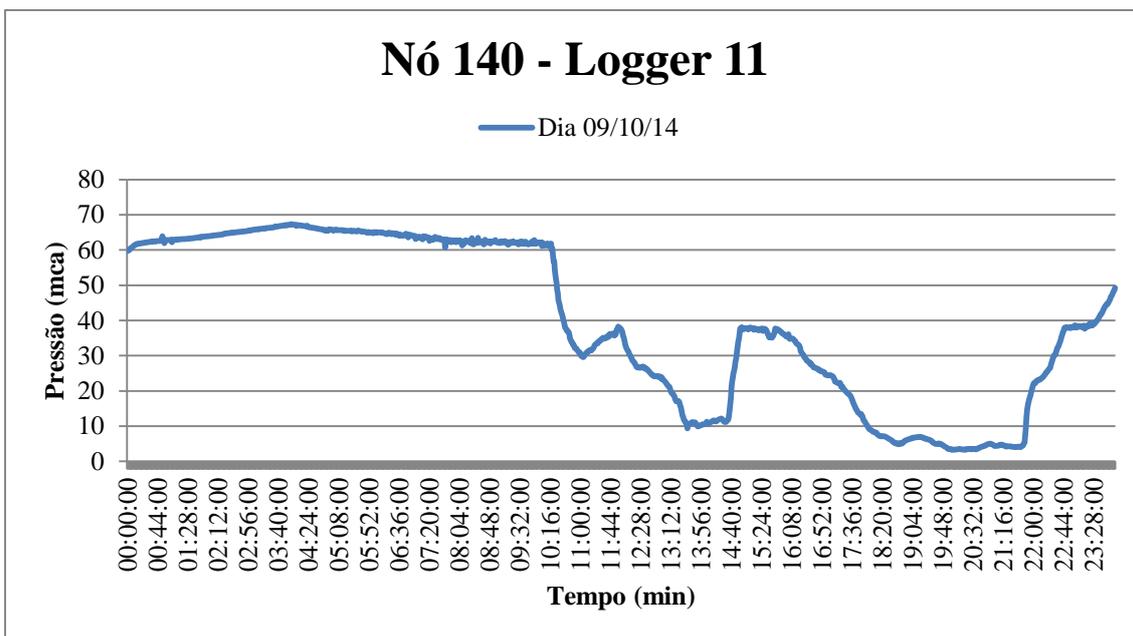


Figura 43 – Registros de pressão, nó 140.

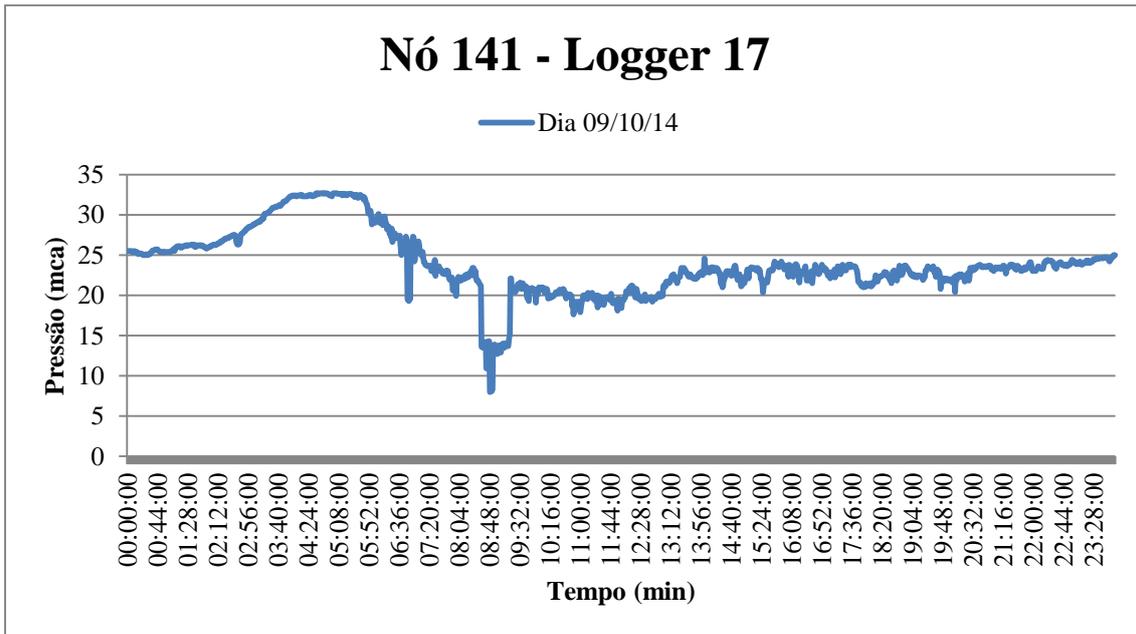


Figura 44 – Registros de pressão, nó 141.

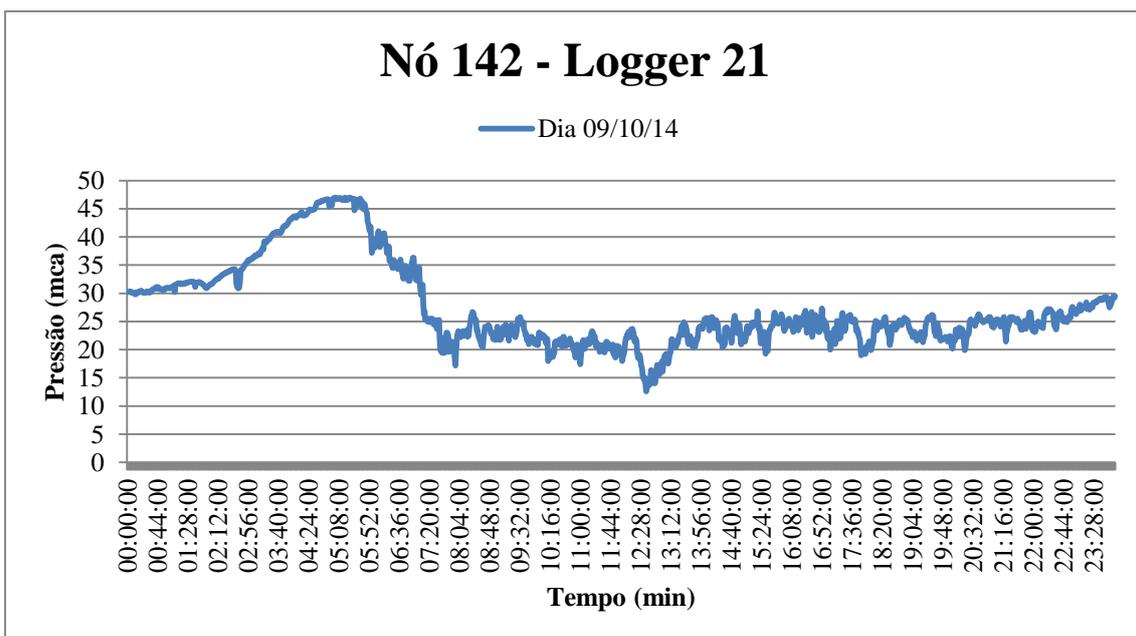


Figura 45 – Registros de pressão, nó 142.

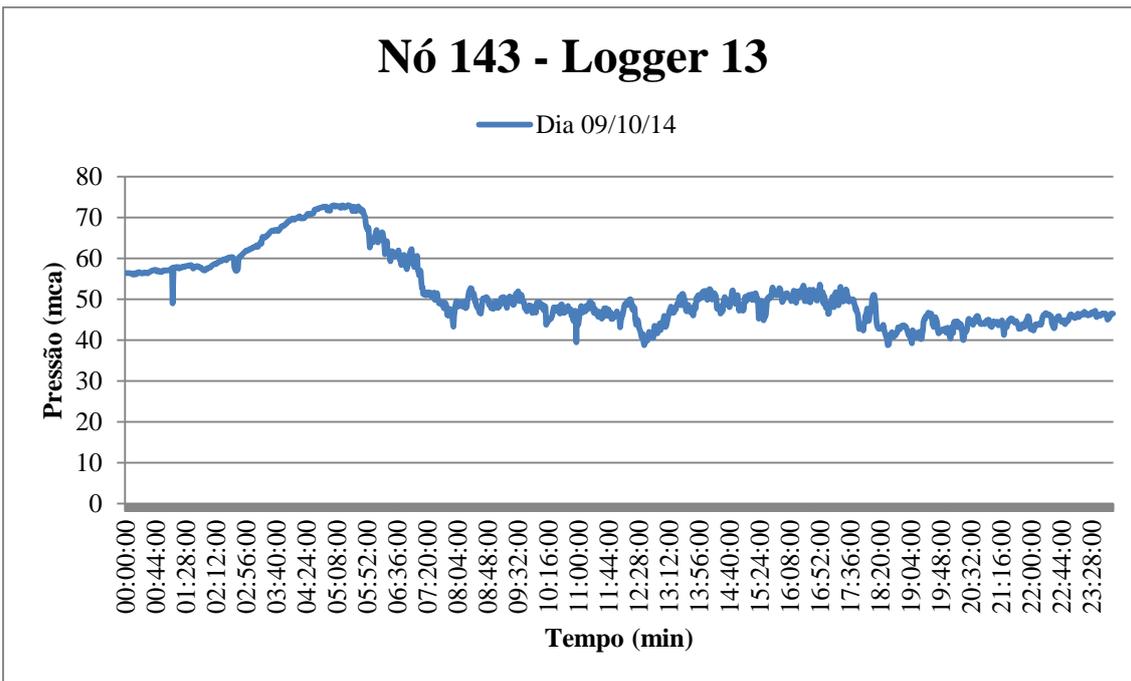


Figura 46 – Registros de pressão, nó 143.

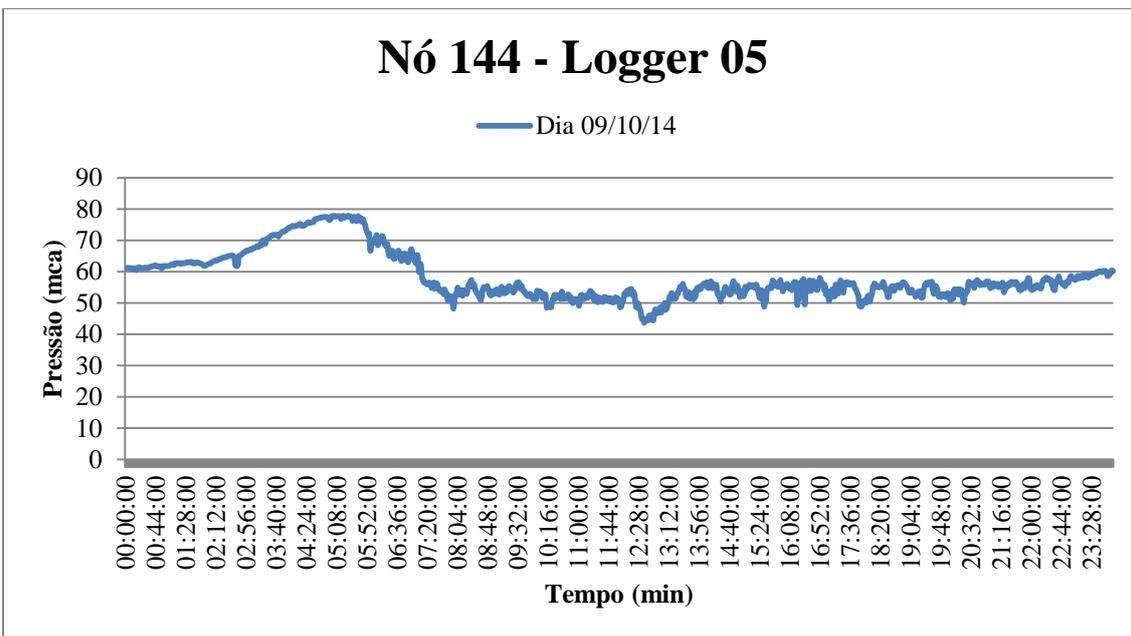


Figura 47 – Registros de pressão, nó 144.

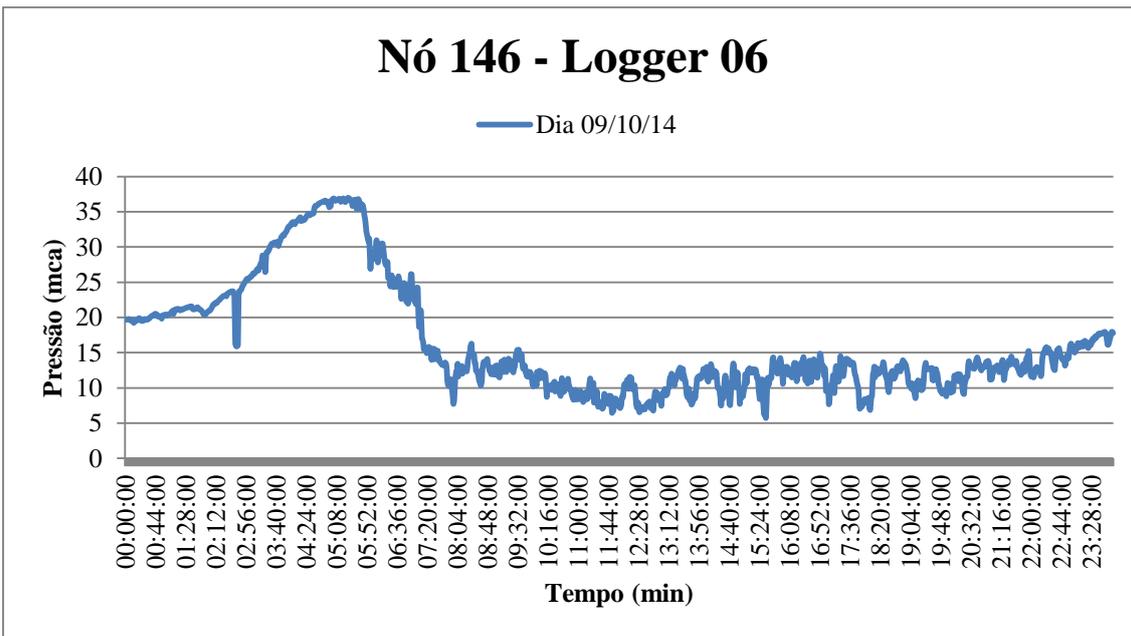


Figura 48 – Registros de pressão, nó 146.

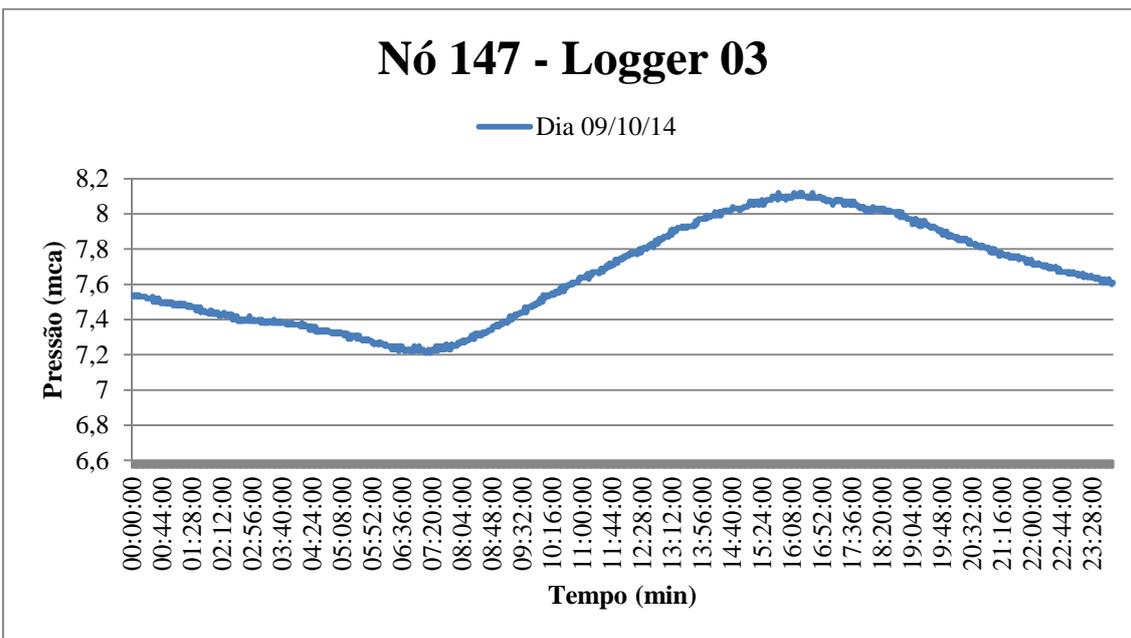


Figura 49 – Registros de pressão, nó 147.

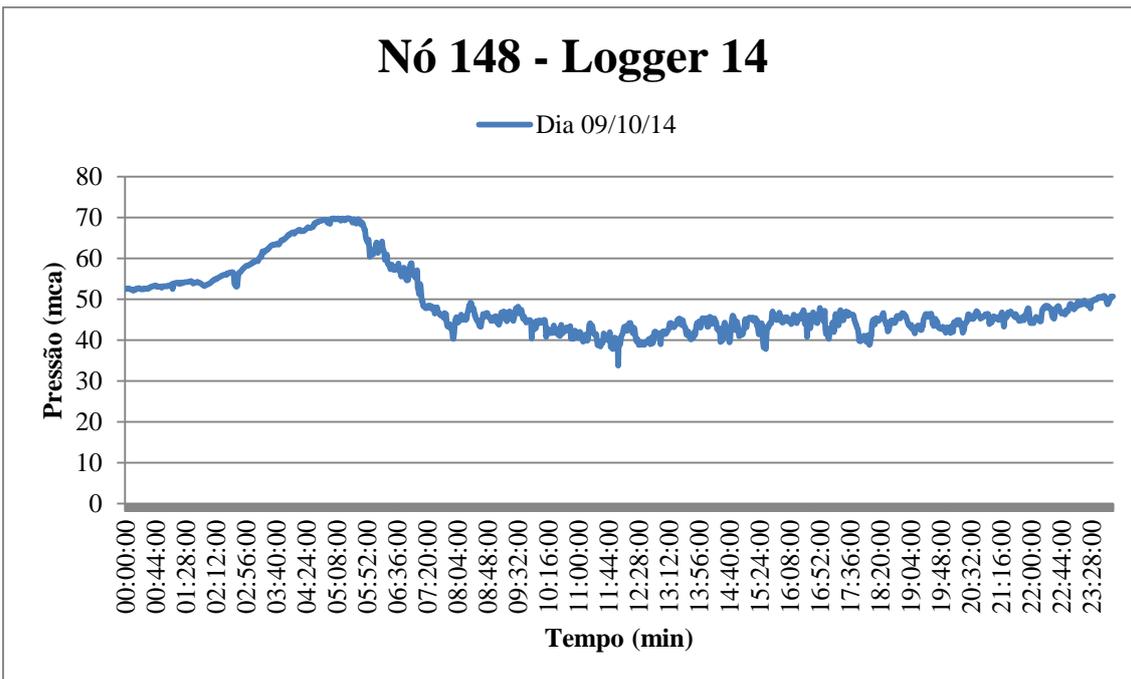


Figura 50 – Registros de pressão, nó 148.

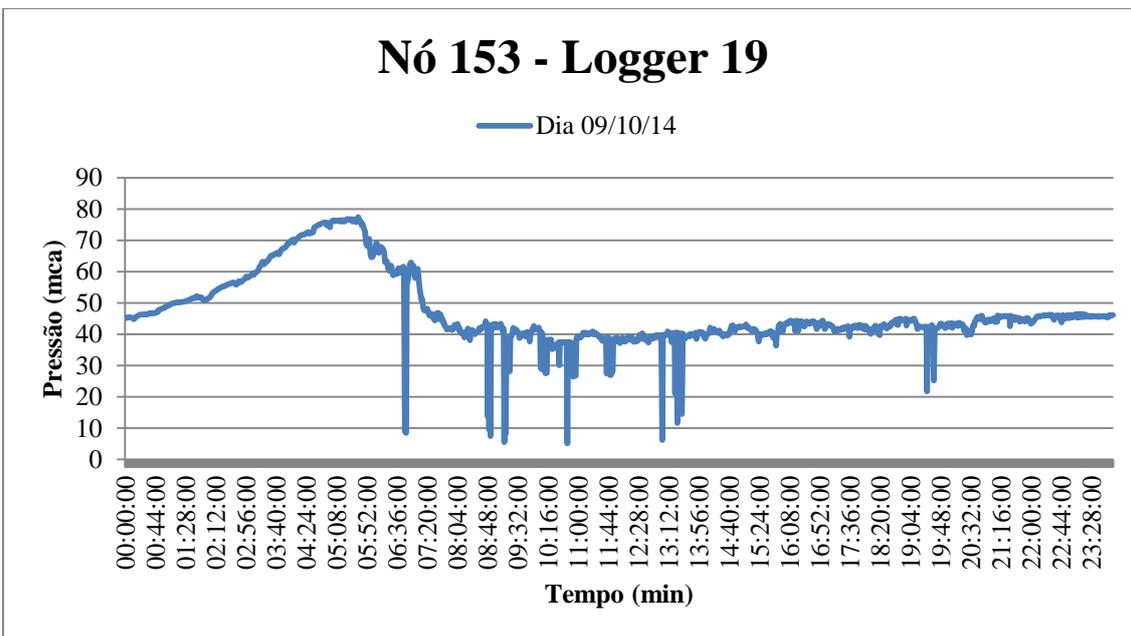


Figura 51 – Registros de pressão, nó 153.

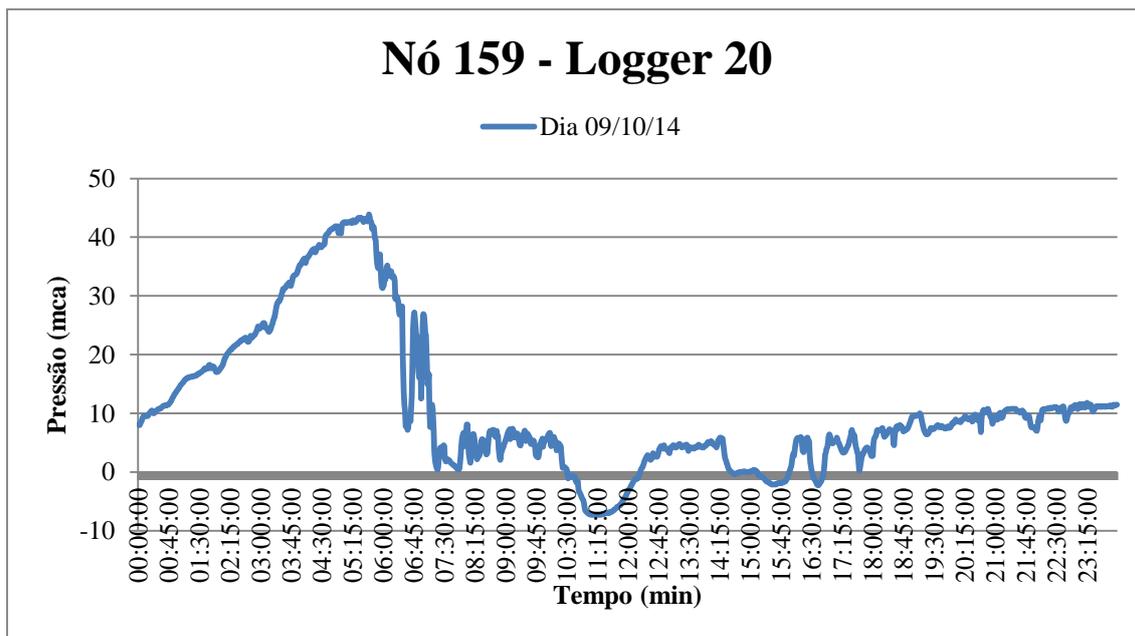


Figura 52 – Registros de pressão, nó 159.

Nas Figuras 53 e 54 estão apresentados os gráficos do comportamento de pressão e vazão, respectivamente, para a entrada da rede de distribuição de água do setor. Observa-se que no período da madrugada o reservatório tubular é abastecido chegando quase a seu nível máximo de 6 metros e durante o dia o nível é mantido em 2 metros (Figura 53). Na Figura 54, a vazão mínima noturna é cerca de 2,1 l/s, não muito distante da vazão máxima diária fornecida. Como não foram encontrados dados cadastrais de consumidores especiais noturnos ou reservatórios domiciliares, este valor elevado pode caracterizar vazamentos ou ligações clandestinas na rede.

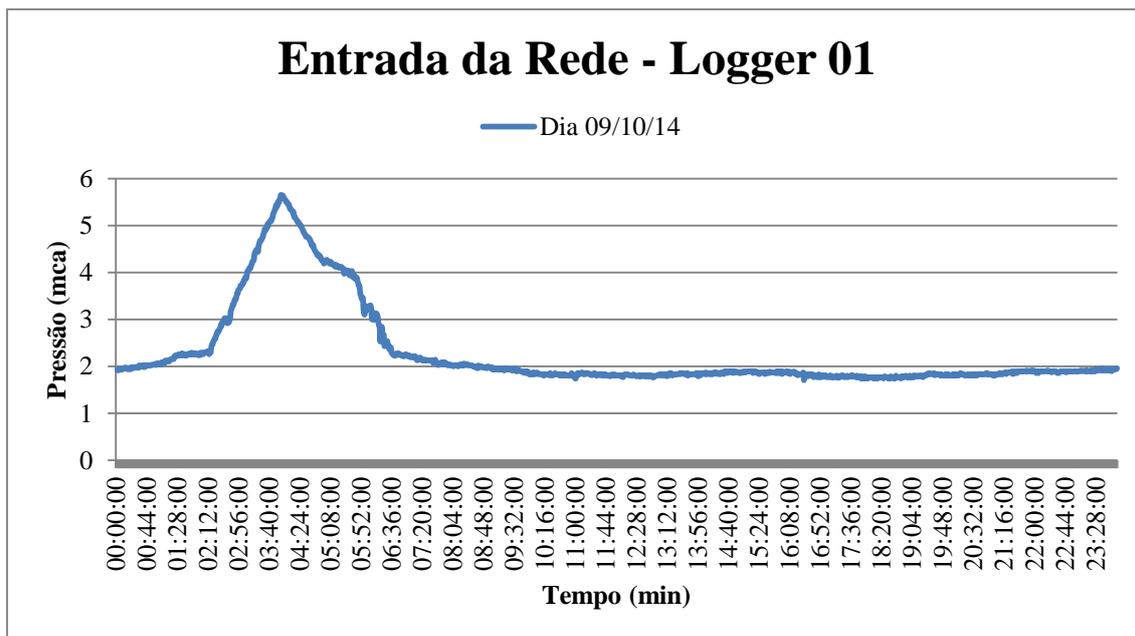


Figura 53 – Registros de pressão, entrada da rede.

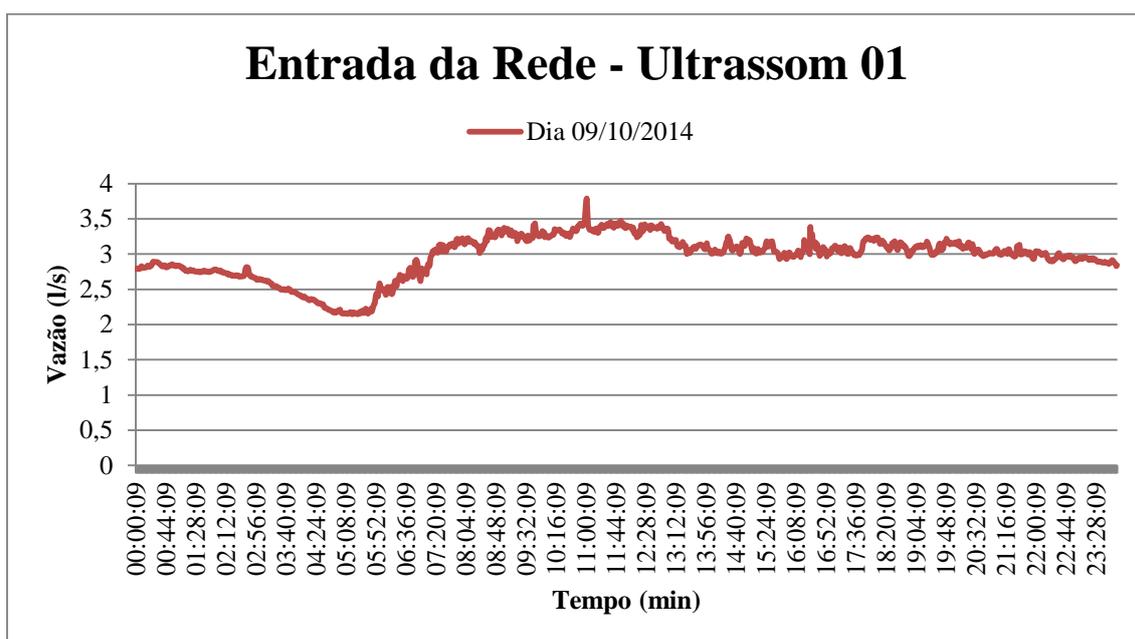


Figura 54 – Registros de vazão, entrada da rede.

5.2. Melhoria de rotina computacional proposta por Silva (2003) para calibração de redes de distribuição de água usando algoritmos genéticos

A pesquisa se propôs a implementar um modelo computacional desenvolvida por Silva (2003) que efetua o estudo sobre calibração de redes de distribuição de água em termos das

rugosidades absolutas. Para isso, a função objetivo formulada foi aprimorada adicionando-se a calibração dos consumos de cada nó da rede.

A interface computacional proposta por Silva (2003) foi escrita em linguagem FORTRAN empregando o método probabilístico de Algoritmos Genéticos, que apresenta grande potencial de resolução para problemas de sistemas complexos.

O programa de Silva (2003) apresenta a melhor solução de rugosidades absolutas da rede, dentre todas as combinações, partindo dos valores de pressões no sistema, que é calibrado com dados obtidos em campo, e após as alterações da rotina computacional o programa também irá prever a melhor solução do consumo nodal, primeiramente de modo aleatório, assim como acontece com as soluções de rugosidade e em uma segunda implementação empregando o modelo matemático da demanda dirigida por pressão proposto por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). Sendo a solução ótima aquela que apresenta maior valor para a função objetivo.

Os fluxogramas dos principais algoritmos estudados para o desenvolvimento do trabalho são apresentados nas Figuras 55, 56, e 57.

O modelo implementado trabalha aplicando ciclicamente operadores estruturados do algoritmo genético, tendo como base uma população inicial de rugosidades e demanda que são geradas inicialmente de forma aleatória e novas gerações são criadas. Cada geração é então avaliada e selecionada de acordo com a função objetivo.

O número de populações definida para o processo é NPOP, o número de gerações é NGER e os operadores estruturados por Silva (2003) são LEITOR, GERADOR, AVALIADOR, SELEÇÃO, CRUZAMENTO e MUTAÇÃO. A Figura 55 apresenta o fluxograma do Algoritmo Genético Simples desenvolvido por Silva (2003).



Figura 55 – Fluxograma do AG empregando o modelo proposto por SILVA (2003).

Na implementação da demanda aleatória o modelo proposto por Silva (2003) (Figura 55) pouco foi modificado, apenas adicionando a geração das demandas aleatórias dos nós da rede. Apresentando os mesmos caminhos do AG proposto por Silva (2003), como mostra a Figura 56.



Figura 56 – Fluxograma do AG empregando o Modelo implementado com demanda aleatória.

Após a introdução do modelo matemático da demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), foi desenvolvido mais um operador denominado de TUCCIARELLI, assim o fluxograma do AG alterou-se como apresenta a Figura 57.

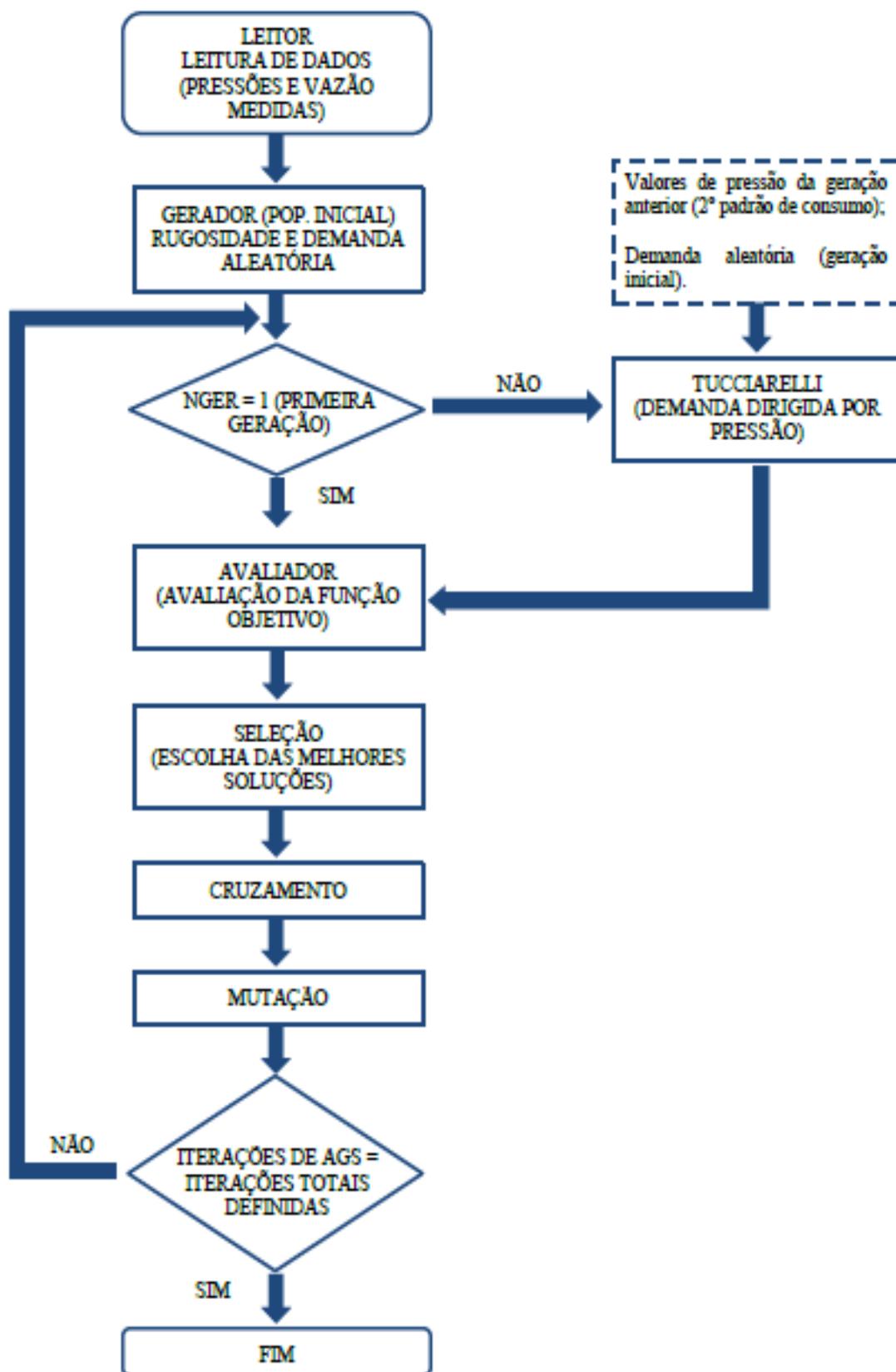


Figura 57 – Fluxograma do AG empregando o Modelo implementado a demanda dirigida por pressão.

Observando o fluxograma da Figura 57, a partir do operador GERADOR o programa efetua caminhos diferentes após a primeira geração. Na primeira geração são utilizadas rugosidades e demandas aleatórias em todo o programa. Mas da segunda geração em diante, apesar da geração inicial de rugosidades e demandas ser aleatórias, ao passar pelo operador TUCCIARELLI a demanda se altera de acordo com os critérios de pressão do modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), empregando sempre os valores de pressão nodal obtidos na geração anterior a que esta ocorrendo.

No operador LEITOR a principal alteração efetuada, para ambos os modelos implementados com a demanda nodal, foi que o consumo nodal deixou de ser recebido como arquivo de entrada para todas as gerações, já que o programa agora pretende prever a melhor solução das demandas. Ocorrendo então, a leitura de constantes de vazamentos (C1 e N1), adotadas como proposto no modelo proposto por Silva (2003), e dos dados de entrada da rede de abastecimento de água, tais como: comprimento e diâmetro de cada trecho, cota topográfica de cada nó, carga piezométrica do reservatório, pressão de nós selecionados, vazão na entrada da rede, nós de montante e jusante de cada trecho e número total de nós e trecho do setor em estudo. O arquivo de entrada é alimentado por dados medidos em campo e/ou obtidos junto à companhia de água responsável.

Após a leitura dos dados o ciclo segue no operador GERADOR, onde aleatoriamente, também para ambos os modelos implementados com a demanda nodal, são geradas uma solução inicial de rugosidades e uma solução inicial de demandas. A solução de rugosidade é gerada dentro do intervalo de 0,5 mm e 10 mm, construindo-se a população inicial das possíveis rugosidades (soluções) dos trechos da rede. E a solução de demanda é gerada dentro de um intervalo que leva em consideração o estudo do consumo nodal obtido através de dados reais de 3 (três) meses de consumo de água pelos usuários da rede e a soma dos indivíduos da solução de demandas deve apresentar um valor próximo da soma dos consumos nodais calculados previamente com os cadastros reais de consumo dos usuários.

Para o modelo implementado com a demanda aleatória e para a primeira geração do modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, a estruturação do programa após passar pelo LEITOR e GERADOR o operador seguinte será o AVALIADOR, onde os indivíduos das populações iniciais de rugosidades dos trechos e demandas dos nós aleatórios são avaliados para qualificar aqueles mais adaptados ao problema, segundo o critério da função objetivo definida. Esta avaliação tem como base os valores de pressão obtidos para os nós e valores de vazão na entrada do sistema. Estes valores são resultantes de cálculos

hidráulicos feitos com cada individuo de rugosidade e demanda da população em questão, para três padrões de consumo: consumo máximo (padrão 1), consumo médio (padrão 2) e consumo mínimo (padrão 3).

Os cálculos hidráulicos do problema são possibilitados por um sub operador, denominado HIDRÁULICA, onde são calculadas as perdas de carga em função de atrito (fórmula universal) e outros parâmetros de interesse. Com os valores de pressão e vazão resultantes de cada população de rugosidade e demanda encontra-se um valor para a função objetivo, função está que, compara os valores de pressões e vazão observados em campo com os valores de pressões e vazão calculados. As soluções (rugosidades e demandas) melhores, aquelas que maximizam o valor da função objetivo, são selecionadas para troca dos códigos genéticos dando origem a novos indivíduos, ou seja, novas soluções para o problema.

O problema inverso de determinação de parâmetros através da minimização dos desvios entre valores observados e valores simulados de pressão e vazão, foi expresso e mantido o mesmo proposto por Silva (2003), através da maximização da seguinte função objetivo indicada pela Equação 5.1.

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^c \left\{ w_H^{(k)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{sim\ i} - P_{obs\ i}}{\left[\frac{\sum_{i=1}^N P_{obs\ i}}{N} \right]} \right]^2 + w_Q^{(k)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\frac{Q_{sim\ j} - Q_{obs\ j}}{\left[\frac{\sum_{j=1}^M Q_{obs\ j}}{M} \right]} \right]^2 \right\} \right\}^{-1} \quad \text{Equação (5.1)}$$

Sendo P a carga de pressão (m), Q a vazão (l/s), N o conjunto de pontos de observação de valores de pressão, M o conjunto de pontos de observação de valores de vazão, c o número de condições de demanda representando horários de consumo máximo, médio e mínimo) w_H e w_Q os pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão e sim e obs denotam valores simulados e observados respectivamente.

Na SELEÇÃO, o processo de escolha vai beneficiar as rugosidades e as demandas da população mais apta de acordo com os valores da função objetivo. O método de seleção empregado é o Método do Torneio sem elitismo, encontra-se a cadeia de rugosidades e demandas (cromossomo) melhores adaptadas entre os elementos, comparando aleatoriamente pares do subconjunto e escolhem-se os melhores para serem cromossomos pais na próxima geração.

Seguindo a evolução do AG o próximo operador após a seleção dos pais, para constituir a nova população de rugosidades e demandas, é o CRUZADOR, a recombinação das rugosidades e demandas (genes) entre os pares de cadeia é feita em duas etapas, ambas de forma aleatória: a primeira é baseada na probabilidade de cruzamento de 0,95 definida, então um número randômico gerado entre 0 e 1 determinará se o cruzamento ocorrerá ou não entre os cromossomos escolhidos para participar da combinação dois a dois. Assim o cruzamento ocorrerá se o número randômico gerado pelo AG for menor que 0,95. Caso contrário, os cromossomos pais serão copiados. A segunda etapa escolhe a posição de mudança de informação (rugosidade) no cromossomo, onde será o corte. O cruzamento de um ponto é feito de maneira aleatória. Neste operador é gerado duas novas soluções de rugosidades e duas novas soluções de demandas, que carregam características dos pais.

No próximo operador MUTAÇÃO, pode ocorrer a introdução de um novo valor de rugosidade e demanda (material genético novo) na população. É pré-definida uma probabilidade de mutação de 0,10 e um número randômico é gerado entre 0 e 1 que confrontado com o valor de probabilidade definirá ou não a ocorrência de mutação. Quando o número randômico for maior que a probabilidade de mutação o valor de rugosidade irá se alterar dentro do intervalo de 0,5 e 10 mm e a demanda irá se alterar dentro do intervalo resultado dos dados reais de consumo de 3 (três) meses do sistema, assim como ocorre no GERADOR.

Dentro do ciclo do AG, os operadores SELEÇÃO, CRUZAMENTO e MUTAÇÃO são repetidos iterativamente para criar novas soluções de rugosidades e demandas.

A partir da segunda geração do modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, antes de iniciar o operador AVALIADOR, o programa irá passar pelo operador TUCCIARELLI, onde a demanda passará a ser calculada de acordo com o modelo matemático formulado por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), como apresentado nas Equações a seguir:

$$Q_{d,i} = d_i \quad \text{se } H_i \geq H_i^{des} \quad \text{Equação (5.2)}$$

$$Q_{d,i} = d_i \cdot \text{sen}^2 \left[\frac{H_i}{2 \cdot H_i^{des}} \right] \quad \text{se } H_i^{min} < H_i < H_i^{des} \quad \text{Equação (5.3)}$$

$$Q_{d,i} = 0 \quad \text{se } H_i \leq H_i^{min} \quad \text{Equação (5.4)}$$

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

A carga hidráulica (H_i) utilizada nos cálculos é referente ao segundo padrão de consumo obtido pela geração anteriormente efetuada do programa e a pré-disposição ao consumo no nó (d_i) foi adotada como a demanda gerada aleatoriamente.

De acordo com Soares (2003), os parâmetros das pressões mínimas (H_i^{min}) e desejáveis (H_i^{des}) podem ser diferentes para cada sistema em estudo, portanto, o modelo matemático proposto por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) foi calibrado para cada uma das redes de ensaio.

Além do critério de pressões, assim como na geração aleatória de demandas no GERADOR as demanda geradas aplicando o modelo matemático no TUCCARELLI também deverão obter a soma dos valores de demandas calculadas para cada uma das populações como sendo o mais próximo possível do valor da soma dos consumos nodais obtidos pelo estudo dos dados reais de consumo de 3 (três) meses do sistema.

Finalizando o processo da geração do modelo implementado com a demanda dirigida por pressão no operador TUCCIARELLI o programa segue, assim como no modelo implementado com a demanda aleatória e para a sua primeira geração, para os operadores: AVALIADOR, SELEÇÃO, CRUZAMENTO E MUTAÇÃO, sendo todo o ciclo repetido. O programa cessa quando o número de gerações (NGER) pré-definido é alcançado e assim chegamos a uma solução ótima de rugosidades e demandas para o sistema.

5.2.1. Parâmetros dos Algoritmos Genéticos

Assim como proposto por Silva (2003), foram adotados os seguintes parâmetros nas simulações para o processo de calibração, como descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros do AG adotados nas modelagens

Geração da população inicial de soluções	NPOP indivíduos gerados aleatoriamente
Número de gerações (NGER)	1000
Tamanho da população (NPOP)	30 soluções (indivíduos)
Tipo de AG	Geracional Elitista
Tipo de cruzamento	Cruzamento de dois pontos
Probabilidade de cruzamento	0,95
Probabilidade de mutação	0,10
Coefficientes de vazamento (C1 e N1)	$1E^{-05}$ l/s.m e 1,18

5.2.2. Análise do modelo de calibração

A análise do desempenho da calibração será efetuada com base nos critérios estabelecidos pelo Water Research Centre (WRc, 1989 apud SILVA, 2003), para comparação entre os valores observados e os valores simulados de pressão e vazão. Para os valores de vazão, o erro relativo, fornecido pela Equação 5.5, sugere estar dentro da seguinte faixa:

- $\pm 5\%$ de diferença entre os valores observados e simulados, quando esta for maior que 10% da vazão abastecida total;
- $\pm 10\%$ de diferença entre os valores observados e simulados, quando esta for menor que 10% da vazão abastecida total.

Para os valores de pressão, o critério baseia-se no erro absoluto, dado pela diferença entre o valor observado e simulado, e deve apresentar-se dentro das seguintes faixas:

- $\pm 0,5$ m para 85% dos pontos observados;
- $\pm 0,75$ m para 95% dos pontos observados;
- $\pm 2,00$ m para 100% dos pontos observados.

$$\text{Erro relativo}_i = \frac{Z_i - Z_i^*}{Z_i^*} \cdot 100(\%) \quad \text{Equação (5.5)}$$

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

5.3. Implementação de rotina computacional proposta por Silva (2003) a partir dos dados obtidos em Cambuí

Para a rede real do setor de Cambuí (MG) em estudo foram realizadas tentativas de calibrações com os três modelos, o modelo proposto por Silva (2003), o modelo implementado com demanda aleatória e modelo implementado com a demanda dirigida por pressão.

Para uma primeira análise e posterior calibração dos valores de pressões do operador TUCCIARELLI, como recomendado por Soares (2003), é efetuada a calibração da rede real do setor de Cambuí (MG) com os modelos proposto por Silva (2003) e com o implementado com a demanda aleatória.

O número de populações definida para os processos é $NPOP = 30$ e o número de gerações, $NGER$ é equivalente a 1000 para todos os modelos testados.

No operador LEITOR para o modelo proposto por Silva (2003) são lidos como dados de entrada parâmetros como: comprimento e diâmetro de cada trecho, cota topográfica de cada nó, carga piezométrica do reservatório, pressão dos nós de monitoramento, vazão na entrada da rede, consumo dos nós, nós de montante e jusante de cada trecho, número total de nós e trechos do setor e as constantes de vazamentos ($C1 = 1E^{-05}$ l/s.m e $N1=1,18$), adotadas como proposto no modelo proposto por Silva (2003) para o setor real “Monte Carlo”. O arquivo de entrada é alimentado por dados medidos em campo e/ou obtidos junto à companhia de água responsável. Para os modelos implementados, tanto com demanda aleatória quanto com demanda dirigida por pressão, os arquivos de entradas são os mesmo, exceto pelos dados de consumo que deixam de ser lidos e passam a ser gerados, posteriormente.

Após a leitura dos dados o ciclo segue no operador GERADOR para os três modelos, onde aleatoriamente uma solução de rugosidade é gerada dentro do intervalo de 0,5 mm e 10 mm, construindo-se a população inicial das possíveis rugosidades (soluções) dos trechos da rede, exceto pelos trechos 19 e 52 que apresentavam válvulas (30% abertas) optou-se por variar o valor das rugosidades entre 4 e 9 mm. E para os modelos implementados, é gerada uma solução de demandas dentro do intervalo de 0,0004 l/s e 0,06 l/s, no qual a soma dos valores das demandas de cada população deve estar dentro do intervalo de 2,1 a 2,2 l/s, construindo-se a população inicial das possíveis demandas (soluções) dos nós da rede,

intervalos estes que foram baseado nos valores de 3 meses de consumo dos usuários da rede do setor de Cambuí (MG).

No operador seguinte, AVALIADOR, para o modelo proposto por Silva (2003) cuja variável de decisão são as rugosidades absolutas dos trechos e para os dois modelos implementados com a variável de decisão das demandas nodais, os indivíduos das populações iniciais de rugosidades dos trechos e demandas dos nós são avaliados para qualificar aqueles mais adaptados ao problema, segundo o critério da função objetivo definida. Esta avaliação tem como base os valores de pressão obtidos para os nós e valores de vazão na entrada do sistema (ver ANEXO E). Estes valores são resultantes de cálculos hidráulicos feitos com cada indivíduo de rugosidade e demanda da população em questão.

Para modelo implementado com a demanda dirigida por pressão a partir da segunda geração antes de iniciar o operador AVALIADOR, o programa irá passar pelo operador TUCCIARELLI, onde a demanda passará a ser calculada de acordo com o modelo matemático formulado por Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), como apresentado anteriormente, sendo H_i^{des} a carga hidráulicamente mínima desejada igual a 29,00 e H_i^{min} a carga hidráulica mínima igual a 1,79, valores definidos após a calibração com os modelos proposto por Silva (2003) e o implementado com demanda aleatória. Os resultados das calibrações serão apresentados no item 5.4.2.

Além do critério de pressões, assim como na geração aleatória de demandas no GERADOR as demanda geradas aplicando o modelo matemático no TUCCARELLI também deverá obter a soma dos valores de demandas calculados para cada uma das populações dentro do intervalo de 2,1 a 2,2 l/s.

Finalizando o processo da geração da demanda dirigida por pressão no operador TUCCIARELLI o programa segue, assim como para o modelo implementado com a demanda aleatória e para a sua primeira geração, para os operadores: AVALIADOR, SELEÇÃO, CRUZAMENTO E MUTAÇÃO, sendo todo o ciclo repetido.

Para o operador CRUZADOR, a probabilidade de cruzamento é definida como 0,95 e para o operador MUTAÇÃO a probabilidade empregada é de 0,10, quando o número randômico for maior que a probabilidade de mutação o valor de rugosidade irá se alterar dentro do intervalo de 0,5 mm e 10 mm e a demanda irá se alterar dentro do intervalo 0,0004 l/s e 0,06 l/s, respeitando o critério da soma dos valores de demanda.

O programa cessa quando o número de gerações (NGER = 1000) pré-definido para cada um dos modelos é alcançado e assim chegamos a uma solução ótima de rugosidades e demandas para o sistema.

5.4. Simulações computacionais

Os ensaios de calibração foram realizados para uma rede teórica e para duas redes reais. Sendo a última rede real foco do trabalho de campo do trabalho. A Figura 58 apresenta um organograma das simulações realizadas neste trabalho.

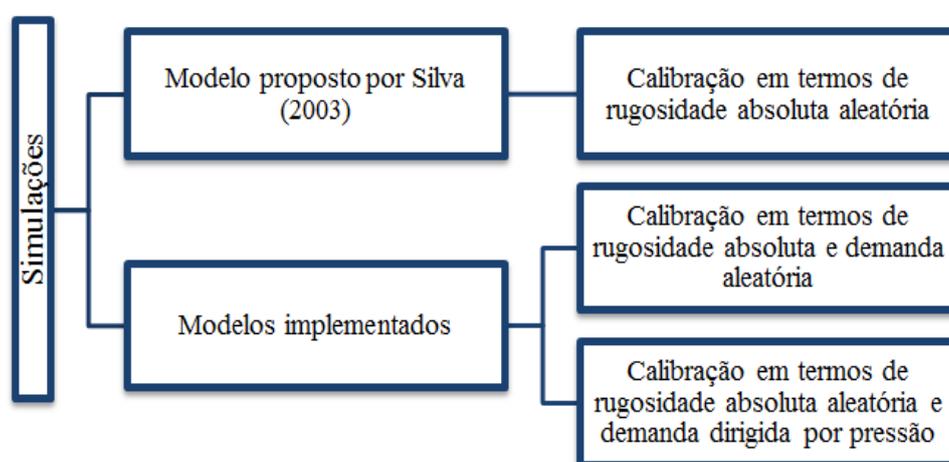


Figura 58 – Organograma das simulações realizadas.

5.4.1. Resultados obtidos para a rede hipotética

A rede hipotética extraída do exemplo simplificado do manual do *software* Epanet 2.0 Brasil foi utilizada para a determinação das rugosidades absolutas dos trechos e na determinação das demandas nodais através do uso do algoritmo genético, a partir de 30 populações aleatórias iniciais distintas.

Utilizou-se para esta rede o AG geracional elitista proposto por Silva (2003), empregando os três modelos de calibração, o proposto por Silva (2003), o implemento com demanda aleatória e o implementado pela calibração dirigida por pressão. O número de iterações foi estabelecido como critério de convergência, sendo adotado um número de 1000 gerações e os mesmos coeficientes de vazamento ($C1 = 1E^{-05}$ l/s.m e $N1=1,18$) adotados por Silva (2003) para o setor real “Monte Carlo” foram empregados .

O modelo matemático de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) foi calibrado para a rede hipotética, adotando-se como valor de carga mínima (H_i^{min}) zero mca e valor de carga desejável (H_i^{des}) igual a 20 mca.

As Figuras 59, 60 e 61 apresentam uma curva típica de evolução da função objetivo ao longo das iterações dos modelos. É possível observar que a convergência para a melhor solução é rapidamente encontrada pelos três modelos ensaiados.

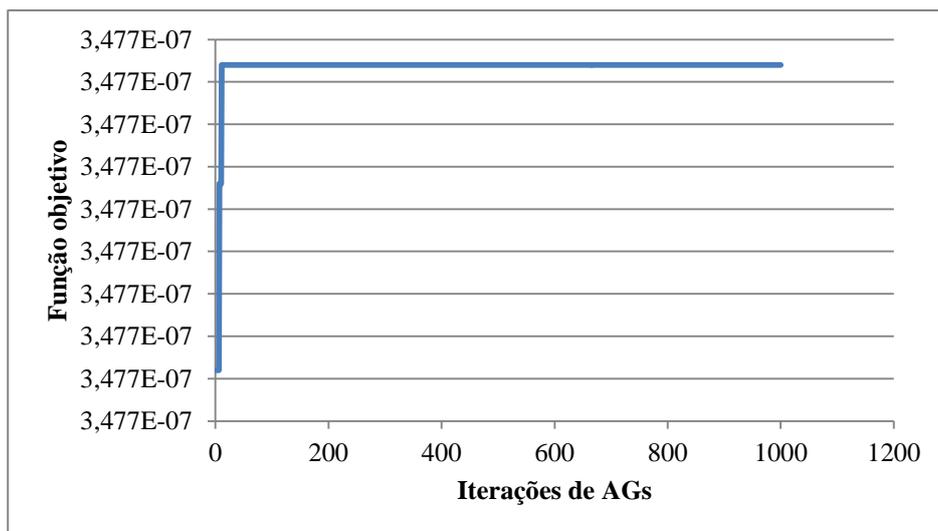


Figura 59 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo proposto por Silva (2003).

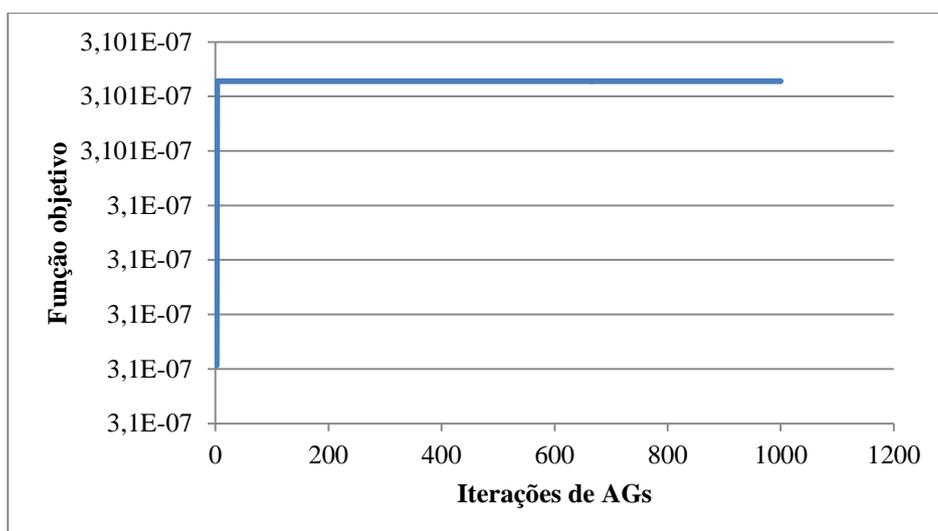


Figura 60 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo com rugosidade e demandas aleatórias.

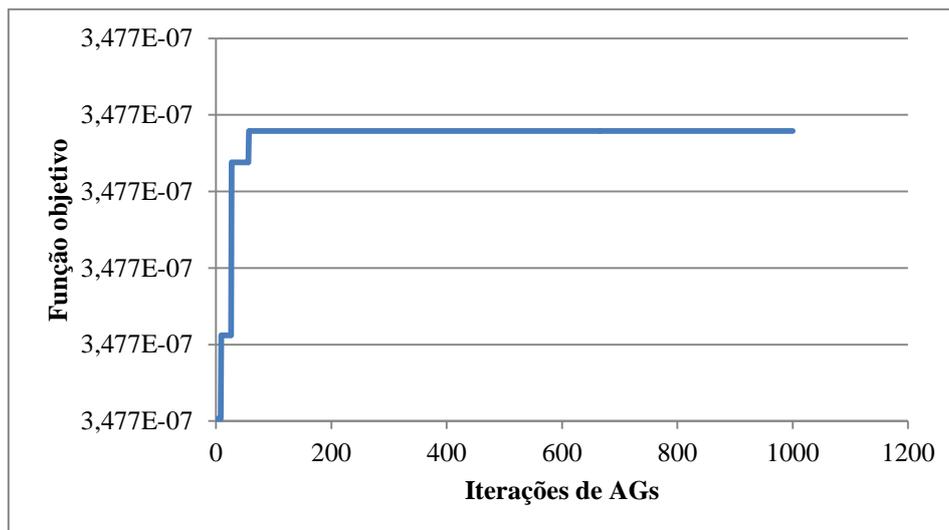


Figura 61 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo com rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão.

Nas Tabelas 7, 8 e 9 são apresentados os valores de pressões e vazões observadas, adotadas como os valores simulados preliminarmente no *software* Epanet, e calculadas para todos os nós da rede, para 3 condições de consumo e para diferentes populações de rugosidades aleatória do modelo proposto por Silva (2003), pelo modelo implementado com a demanda aleatória e pelo modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, respectivamente.

Observa-se que os erros absolutos médios de pressão (obtido subtraindo os valores obtidos no *software* Epanet da média dos valores simulados) apresentam o maior valor de desvio de pressão para a condição de consumo máximo para os três modelos simulados, atingindo 3,16 mca para o modelo implementado com a demanda aleatória, e os menores desvios de pressão são apresentados para a calibração com o modelo proposto por Silva (2003), chegando a 0,02 mca na condição de consumo médio.

Para os valores de vazão, também contidos nas Tabelas 7, 8 e 9, os erros relativos apresentam valores praticamente iguais para as três condições de consumo nos testes com os três modelos, mostrando-se maior para o modelo implementado com demanda aleatória, igual a 5,44 no padrão de consumo médio, e menor para o modelo proposto por Silva (2003), que atinge exatamente o valor da vazão na entrada do sistema. Mas vale ressaltar que para o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão o erro relativo de vazão foi bastante pequeno, chegando a 0,08%.

As diferenças entre os valores de pressão e vazão do *software* Epanet (que assumem neste caso os dados observados de um sistema) e os valores simulados nos processos de calibração apresentam-se bem próximos dos sugeridos nas normas internacionais. Atingindo erro absoluto médio de pressão menor que 0,5 mca para 100% dos pontos no modelo proposto por Silva (2003), menor que 2 mca para 100% dos pontos no modelo implementado com a demanda aleatória e novamente menor que 0,5 mca para 100% dos pontos no modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, no padrão de consumo mínimo.

Tabela 7 – Valores de pressões e vazões simulados no *software* Epanet e obtidos pelo modelo de calibração proposto por Silva (2003)

CONDIÇÃO DE CONSUMO MÁXIMO					
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
	Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3		
2	33,01	33,71	33,64	33,76	0,69
3	26,42	26,64	26,36	27,07	0,27
4	24,77	23,76	24,28	25,05	0,41
5	15,55	14,16	14,43	14,56	1,17
6	20	18,63	18,72	19,72	0,98
7	24,03	23,05	24,06	24,45	0,18
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
	Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3		
Entrada	91,8	91,8	91,8	91,8	0
CONDIÇÃO DE CONSUMO MÉDIO					
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
	Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3		
2	33,63	34,19	34,14	34,23	0,56
3	29,05	29,35	29,14	29,67	0,34
4	28,7	28,17	28,56	29,13	0,08
5	21,14	20,45	20,65	20,76	0,52
6	24,1	23,32	23,39	24,13	0,49
7	26,75	26,17	26,92	27,21	0,02
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
	Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3		
Entrada	79,56	79,56	79,56	79,56	0
CONDIÇÃO DE CONSUMO MÍNIMO					
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
	Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3		
2	35,85	35,91	35,91	35,91	0,06
3	37,4	37,51	37,51	37,53	0,12
4	41,09	41,22	41,24	41,27	0,15
5	38,68	38,9	38,91	38,91	0,23
6	37,04	37,18	37,18	37,22	0,15
7	35,38	36,46	35,49	35,5	0,44
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
	Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3		
Entrada	18,36	18,36	18,36	18,36	0

Tabela 8 – Valores de pressões e vazões simulados no *software* Epanet e obtidos pelo modelo de calibração implementado com demanda aleatória

CONDIÇÃO DE CONSUMO MÁXIMO				
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
	Pop. Aleat. 1		Pop. Aleat. 2	
2	33,01	32,28	32,36	0,69
3	26,42	22,02	25,97	2,43
4	24,77	19,83	23,4	3,16
5	15,55	16,87	15,62	0,7
6	20	19,23	18,69	1,04
7	24,03	27,19	27,39	3,26
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
	Pop. Aleat. 1		Pop. Aleat. 2	
Entrada	91,8	81,88	91,75	5,43
CONDIÇÃO DE CONSUMO MÉDIO				
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
	Pop. Aleat. 1		Pop. Aleat. 2	
2	33,63	32,7	32,76	0,9
3	29,05	25,45	28,43	2,11
4	28,7	24,8	27,48	2,56
5	21,14	22,07	21,13	0,46
6	24,1	23,36	22,95	0,95
7	26,75	28,87	29,01	2,19
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
	Pop. Aleat. 1		Pop. Aleat. 2	
Entrada	79,56	70,96	79,51	5,44
CONDIÇÃO DE CONSUMO MÍNIMO				
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
	Pop. Aleat. 1		Pop. Aleat. 2	
2	35,85	33,92	33,92	1,93
3	37,4	35,39	35,55	1,93
4	41,09	39,13	39,28	1,89
5	38,68	37,09	37,04	1,62
6	37,04	35,28	35,25	1,78
7	35,38	33,7	33,71	1,68
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
	Pop. Aleat. 1		Pop. Aleat. 2	
Entrada	18,36	16,38	18,35	5,42

Tabela 9 – Valores de pressões e vazões simulados no *software* Epanet e obtidos pelo modelo de calibração implementado com demanda dirigida por pressão

CONDIÇÃO DE CONSUMO MÁXIMO						
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
		Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3	Pop. Aleat. 4	
2	33,01	33,81	33,13	34,06	33,9	0,72
3	26,42	24,51	24,5	27,28	26,47	0,73
4	24,77	20,33	21,43	22,46	24,32	2,64
5	15,55	16,33	15,23	15,9	15,85	0,28
6	20	20,45	17	18,72	18,93	1,23
7	24,03	27,88	26,15	26,21	26,77	2,72
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
		Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3	Pop. Aleat. 4	
Entrada	91,8	92,05	91,69	91,87	91,89	0,08
CONDIÇÃO DE CONSUMO MÉDIO						
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
		Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3	Pop. Aleat. 4	
2	33,63	34,27	33,76	34,45	34,33	0,57
3	29,05	27,77	27,74	29,83	29,23	0,41
4	28,7	25,61	26,43	27,2	28,6	1,74
5	21,14	22,11	21,27	21,77	21,74	0,58
6	24,1	24,71	22,1	23,39	23,56	0,66
7	26,75	29,8	28,49	28,55	28,97	2,2
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
		Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3	Pop. Aleat. 4	
Entrada	79,56	79,77	79,47	79,62	79,64	0,08
CONDIÇÃO DE CONSUMO MÍNIMO						
NÓ	PRESSÃO EPANET (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	PRESSÃO SIMULADA (mca)	ERRO ABSOLUTO MÉDIO (mca)
		Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3	Pop. Aleat. 4	
2	35,85	35,91	35,88	35,92	35,91	0,05
3	37,4	37,45	37,44	37,54	37,51	0,09
4	41,09	41,11	41,14	41,17	41,26	0,08
5	38,68	39,02	38,96	38,99	38,99	0,31
6	37,04	37,27	37,12	37,19	37,2	0,16
7	35,38	35,66	35,58	35,59	35,62	0,23
NÓ	VAZÃO EPANET (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	VAZÃO SIMULADA (l/s)	ERRO RELATIVO MÉDIO (%)
		Pop. Aleat. 1	Pop. Aleat. 2	Pop. Aleat. 3	Pop. Aleat. 4	
Entrada	18,36	18,41	18,34	18,37	18,38	0,08

Nas Tabelas 10, 11, 12 são apresentados os valores de rugosidades obtidos a partir de diferentes populações aleatórias iniciais para cada um dos modelos. E nas Tabelas 13 e 14 são apresentados valores de demandas obtidos a partir de diferentes populações aleatórias iniciais, para os modelos implementados com a demanda aleatória e com a demanda dirigida por pressão, respectivamente.

Os valores de rugosidades e demandas gerados pelos modelos apresentam valores maiores que os dados sugeridos no exemplo do Manual do *software* Epanet, mas pode-se observar que, mesmo os conjuntos de rugosidades e demandas sejam distintos eles resultam em valores de pressões e vazões simulados próximos aos valores obtidos preliminarmente no *software* Epanet, que assume os dados de campo neste caso da rede hipotética.

Tabela 10 – Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de calibração proposto por Silva (2003) para três diferentes populações aleatórias

TRECHO	Dados de Rugosidade do Manual Epanet (mm)	Pop. Aleat. 1 Rugosidade (mm)	Pop. Aleat. 2 Rugosidade (mm)	Pop. Aleat. 3 Rugosidade (mm)
1	0,06	0,40	0,45	0,36
2	0,03	0,08	0,10	0,08
3	0,03	0,23	0,13	0,10
4	0,03	0,34	0,11	0,08
5	0,03	0,14	0,23	0,33
6	0,03	0,28	0,08	0,06
7	0,03	0,07	0,18	0,46
8	0,03	0,49	0,49	0,19

Tabela 11 – Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de calibração implementado com demanda aleatória para duas diferentes populações aleatórias

TRECHO	Dados de Rugosidade do Manual Epanet (mm)	Pop. Aleat. 1 Rugosidade (mm)	Pop. Aleat. 2 Rugosidade (mm)
1	0,06	0,40	0,10
2	0,03	0,08	0,07
3	0,03	0,23	0,29
4	0,03	0,34	0,29
5	0,03	0,14	0,31
6	0,03	0,28	0,30
7	0,03	0,07	0,23
8	0,03	0,49	0,41

Tabela 12 – Comparação de valores de rugosidades obtidos pelo modelo de calibração implementado com a demanda dirigida por pressão para quatro diferentes populações aleatórias

TRECHO	Dados de Rugosidade do Manual Epanet (mm)	Pop. Aleat. 1 Rugosidade (mm)	Pop. Aleat. 2 Rugosidade (mm)	Pop. Aleat. 3 Rugosidade (mm)	Pop. Aleat. 4 Rugosidade (mm)
1	0,06	0,31	1,03	0,17	0,26
2	0,03	0,45	0,17	0,08	0,14
3	0,03	0,19	0,09	0,45	0,47
4	0,03	0,49	0,34	0,49	0,49
5	0,03	0,30	0,36	0,42	0,31
6	0,03	0,20	0,11	0,50	5,29
7	0,03	0,40	0,21	0,31	0,22
8	0,03	0,44	0,46	0,35	0,27

Tabela 13 – Comparação de valores de demanda obtidos pelo modelo de calibração implementado com a demanda aleatória para duas diferentes populações aleatórias

Nó	Dados de Demanda do Manual Epanet (l/s)	Pop. Aleat. 1 Demanda (l/s)	Pop. Aleat. 2 Demanda (l/s)
2	11,80	8,24	20,18
3	6,40	15,59	7,40
4	5,20	7,03	5,66
5	8,90	5,64	7,17
6	8,70	6,04	9,63
7	20,20	12,05	11,13

Tabela 14 – Comparação de valores de demanda obtidos pelo modelo de calibração implementado com a demanda dirigida por pressão para quatro diferentes populações aleatórias

Nó	Dados de Demanda do Manual Epanet (l/s)	Pop. Aleat. 1 Demanda (l/s)	Pop. Aleat. 2 Demanda (l/s)	Pop. Aleat. 3 Demanda (l/s)	Pop. Aleat. 4 Demanda (l/s)
2	11,80	19,64	14,09	17,18	18,63
3	6,40	7,85	8,00	6,39	7,69
4	5,20	7,19	5,93	6,88	5,91
5	8,90	6,06	6,50	6,39	6,09
6	8,70	6,89	10,12	10,08	9,81
7	20,20	13,73	16,48	14,31	13,11

5.4.2. Resultados obtidos para a rede real do setor “Monte Carlo”

Para os ensaios de calibração efetuados no setor “Monte Carlo”, que foi uma das redes focos do estudo de Silva (2003), consideraram-se os três modelos de calibração, primeiro a simulação no modelo proposto por Silva (2003) e posteriormente validou-se os modelos implementados para a rede real. Assim, as variáveis de decisão na primeira calibração compreendem as rugosidades absolutas dos trechos e nas demais as rugosidades absolutas e as demandas dos nós, demandas aleatórias e dirigidas por pressão, respectivamente. O número de iterações foi estabelecido como critério de convergência, sendo adotado um número de 1000 gerações e os mesmos coeficientes de vazamento ($C1 = 1E^{-05}$ l/s.m e $N1=1,18$) adotados no trabalho de Silva (2003) para o setor real “Monte Carlo” foram empregados.

As Figuras 62, 63 e 64 apresentam uma curva típica da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo proposto por Silva (2003), do modelo implementado com a demanda aleatória e do modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, respectivamente.

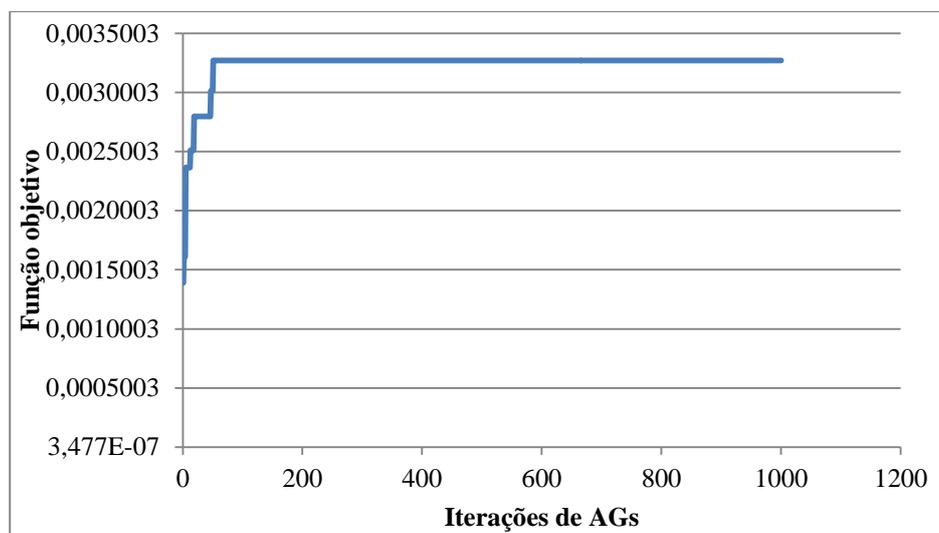


Figura 62 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG proposto por Silva (2003).

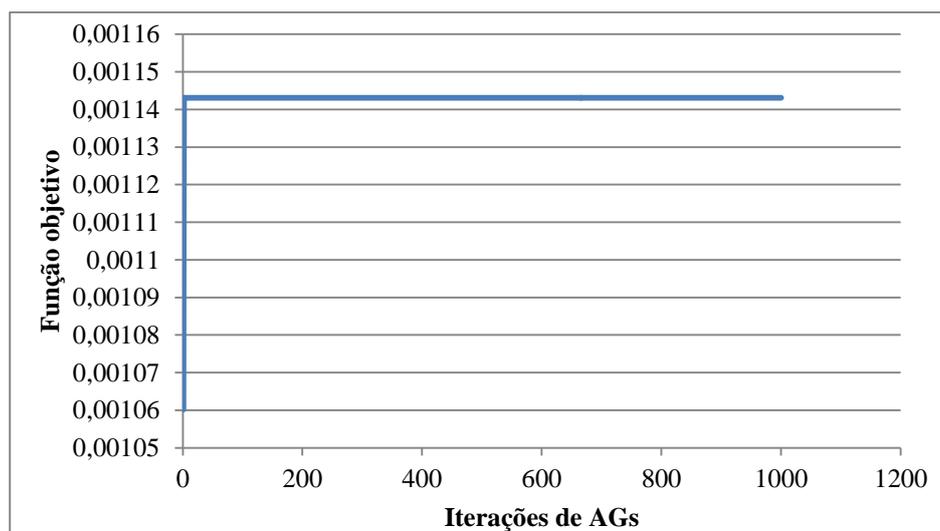


Figura 63 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG com rugosidade e demandas aleatórias.

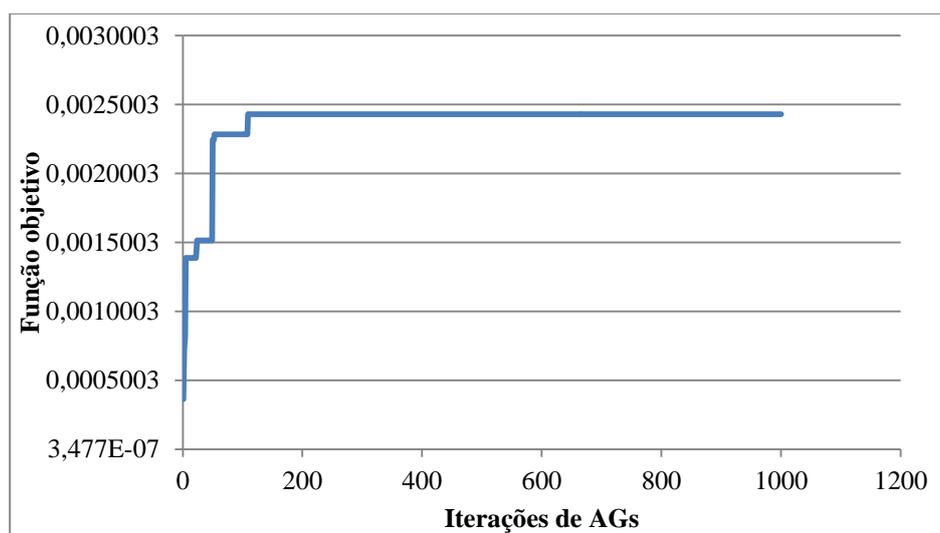


Figura 64 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG com rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão.

Para as análises dos resultados dos modelos proposto por Silva (2003), do implementado com a demanda aleatória e do implementado com a demanda dirigida por pressão, foram encontradas 7, 2 e 10 melhores populações aleatórias distintas, respectivamente.

Nas Figuras 65, 66 e 67 são apresentados os maiores valores obtidos das funções objetivos para todas as populações aleatórias. Os valores situam-se dentro das faixas:

- 0,0014 a 0,0033 para o modelo proposto por Silva (2003);
- 0,0010 a 0,0011 para o modelo em termos de rugosidade e demanda aleatória; e
- 0,0003 a 0,0024 para o modelo em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão.

Nota-se que a faixa de valores diminui para o modelo implementado com a demanda aleatória e aumenta para o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão. Mas todas são consideradas relativamente pequenas, conferindo certa consistência aos resultados.

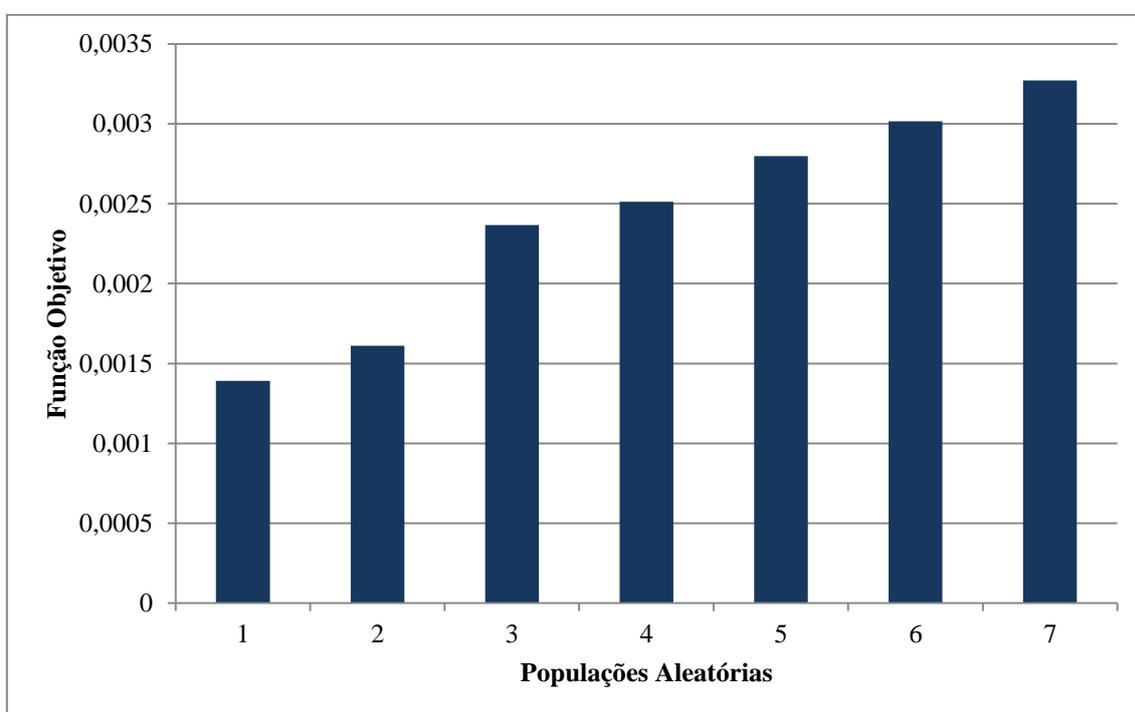


Figura 65 – Maiores valores das funções objetivas obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias iniciais distintas.

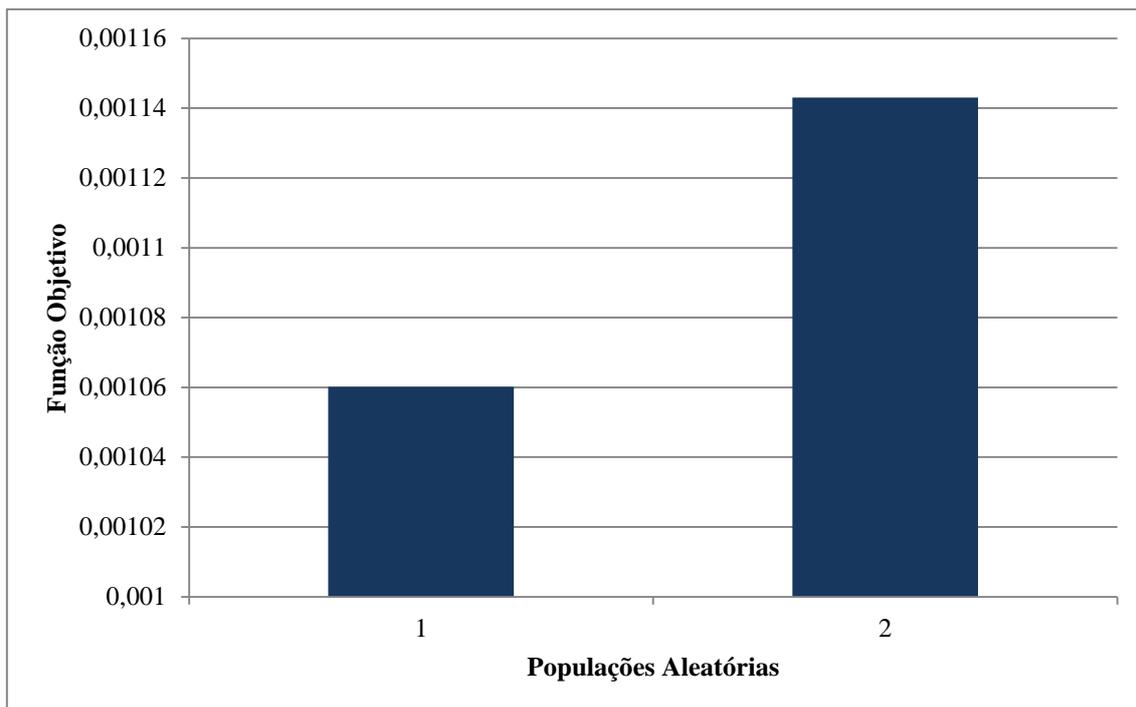


Figura 66 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias e demandas aleatórias iniciais distintas.

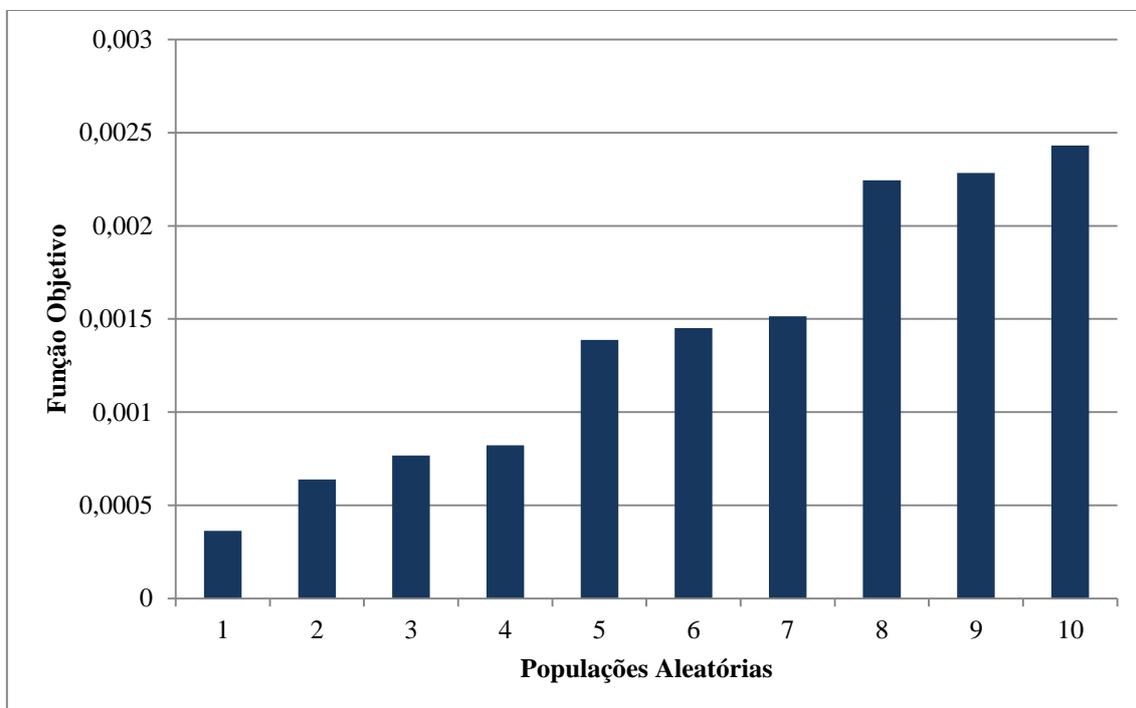


Figura 67 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias e demandas dirigidas por pressão distintas.

Cada um dos modelos estudados na rede foi testado com 4 sementes aleatórias distintas, a fim de confirmar a confiabilidade dos resultados. As Figuras 68 e 69 apresentam a variação dos valores de rugosidade e demanda para cada uma das sementes aleatórias.

Em geral ao analisar a Figura 68, relativa aos valores de rugosidades para 3 trechos escolhidos ao acaso entre o conjunto de trechos da rede, nota-se que as rugosidades têm seus valores relativamente bem definidos para cada um das sementes aleatórias testadas nos modelos e que os valores das rugosidades dos trechos são menores para os modelos com estudo de demanda, onde o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão apresenta valores inferiores.

Verificando a Figura 69 observa-se que os valores de demanda mostram-se na maioria das vezes também menores para os modelos implementados, quando comparados com os valores baseados em dados de campo de Silva (2003).

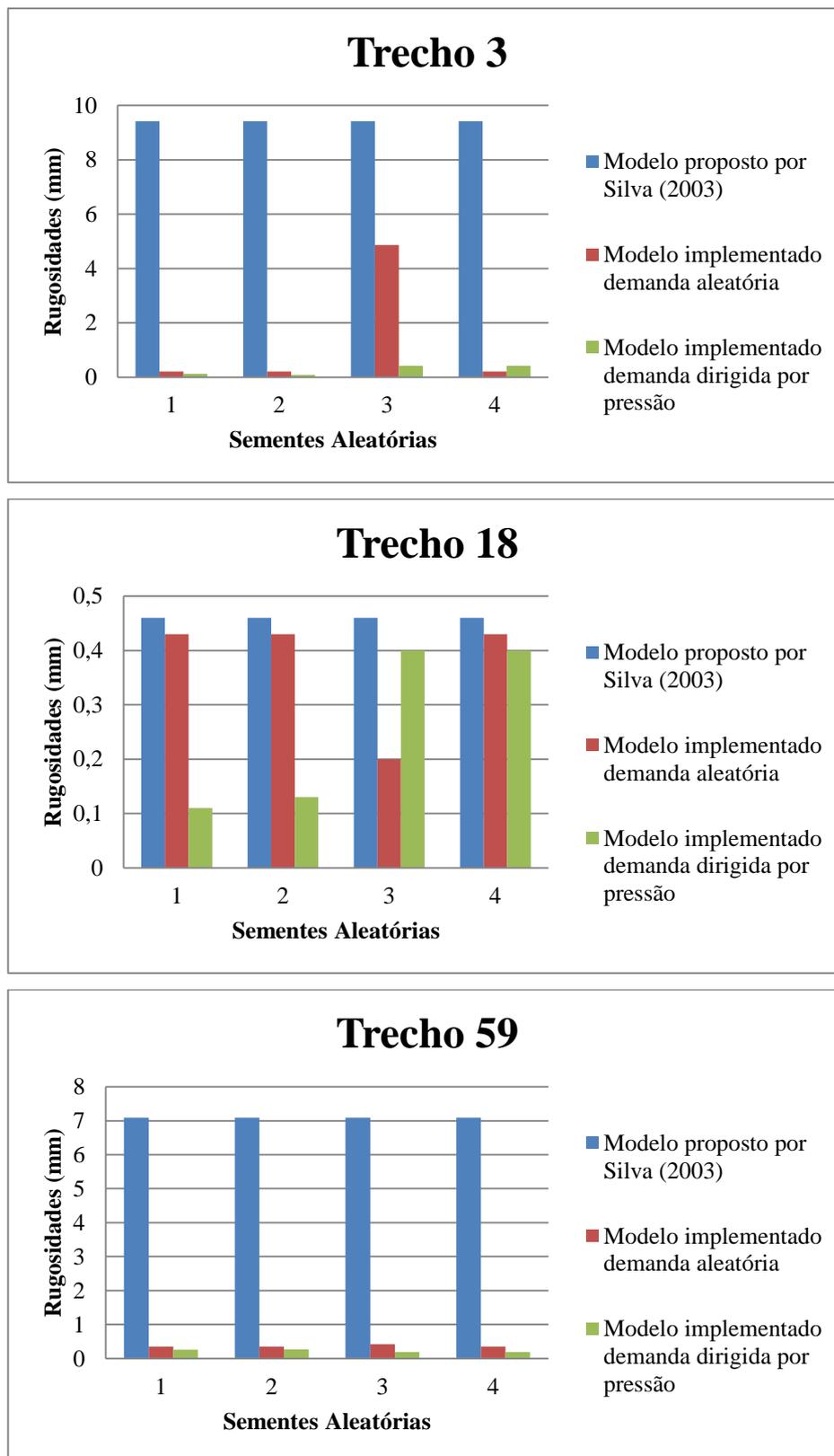


Figura 68 – Variação das rugosidades atribuídas aos trechos 3, 18 e 59 para cada semente aleatória testada – Modelo proposto por Silva (2003) e modelos implementados com demanda aleatória e demanda dirigida por pressão.

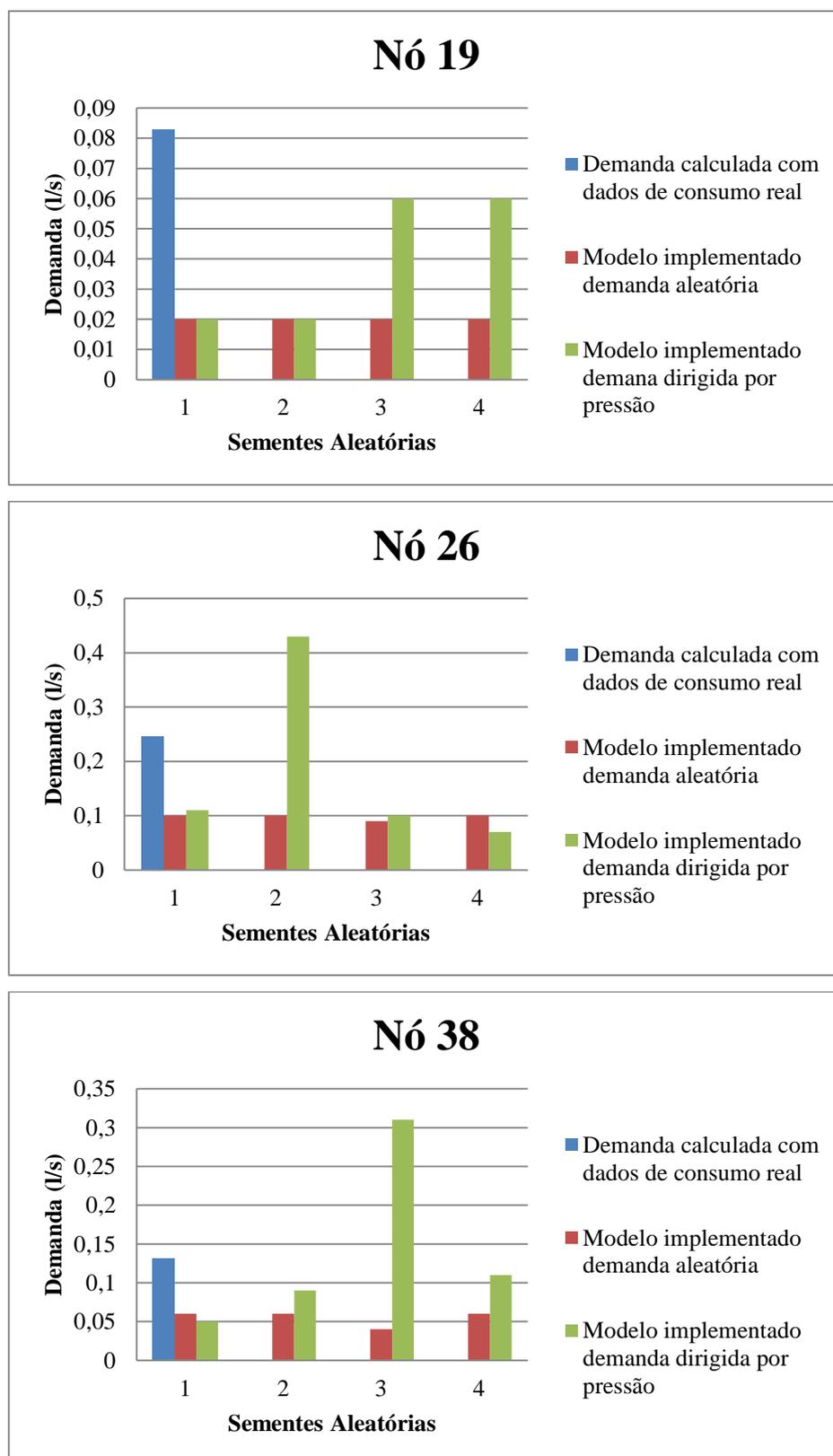


Figura 69 – Variação das demandas atribuídas aos nós 19, 26 e 38 para cada semente aleatória testada – Modelos implementados com demanda aleatória e demanda dirigida por pressão.

As Figuras 70, 71 e 72 permitem a comparação entre as pressões observadas e simuladas para os três padrões de consumo e para as populações aleatórias distintas resultantes do modelo proposto por Silva (2003), do modelo implementado com a demanda aleatória e do modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, respectivamente.

De maneira geral os resultados entre os valores observados e os valores simulados nos três modelos apresentam uma diferença baixa entre os valores, no qual os melhores valores são relativos à condição de consumo mínimo (padrão 3). Constatase também que as pressões simuladas para as diferentes populações aleatórias possuem valores muito próximos.

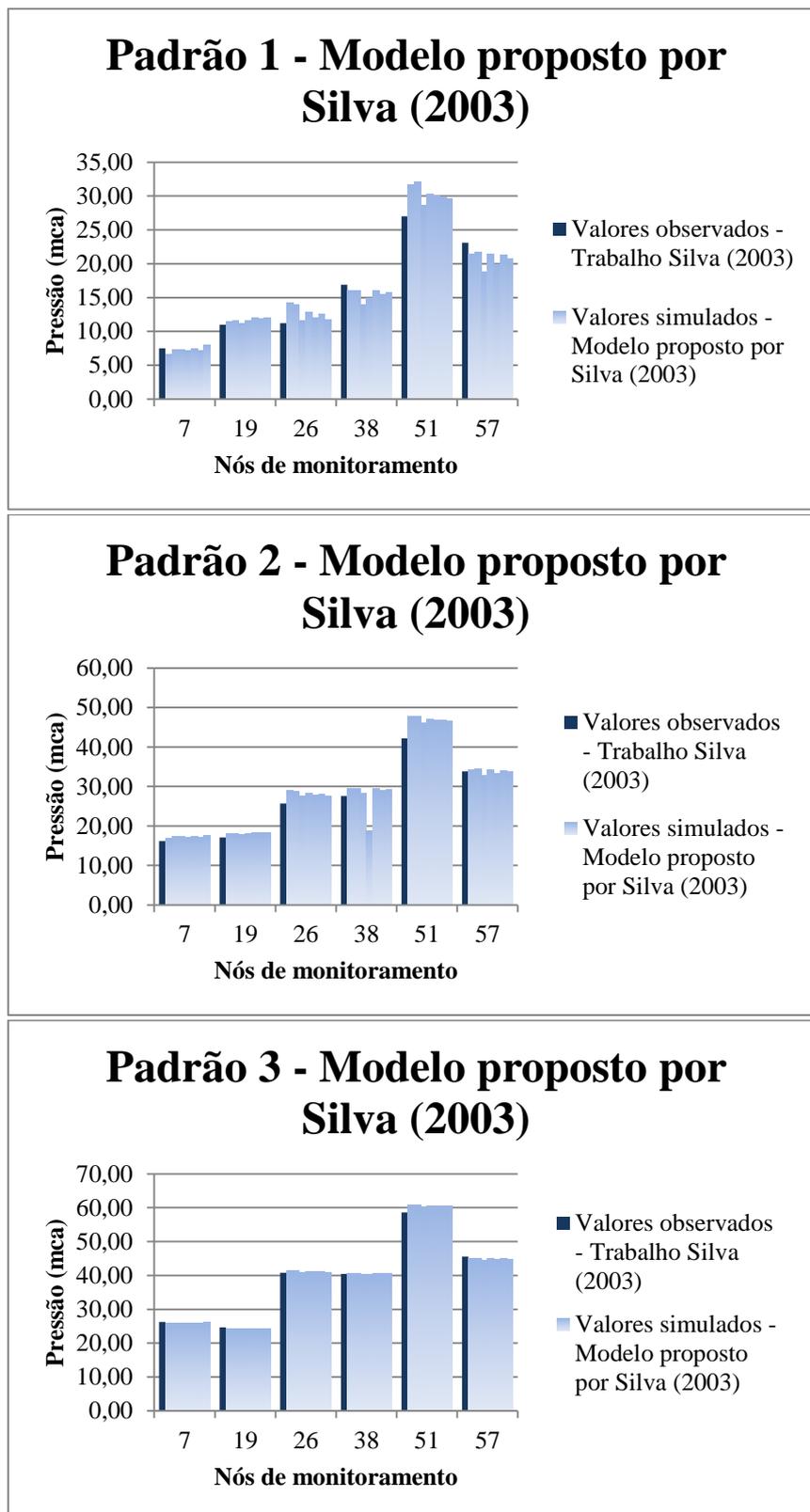


Figura 70 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para os três padrões de consumo para o modelo proposto por Silva (2003).

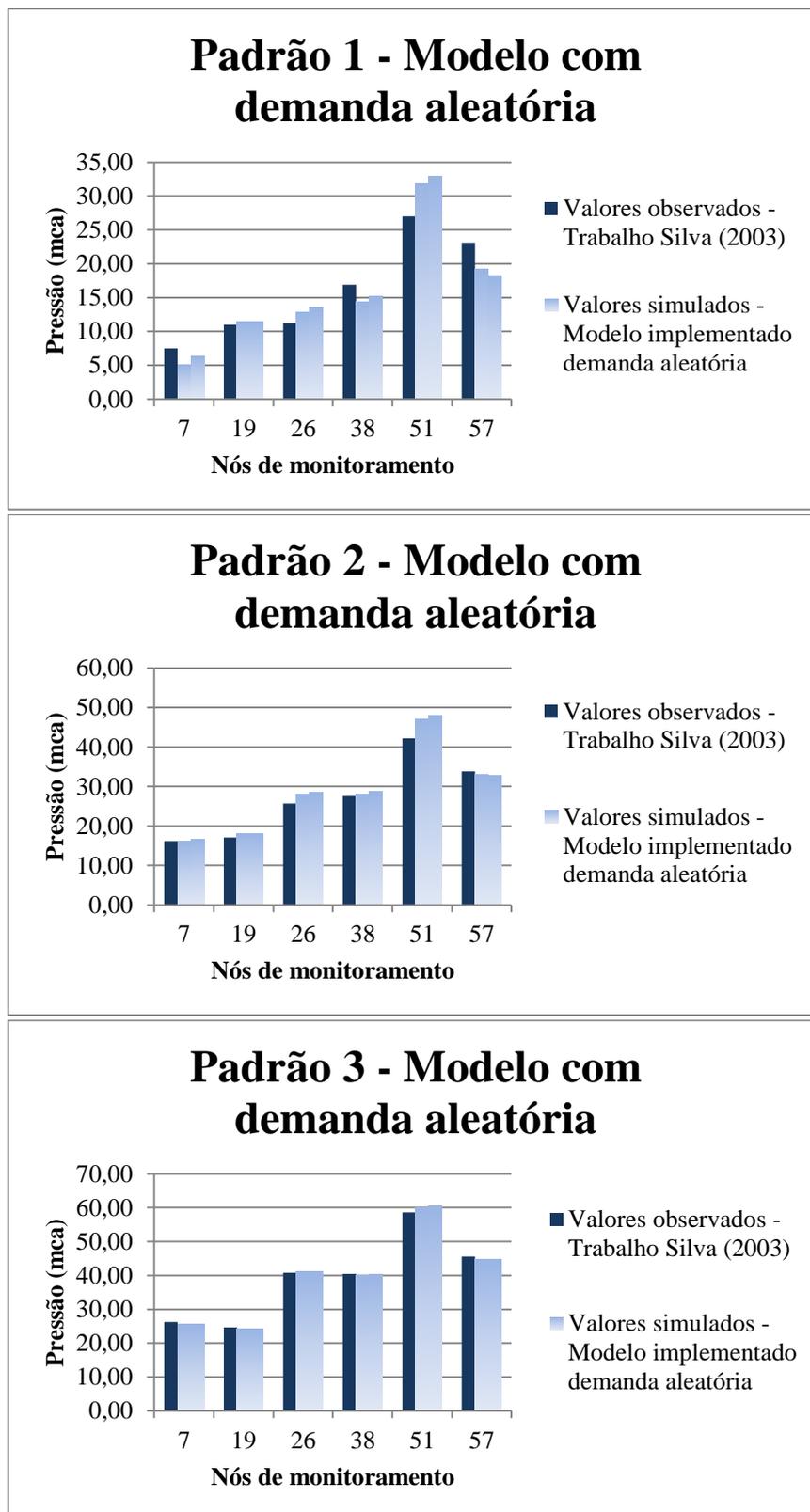


Figura 71 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para os três padrões de consumo para o modelo implementado com demanda aleatória.

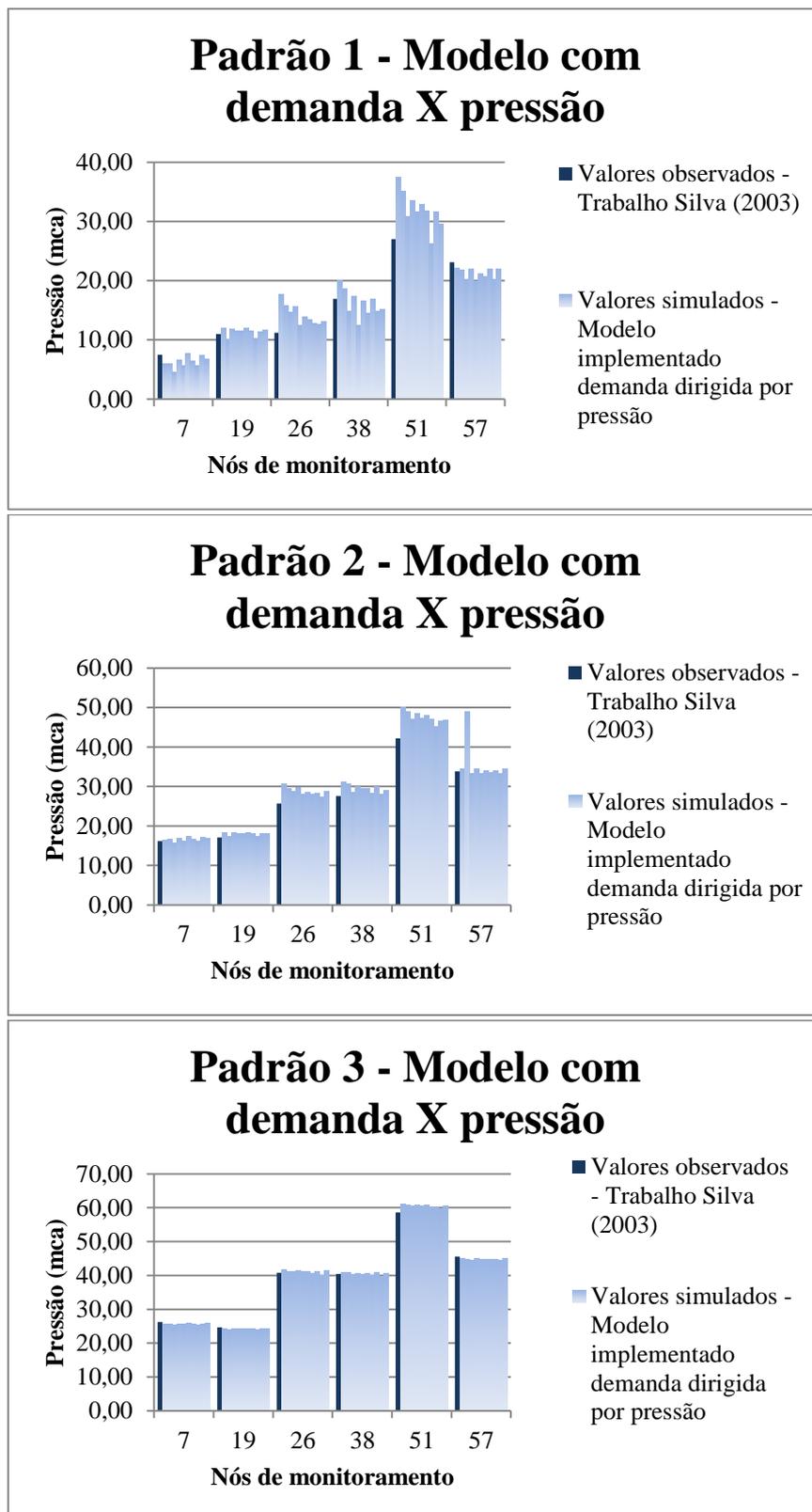


Figura 72 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para os três padrões de consumo para o modelo implementado com demanda dirigida por pressão.

A Figura 73 permite a comparação entre os resultados de vazão observados e simulados pelos modelos. O ponto de medida da vazão no setor foi localizado na entrada do mesmo.

Observa-se, para todos os modelos de calibração testados, que para os padrões de consumo máximo e médio os valores praticamente se igualam e que as maiores diferenças entre os valores simulados e observados são referentes ao padrão de consumo mínimo chegando a aproximadamente a 1,00 l/s.

Silva (2003) explica que o fato do melhor comportamento ao padrão de consumo máximo é devido às perdas de carga ser maiores para esta condição, e com isto a sensibilidade de resposta.

Apesar de no geral os valores dos parâmetros de pressão e vazão simulados e observados apresentarem-se próximos, alguns pontos podem ser considerados regulares, como é o caso do ajuste dos valores de vazões para a condição de consumo mínimo, que de acordo com Silva (2003) pode ser justificado pelo uso de coeficientes de vazamentos.

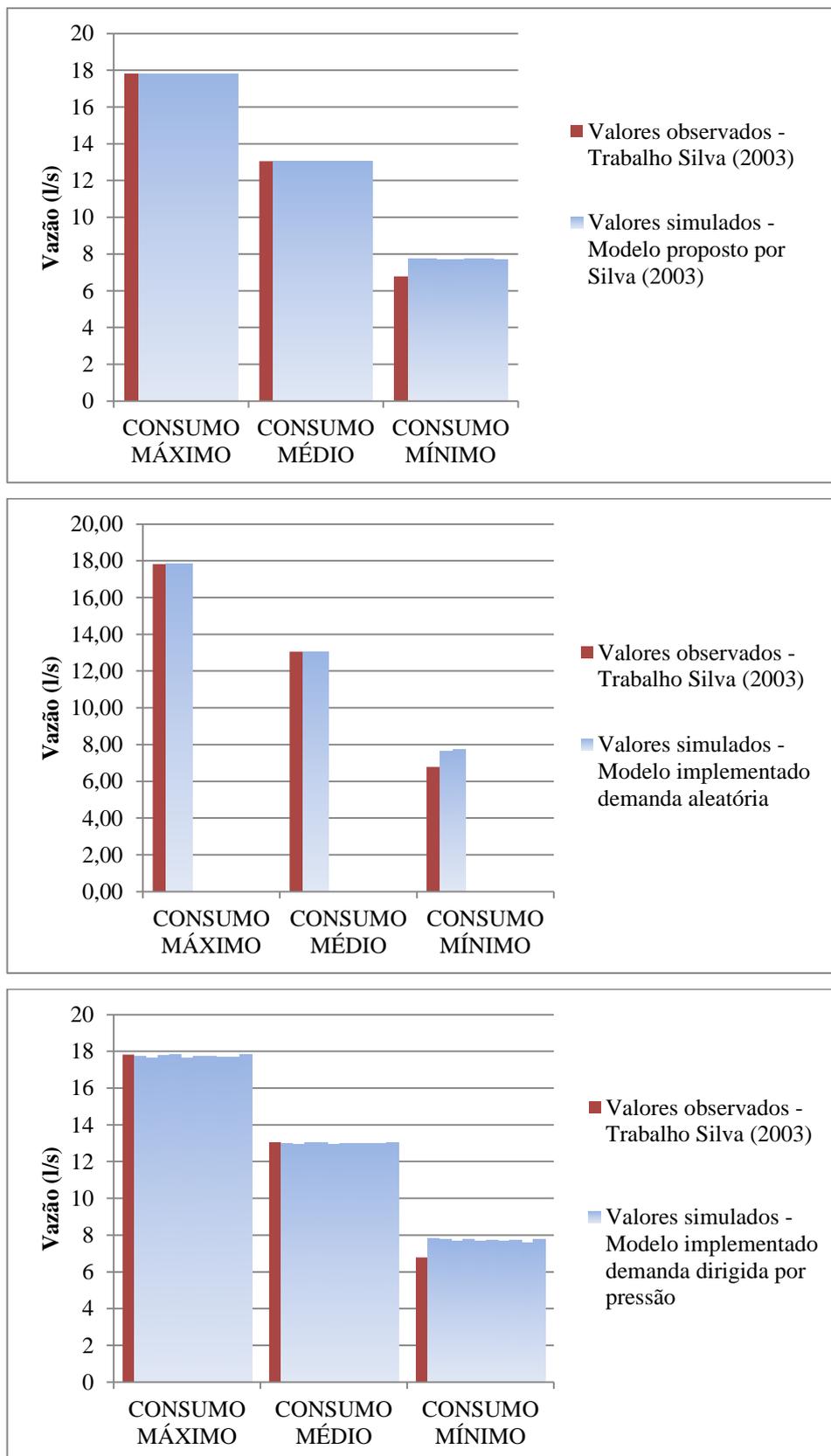


Figura 73 – Vazões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias na entrada da rede, para os três padrões de consumo e para os três modelos.

Nas Figuras 74 e 75 estão representados os erros absolutos dos valores de pressão e os erros relativos dos valores de vazões obtidos para cada um dos modelos testados, respectivamente.

Constata-se que para os padrões de consumo estudados os erros absolutos de pressão mostram-se com um comportamento similar para os três modelos testados, apresentando os maiores erros para os padrões de consumo máximo e médio e ainda sendo constatados maiores erros para o nó 51. Para o padrão de consumo mínimo, como visto anteriormente, os resultados entre os valores observados e os valores simulados nos três modelos apresentam uma diferença baixa entre os valores, em 80% dos pontos o erro absoluto médio de pressão é menor que 0,5 mca para o modelo proposto por Silva (2003), também em 80% dos pontos o erro é menor que 0,75 mca para o modelo implementado com a demanda aleatória e em 70% dos pontos o erro é menor que 0,75 mca para o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão.

Com relação aos erros relativos dos valores de vazão os modelos apresentam erro menor para o padrão 1 e padrão 2 de consumo, já no padrão 3 o valor do erro relativo é um pouco maior, aproximadamente 13,82% para os três modelos testados.

Assim, as diferenças entre os valores de pressão e vazão observados e simulados nos processos de calibração apresentam-se bem próximos dos sugeridos nas normas internacionais.

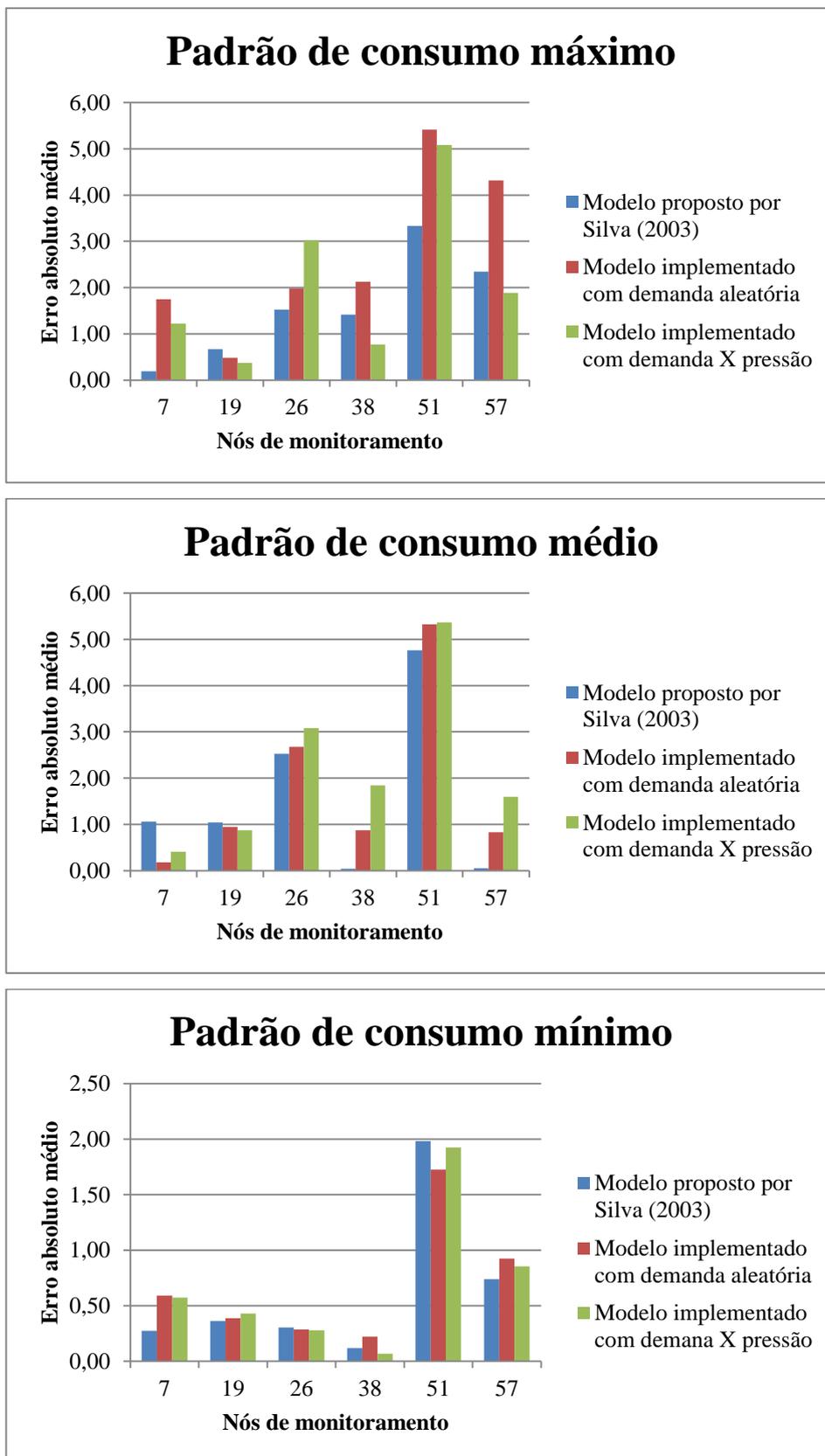


Figura 74 – Erros absolutos médios dos valores de pressão observado e simulado, para os três padrões de consumo e para os três modelos.

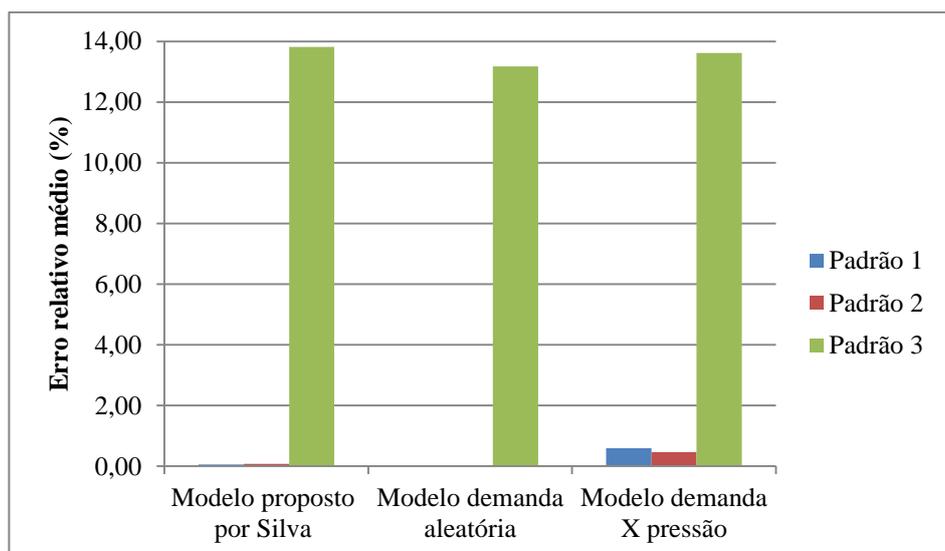


Figura 75 – Erro relativo médio dos valores de vazões observadas e simulados, para os três padrões de consumo e para os três modelos.

5.4.3. Resultados obtidos para a rede real do setor de Cambuí

As tentativas de calibração efetuadas para a rede real do setor de Cambuí (MG), consideraram-se os três modelos de calibração em análise, primeiro a simulação no modelo proposto por Silva (2003) e posteriormente os modelos implementados. Assim, as variáveis de decisão na primeira calibração compreendem as rugosidades absolutas dos trechos, e nas demais as rugosidades absolutas e as demandas dos nós, demandas aleatórias e demandas dirigidas por pressão, respectivamente. O número de iterações foi estabelecido como critério de convergência, sendo adotado um número de 1000 gerações e os mesmos coeficientes de vazamento ($C1 = 1E^{-05}$ l/s.m e $N1=1,18$) adotados por Silva (2003) para o setor real “Monte Carlo” foram empregados novamente para este sistema.

Entre os ensaios realizados com os modelos para esta rede não se alcançou os resultados esperados para o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão, isto porque o modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) não conseguiu obter valores de consumos nodais cuja a soma obedecessem o critério do intervalo estipulado de 2,1 e 2,2 l/s. E aumentar este intervalo não seria uma opção positiva já que os resultados da função objetivo pioraram.

Ainda para esta rede foi validada os ensaios dos modelos apenas para o primeiro padrão de consumo (consumo máximo), fato este que pode ser explicado pela baixa vazão na

entrada do sistema e pela pouca sensibilidade do sistema a variação dos consumos residenciais durante todo o dia.

As Figuras 76 e 77 apresentam uma curva típica da evolução da função objetivo ao longo das iterações do modelo proposto por Silva (2003) e do modelo em termos de rugosidade e demanda aleatória. Nota-se que para ambos os modelos a convergência da solução é rapidamente encontrada, não havendo melhora dos valores da função objetivo após aproximadamente a 20^a geração.

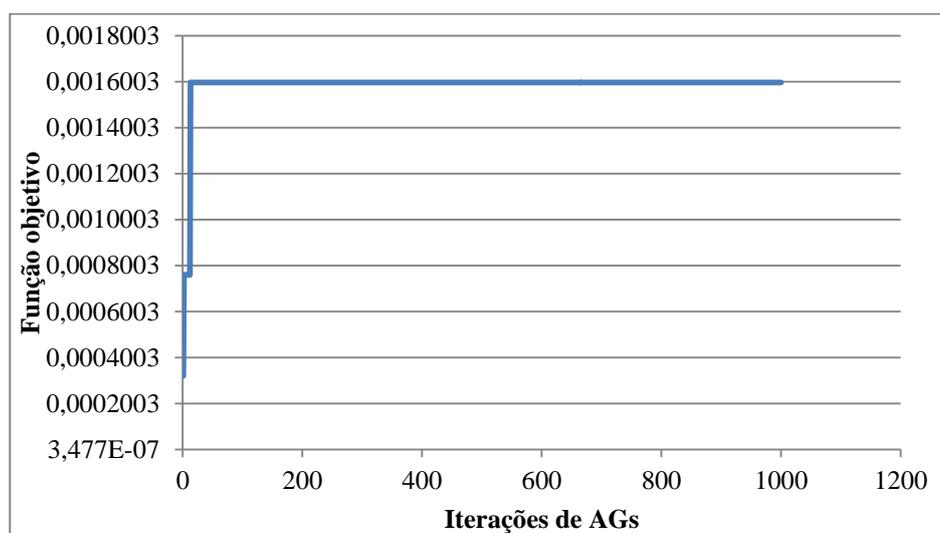


Figura 76 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG proposto por Silva (2003).

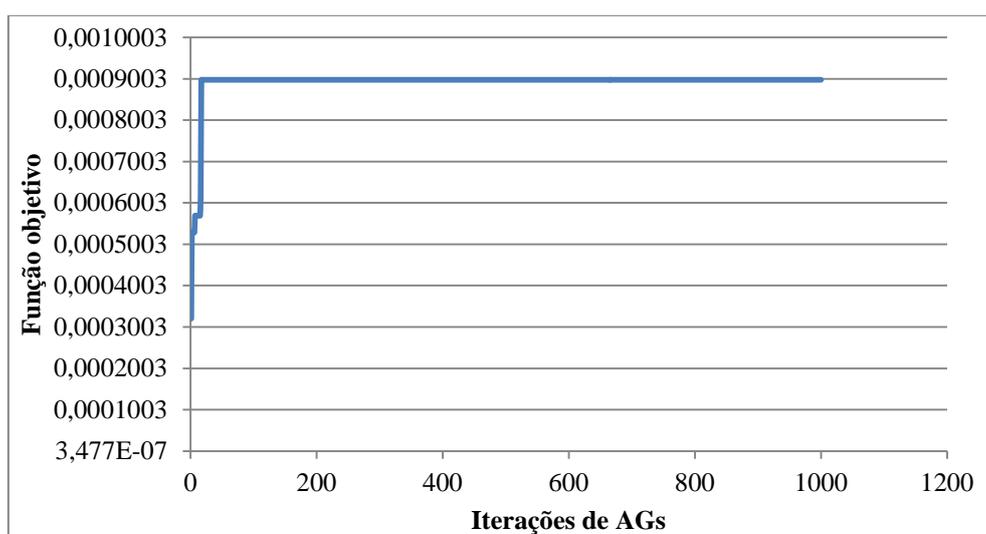


Figura 77 – Formato geral da evolução da função objetivo ao longo das iterações do AG com rugosidade e demandas aleatórias.

Foram consideradas 3 e 5 melhores populações aleatórias distintas, nas análises dos resultados dos modelos proposto por Silva (2003) e do AG implementado com a demanda aleatória, respectivamente. São apresentados nas Figuras 78 e 79 os maiores valores obtidos das funções objetivos para todas as populações aleatórias. Os valores encontram-se dentro das faixas:

- 0,00032 a 0,00016 para o Modelo proposto por Silva (2003); e
- 0,00032 a 0,00090 para o Modelo em termos de rugosidade e demanda aleatória.

Observa-se que o valor inicial da função objetivo para ambos os modelos é o mesmo, obtendo um valor final maior para o modelo implementado com a demanda aleatória.

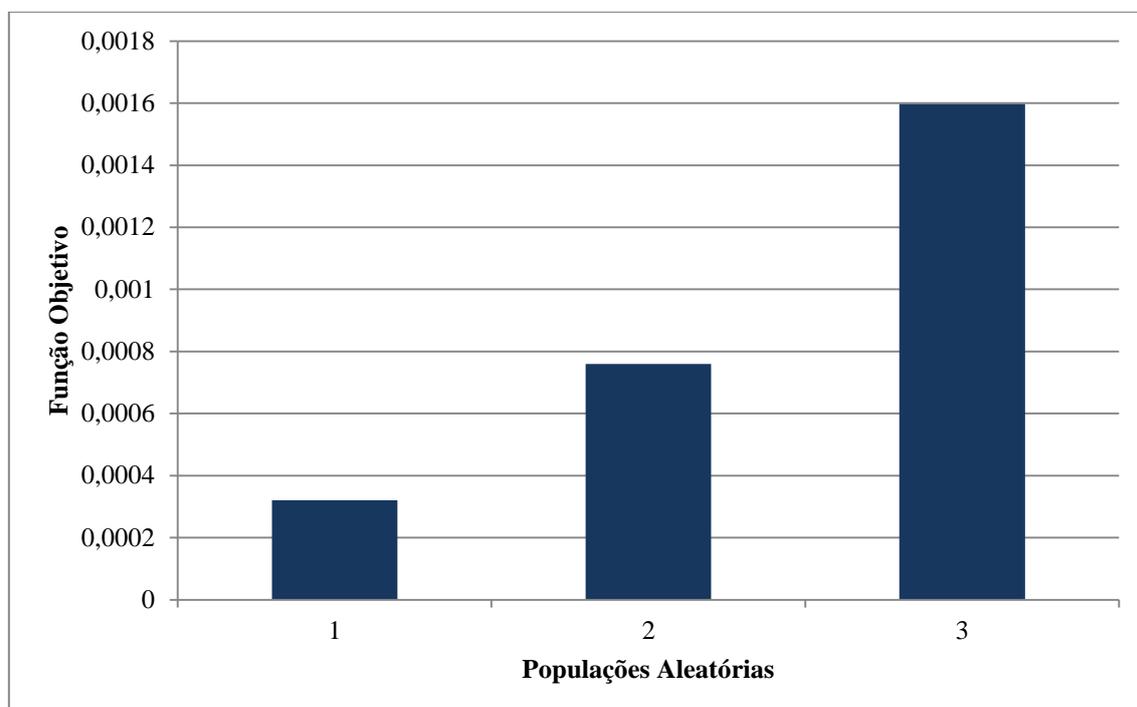


Figura 78 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias iniciais distintas.

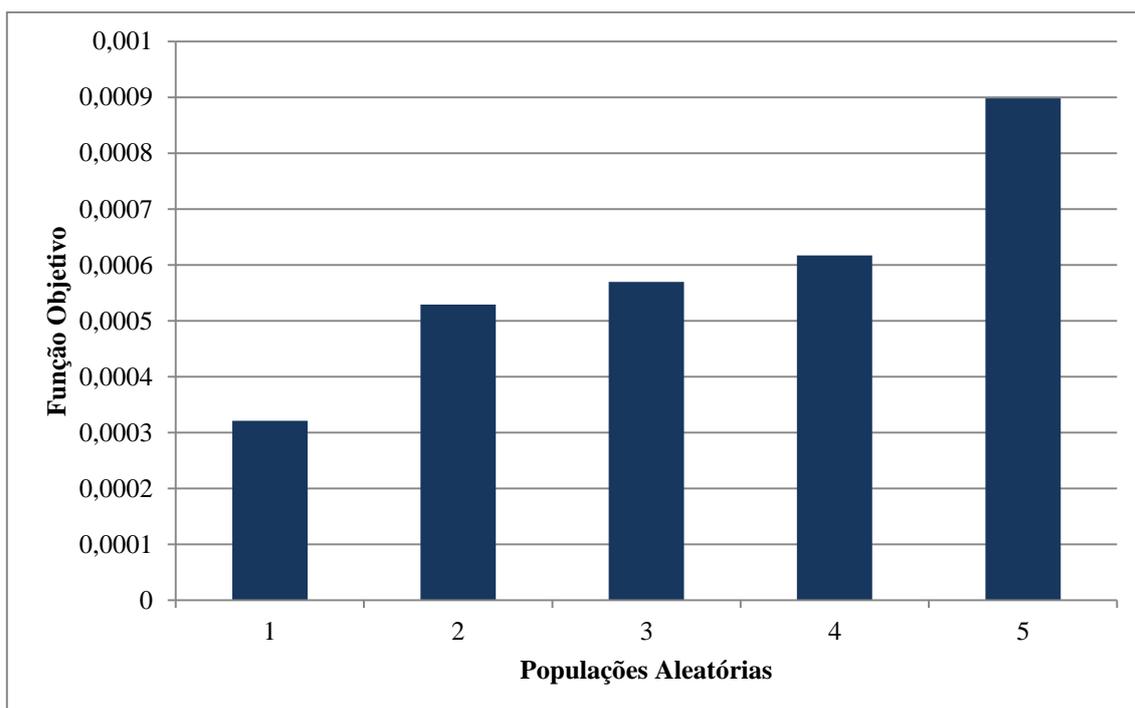


Figura 79 – Maiores valores das funções objetivos obtidos pelas populações de rugosidade aleatórias e demandas aleatórias iniciais distintas.

Assim como os ensaios realizados para a rede real do setor “Monte Carlo, a rede real do setor de Cambuí também foram testadas 4 sementes aleatórias distintas para cada um dos modelos estudados, a fim de confirmar a confiabilidade dos resultados. As Figuras 80 e 81 apresentam a variação dos valores de rugosidade e demanda para cada uma das sementes aleatórias.

Assim como para o setor “Monte Carlo”, observando a Figura 80, relativa aos valores de rugosidade para 3 trechos escolhidos ao acaso entre o conjunto de trechos da rede, nota-se que as rugosidades têm seus valores variando pouco para cada um das sementes aleatórias dos modelos testados e que os valores das rugosidades dos trechos são menores para o modelo implementado com a demanda aleatória.

Com relação às demandas aleatórias, a Figura 81 mostra que os valores resultantes do modelo implementado com a demanda aleatória são maiores que os valores de demanda calculados com base nos dados reais do sistema, ao contrário do que se apresentou para a rede real do setor “Monte Carlo”, fato que pode ser explicado pela baixa vazão na entrada do sistema do setor de Cambuí (MG).

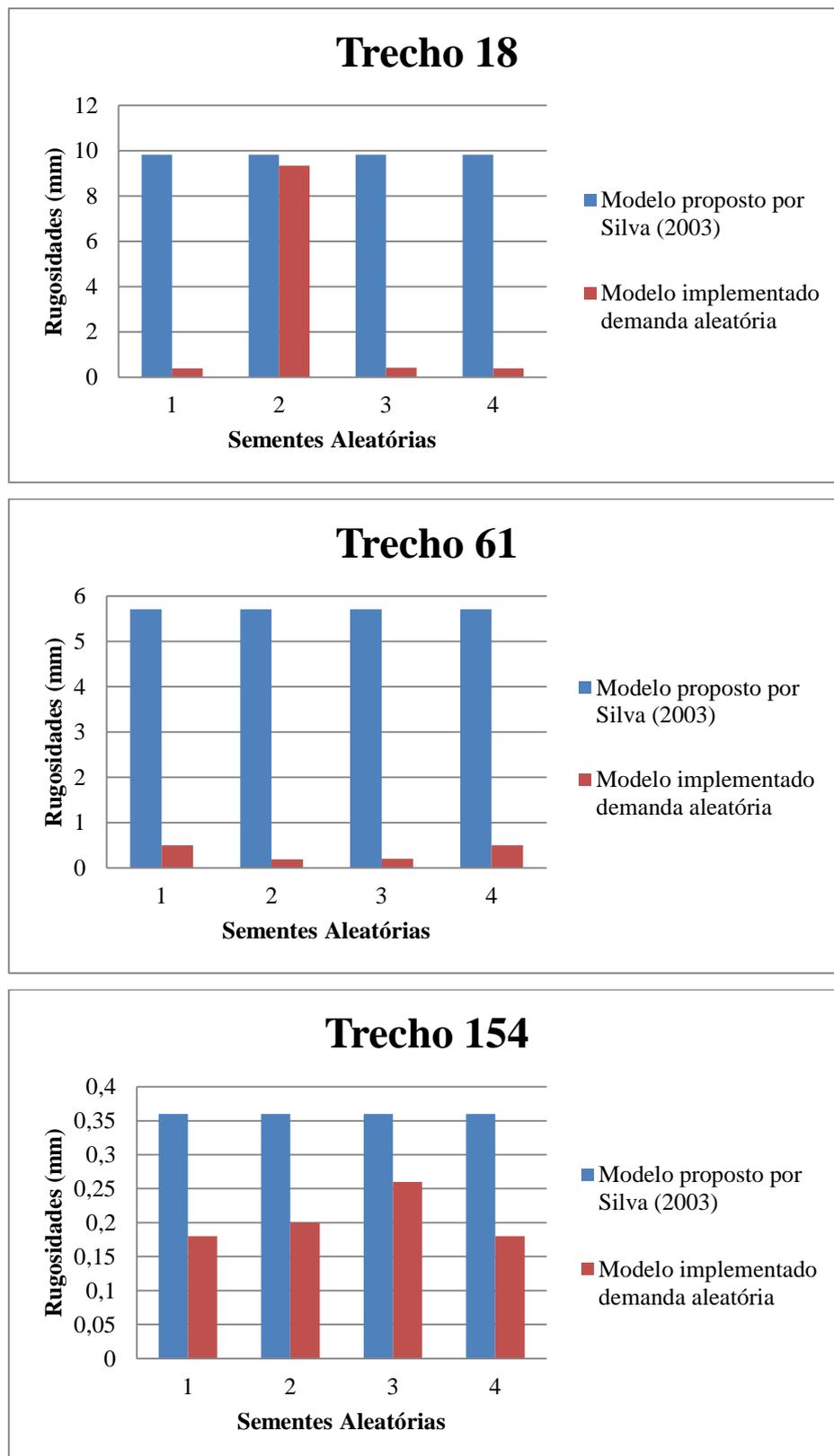


Figura 80 – Variação das rugosidades atribuídas aos trechos 18, 61 e 154 para cada semente aleatória testada – Modelo proposto por Silva (2003) e modelo implementado com demanda aleatória.

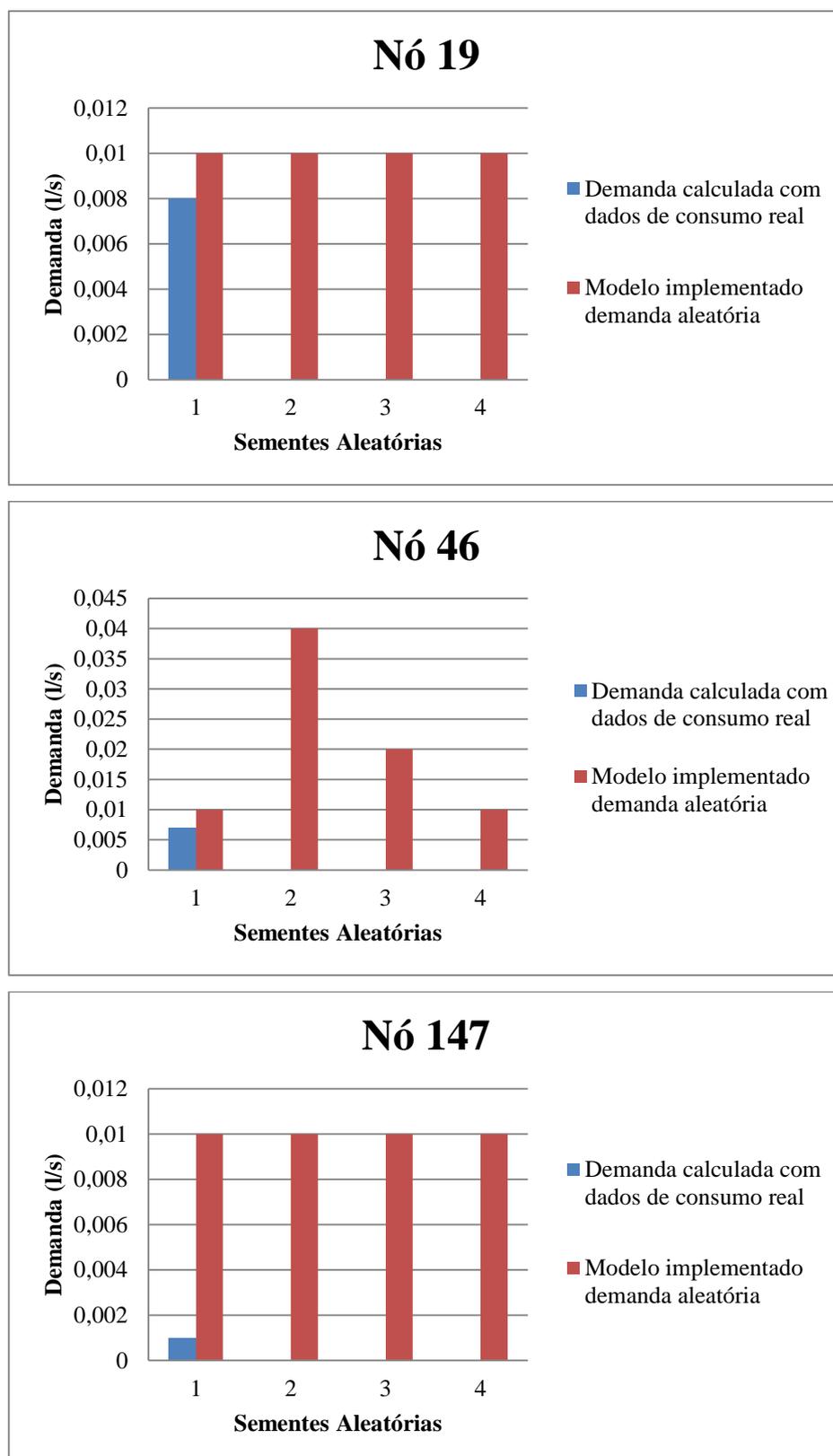


Figura 81 – Variação das demandas atribuídas aos nós 19, 46 e 147 para cada semente aleatória testada – Modelo implementado com demanda aleatória.

Nas Figuras 82 e 83 são apresentados os valores de pressão observada e simulada pelos modelos, sendo possível a comparação para o padrão de consumo máximo e para as populações aleatórias distintas resultantes do modelo proposto por Silva (2003) e do modelo implementado com a demanda aleatória, respectivamente.

De maneira geral os resultados entre os valores observados e os valores simulados para os dois modelos se apresentam um pouco acima dos valores recomendados pelas normas internacionais, como veremos a diante. E ainda que, assim como ocorreu para a rede real do setor de “Monte Carlo” as pressões simuladas para as diferentes populações aleatórias possuem valores muito próximos.

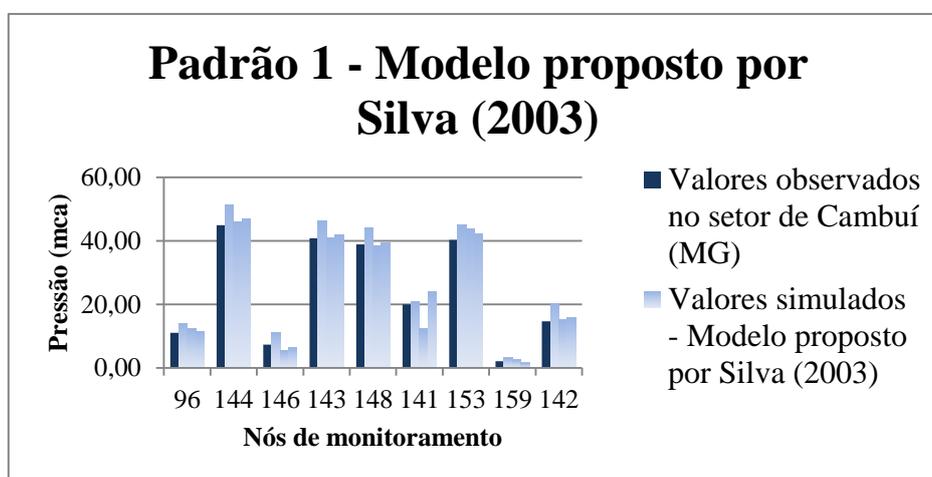


Figura 82 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para o padrão de consumo máximo para o modelo proposto por Silva (2003).

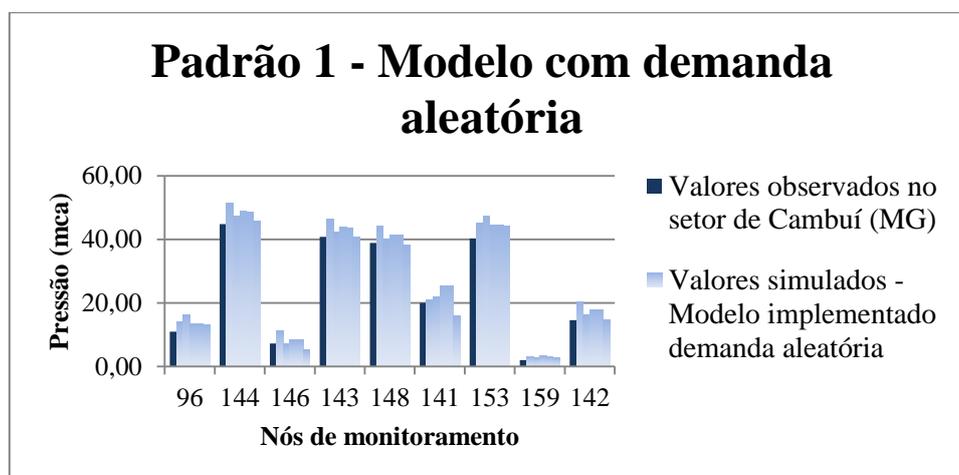


Figura 83 – Pressões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias, para o padrão de consumo máximo para o modelo implementado com demanda aleatória.

A comparação entre os resultados de vazão observados e simulados pelos modelos é apresentada na Figura 84. Lembrando, que o ponto de medida da vazão no setor em Cambuí também foi localizado na entrada do mesmo.

Nota-se que para os dois modelos testados nesta rede, os valores de vazão simulados resultam em aproximadamente 4,4 l/s, mostrando-se acima do valor observado em campo apresentando uma diferença a cerca de 1,00 l/s do valor real de vazão na entrada do sistema.

Os valores dos parâmetros de pressão e vazão simulados e observados ainda mostram-se pouco satisfatórios para os modelos.

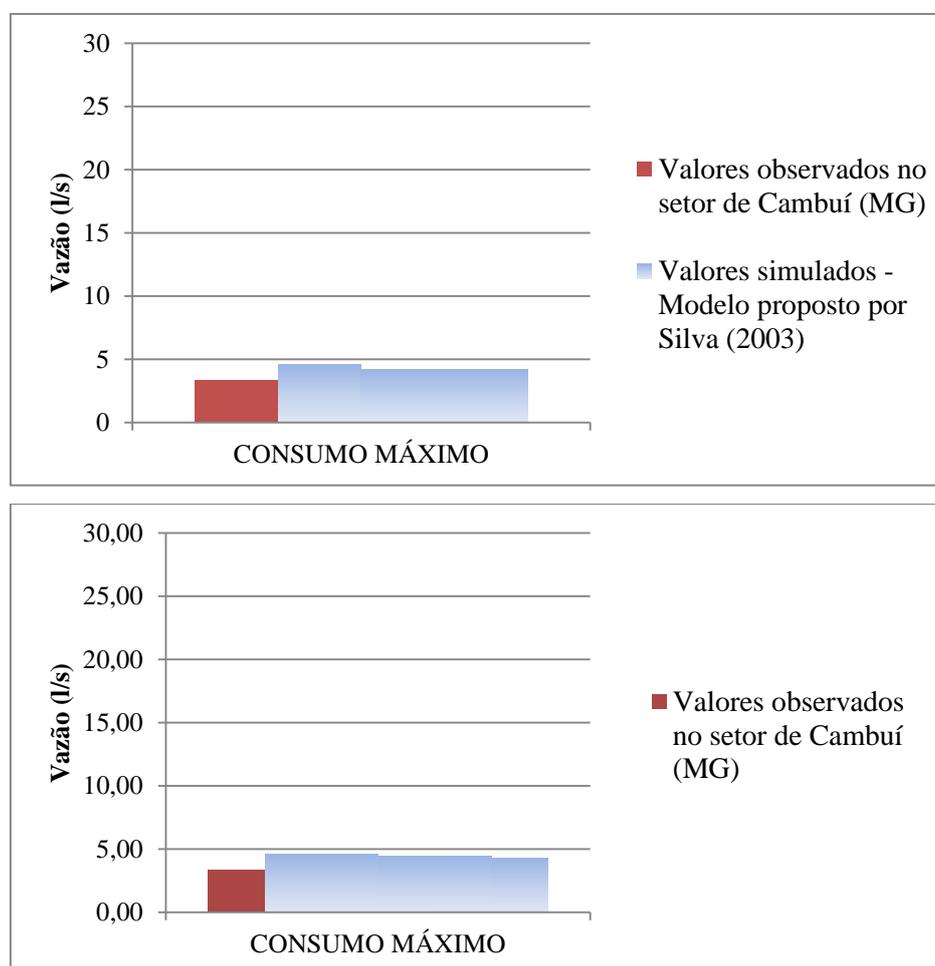


Figura 84 – Vazões simuladas e observadas para todas as populações aleatórias na entrada da rede, para o padrão de consumo máximo e para os dois modelos.

As Figuras 85 e 86 representam os erros absolutos médios dos valores de pressão e os erros relativos médios dos valores de vazões obtidos para os dois modelos testados, respectivamente.

Observa-se que os erros do modelo implementado com demanda aleatória estão sendo sempre maior que os erros exibidos pelo modelo proposto por Silva (2003). Apresentando maior diferença do erro absoluto médio de pressão para o nó 153 e uma diferença de 4,5% do erro relativo médio de vazão de um modelo para o outro.

Para ambos os modelos, os valores de erros absoluto médio de pressão e erros relativos de vazão resultaram valores superiores aos intervalos sugeridos nas normas internacionais. Para 40% dos pontos monitorados o erro absoluto médio de pressão está um pouco acima de 2 mca no modelo proposto por Silva (2003) e para 70 % dos pontos o erro absoluto médio de pressão está também um pouco acima de 2 mca no modelo implementado com a demanda aleatória, para o padrão de consumo máximo. O erro relativo de vazão, resultado de ambos os modelos, também mostrou-se acima dos 10% recomendados, mas vale ressaltar que a vazão de baixa ordem a dificuldade de ajuste dos valores é maior.

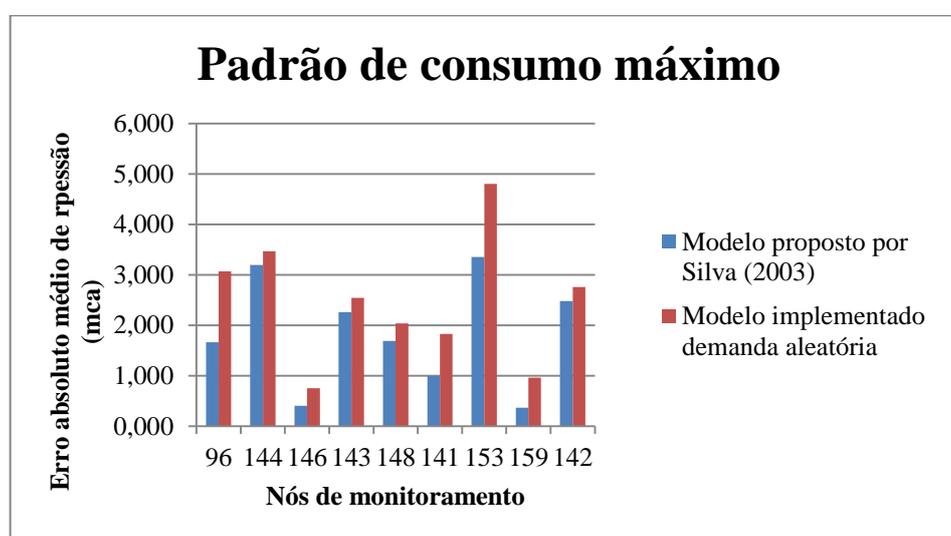


Figura 85 – Erros absolutos médios dos valores de pressão observado e simulado, para o padrão de consumo máximo e para os dois modelos.

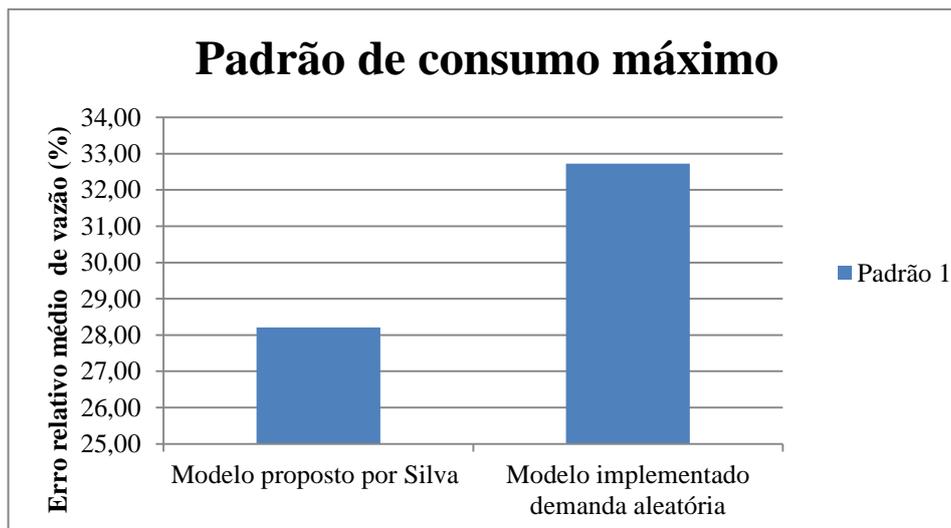


Figura 86 – Erro relativo médio dos valores de vazões observadas e simulados, para o padrão de consumo máximo e para os dois modelos.

5.5. Implementação de dados obtidos com o uso do EPANET

Após as calibrações das redes hipotética e reais do setor “Monte Carlo” e do setor de Cambuí (MG) foram efetuadas simulações hidráulicas no *software* Epanet, para auxiliar na análise dos resultados hidráulicos.

5.5.1. Resultados obtidos para a rede hipotética

Nas Figuras 87 e 88 é possível observar a comparação dos valores simulados e observados de pressão para a rede hipotética, lembrando que os valores observados foram assumidos como os valores simulados pelo *software* Epanet em uma simulação preliminar, com os dados sugeridos também pelo manual do *software* Epanet, e os valores simulados são os valores encontrados pelo *software* Epanet com os dados de rugosidade absoluta e demanda nodal obtidos pelos modelos, no padrão de consumo mínimo (padrão 3).

Nota-se que o desvio entre os valores supostamente observados e simulados pelo *software* Epanet, aplicando as variáveis de decisão dos três modelos, são bastante pequenos, sendo a correlação para de todos igual a 0,999 (Figura 87).

Na Figura 88, onde as barras em laranja são os dados simulados no *software* Epanet e as cruzadas em verde são os valores de pressões supostamente observados, é praticamente imperceptível a diferença entre os resultados de pressão para esta rede hipotética.

Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
2	1	35.85	35.83	0.016	0.016
3	1	37.40	37.31	0.088	0.088
4	1	41.09	40.97	0.123	0.123
5	1	38.68	38.71	0.033	0.033
6	1	37.04	36.92	0.121	0.121
7	1	35.38	35.56	0.181	0.181

Network	6	37.57	37.55	0.094	0.109
Correlation Between Means: 0.999					

(a)

Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
2	1	35.85	35.85	0.004	0.004
3	1	37.40	37.38	0.020	0.020
4	1	41.09	41.05	0.040	0.040
5	1	38.68	38.75	0.069	0.069
6	1	37.04	37.04	0.002	0.002
7	1	35.38	35.58	0.200	0.200

Network	6	37.57	37.61	0.056	0.088
Correlation Between Means: 0.999					

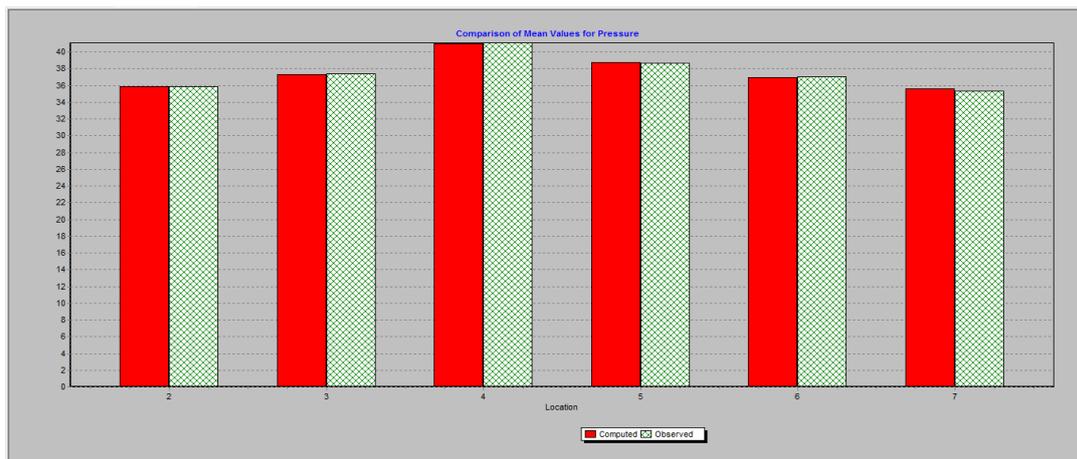
(b)

Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
2	1	35.85	35.83	0.016	0.016
3	1	37.40	37.31	0.088	0.088
4	1	41.09	40.97	0.123	0.123
5	1	38.68	38.71	0.033	0.033
6	1	37.04	36.92	0.121	0.121
7	1	35.38	35.56	0.181	0.181

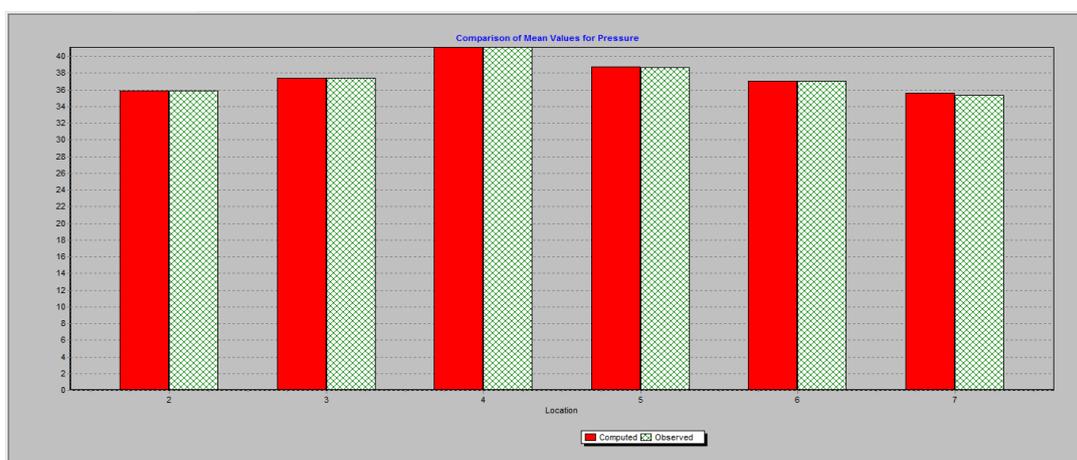
Network	6	37.57	37.55	0.094	0.109
Correlation Between Means: 0.999					

(c)

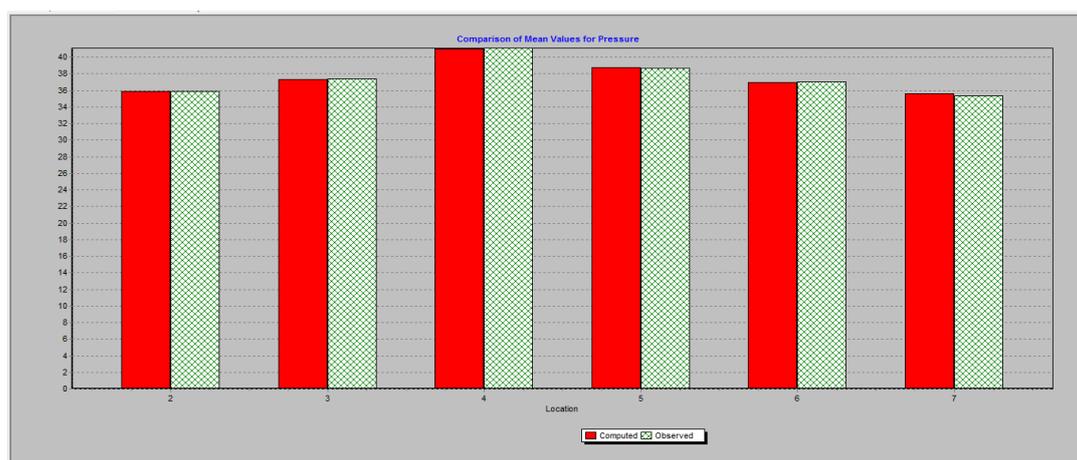
Figura 87 – Relatório estatístico obtido no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.



(a)



(b)



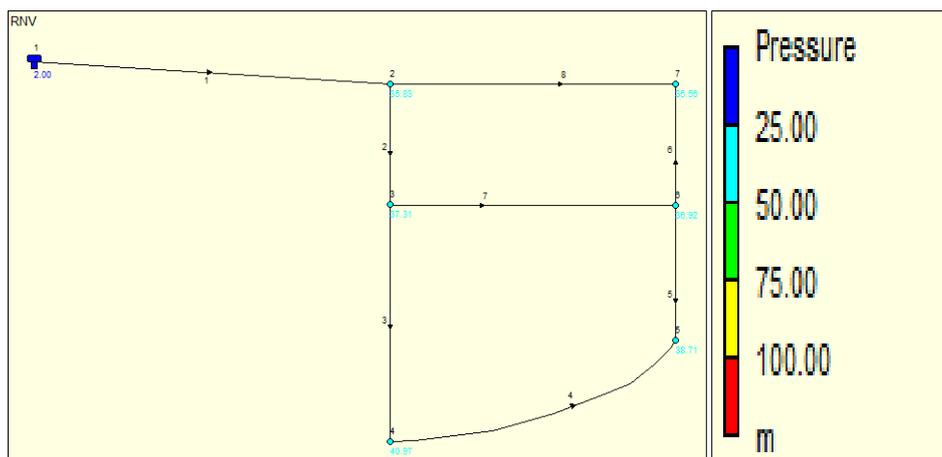
(c)

Figura 88 – Comparação dos valores de pressão observados e calculados no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.

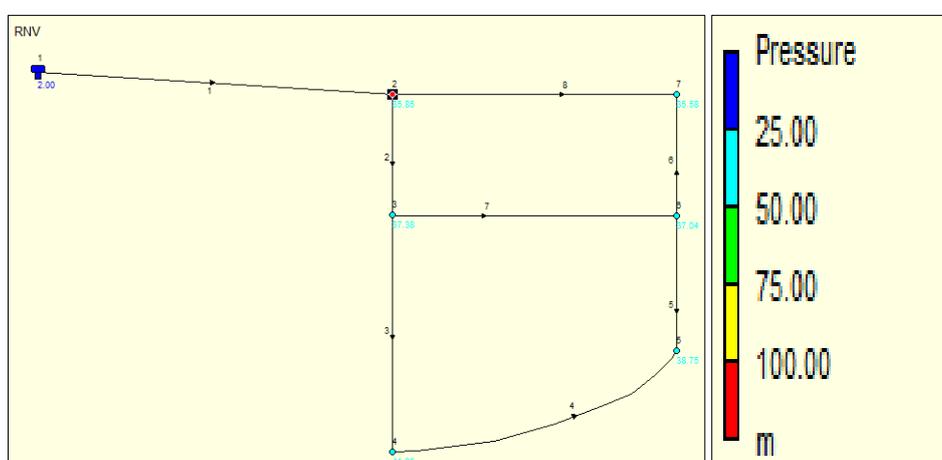
Como esta rede é composta por poucos nós não foi possível construir um mapa de zonas de pressão como será apresentado para as duas redes reais, a seguir.

Assim, na Figura 89 foi demonstrado o valor de pressão de cada um dos nós, no horário de mínimo consumo (padrão 3) adotando as variáveis de decisão de cada um dos modelos de calibração. O comportamento da pressão para os três casos mostraram-se praticamente idênticos com a rede trabalhando com pressões dentro do intervalo de 25 a 50 mca.

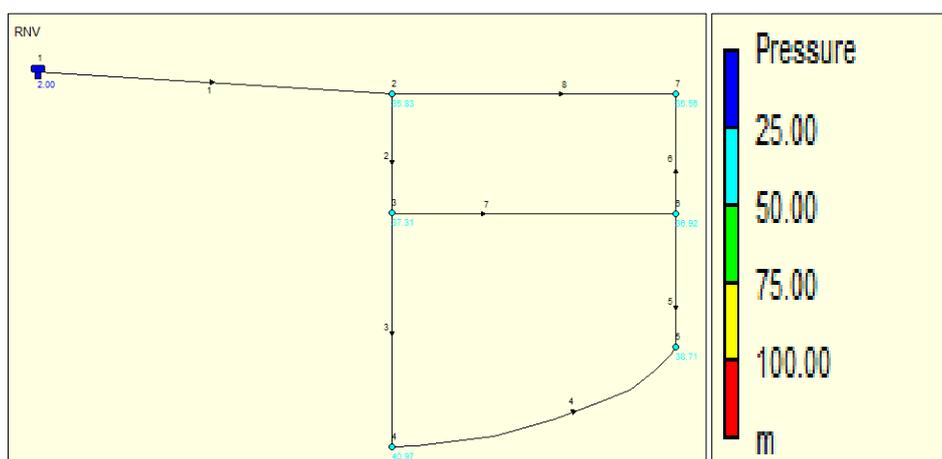
A Figura 90 apresenta os resultados dos valores de pressão supostamente observados para rede, os valores de pressão dos processos de calibração pelos modelos e os valores simulados pelo *software* Epanet adotando as variáveis de decisão dos modelos, para o padrão de consumo mínimo (padrão 3). De modo geral, os valores supostamente observados e simulados, tanto pelos modelos quanto pelo *software* Epanet, remetem valores de pressão bastante próximos, sendo que a diferença entre os valores de pressão resultados dos modelos, na maioria dos pontos, é ligeiramente maior que a resultada pelo *software* Epanet.



(a)



(b)



(c)

Figura 89 – Mapa de pressão obtido no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.

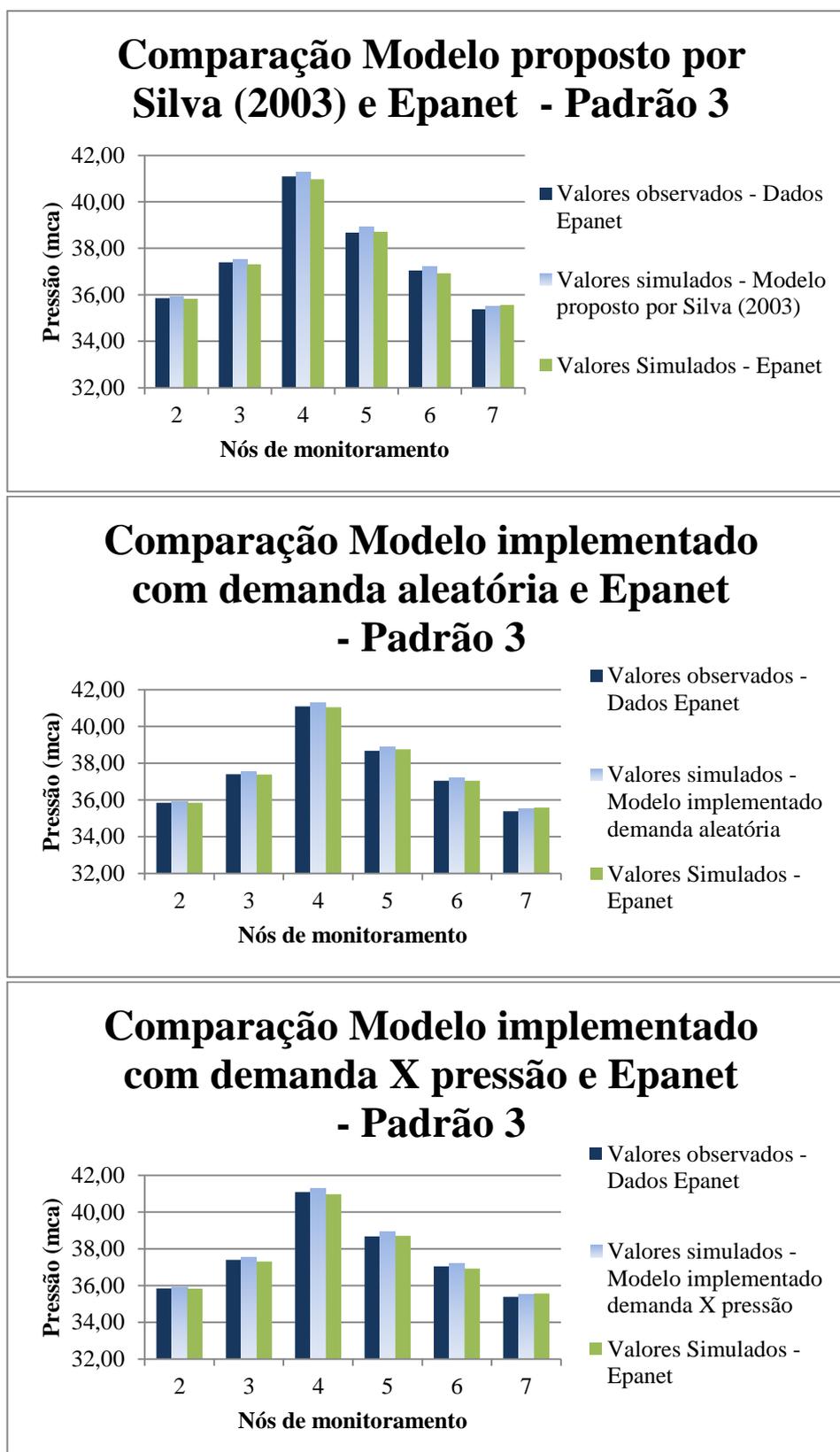


Figura 90 – Comparação entre os valores de pressão observados, simulados pelos modelos e pelo *software* Epanet para a rede hipotética – Padrão 3.

5.5.2. Resultados obtidos para a rede real do setor “Monte Carlo”

Assim como foi feito para a rede hipotética, as Figuras 91 e 92 apresentam a comparação entre os valores observados de pressão, dados de Silva (2003), e os valores simulados pelo *software* Epanet, adotando as variáveis de decisão dos três modelos de calibração, para a rede real do setor “Monte Carlo”, no padrão de consumo mínimo (padrão 3).

A diferença entre os valores observados e simulados no *software* Epanet, empregando as variáveis de decisão dos modelos, é bem próxima para os três cenários, estando a correlação dos dados empregando as variáveis de decisão do modelo proposto por Silva (2003) em 0,998, do modelo implementado com demanda aleatória em 0,997 e do modelo implementado com a demanda dirigida por pressão também em 0,998 (Figura 91).

Na Figura 92, onde as barras em laranja são os dados simulados pelo *software* Epanet e as cruzadas em verde são os valores de pressões observados em campo por Silva (2003), fica mais visível a pequena diferença que ocorre nos resultados de pressão.

Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
57	1	45.60	42.81	2.787	2.787
7	1	26.20	23.11	3.090	3.090
19	1	24.60	19.91	4.689	4.689
26	1	40.80	40.06	0.743	0.743
38	1	40.40	38.81	1.588	1.588
51	1	58.60	59.84	1.236	1.236
Network	6	39.37	37.42	2.356	2.705
Correlation Between Means: 0.998					

(a)

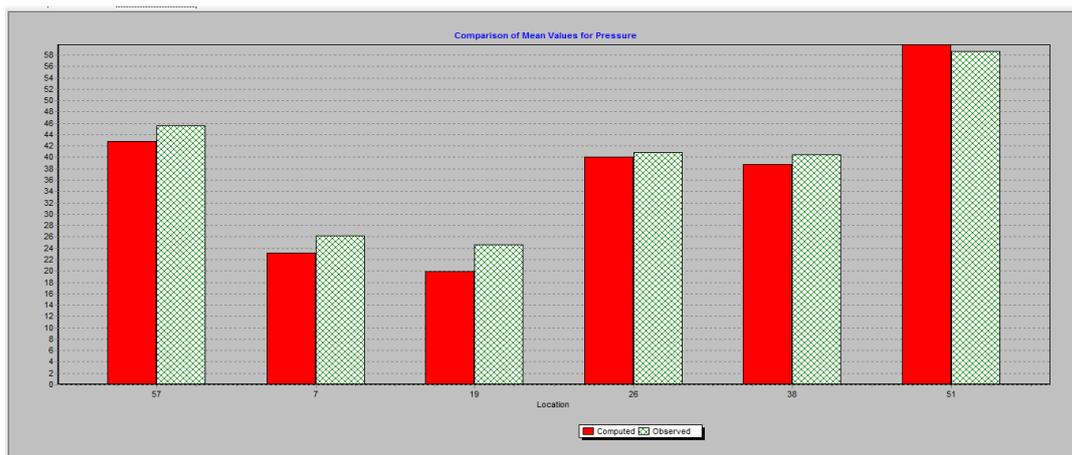
Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
57	1	45.60	42.76	2.840	2.840
7	1	26.20	23.09	3.111	3.111
19	1	24.60	19.90	4.695	4.695
26	1	40.80	40.04	0.755	0.755
38	1	40.40	38.79	1.607	1.607
51	1	58.60	59.85	1.250	1.250
Network	6	39.37	37.41	2.376	2.724
Correlation Between Means: 0.997					

(b)

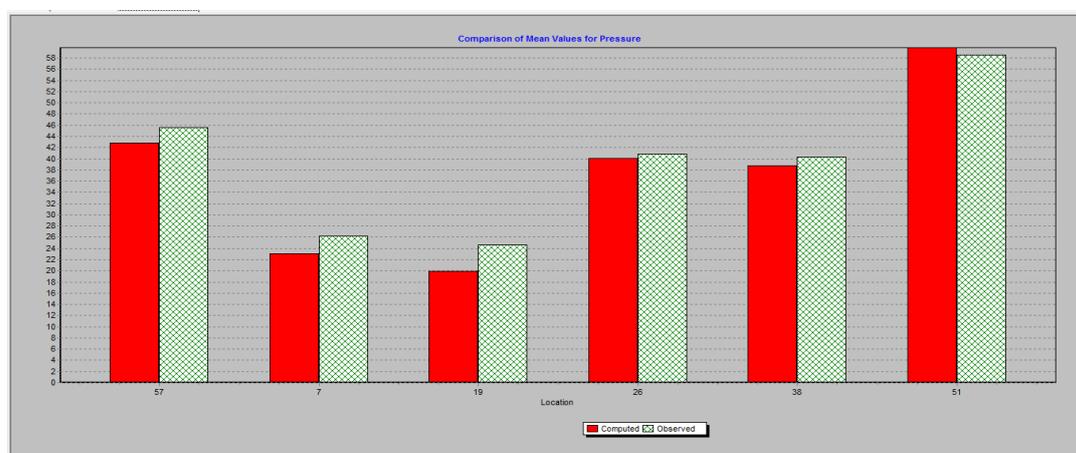
Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
57	1	45.60	42.82	2.781	2.781
7	1	26.20	23.10	3.105	3.105
19	1	24.60	19.91	4.693	4.693
26	1	40.80	40.02	0.779	0.779
38	1	40.40	38.79	1.611	1.611
51	1	58.60	59.79	1.186	1.186
Network	6	39.37	37.40	2.359	2.708
Correlation Between Means: 0.998					

(c)

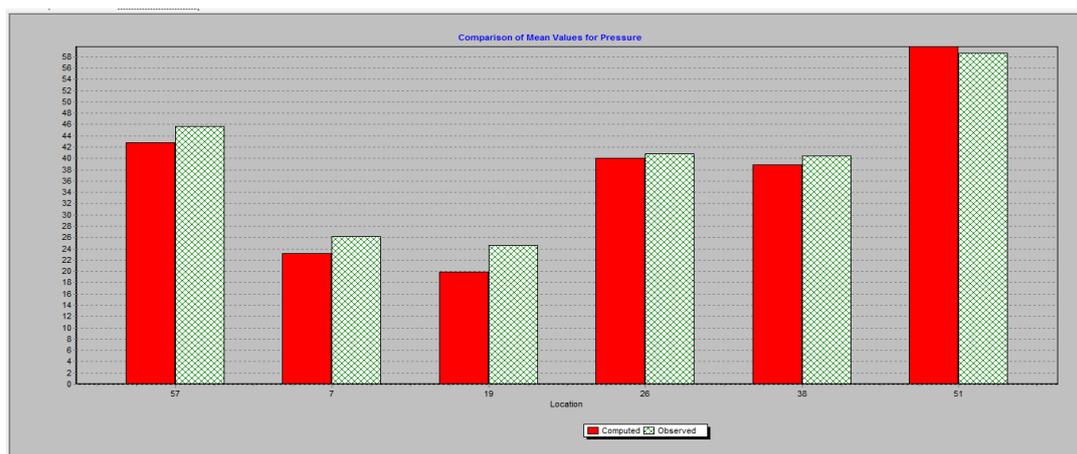
Figura 91 – Relatório estatístico obtido no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.



(a)



(b)

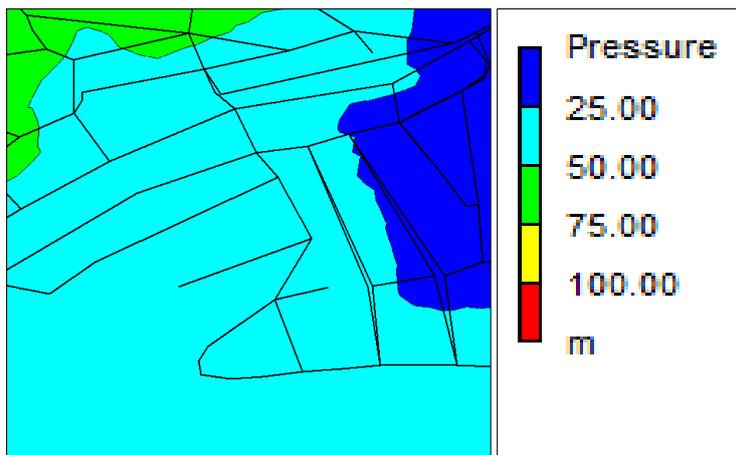


(c)

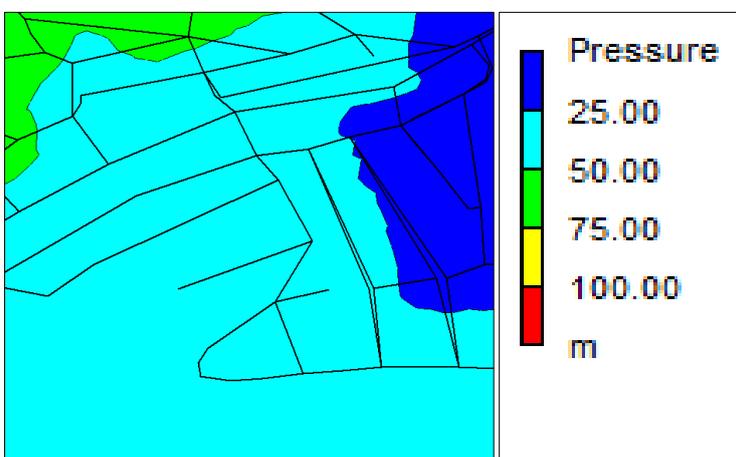
Figura 92 – Comparação dos valores de pressão observados e calculados no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.

Na Figura 93 foi construído um mapa das zonas de pressão empregando no *software* Epanet as variáveis de decisão resultante da calibração dos modelos. É muito sutil a diferença das zonas de pressões nos mapas. A maior parte da rede encontra-se na faixa de 25 a 50 mca, atendendo a faixa recomendada de pressão para um sistema.

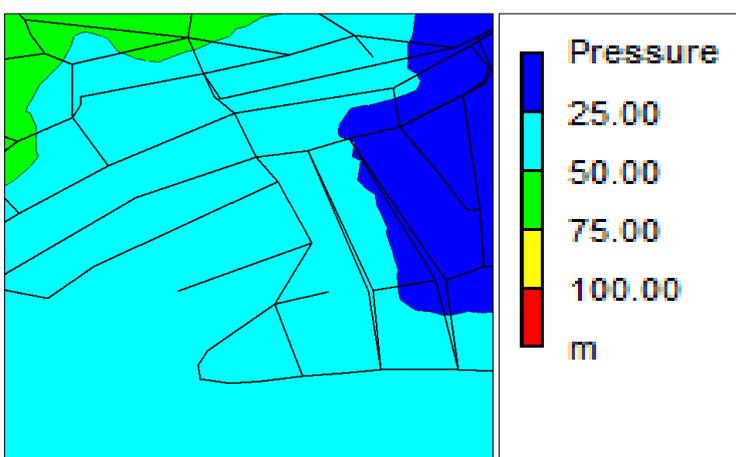
Já na Figura 94 é possível analisar os resultados dos valores de pressão observados em campo por Silva (2003), os valores dos processos de calibração pelos modelos e os valores simulados pelo *software* Epanet empregando as variáveis de decisão dos modelos de calibração, também para o padrão de consumo mínimo (padrão 3) da rede. De uma maneira geral, os valores observados e simulados, tanto pelos modelos quanto pelo *software* Epanet, encontram-se muito próximos dos dados reais de pressão, sendo que a diferença entre os valores de pressão resultados dos modelos, na maioria dos pontos monitorados, é menor que a apresentada pelo *software* Epanet quando utilizadas as mesmas variáveis e decisão dos modelos. Por tudo, é possível comprovar a veracidade dos modelos proposto por Silva (2003) e dos implementados.



(a)



(b)



(c)

Figura 93 – Mapa das zonas de pressão obtido no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003); (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória e (c) em termos de rugosidade aleatória e demanda dirigida por pressão – Padrão 3.

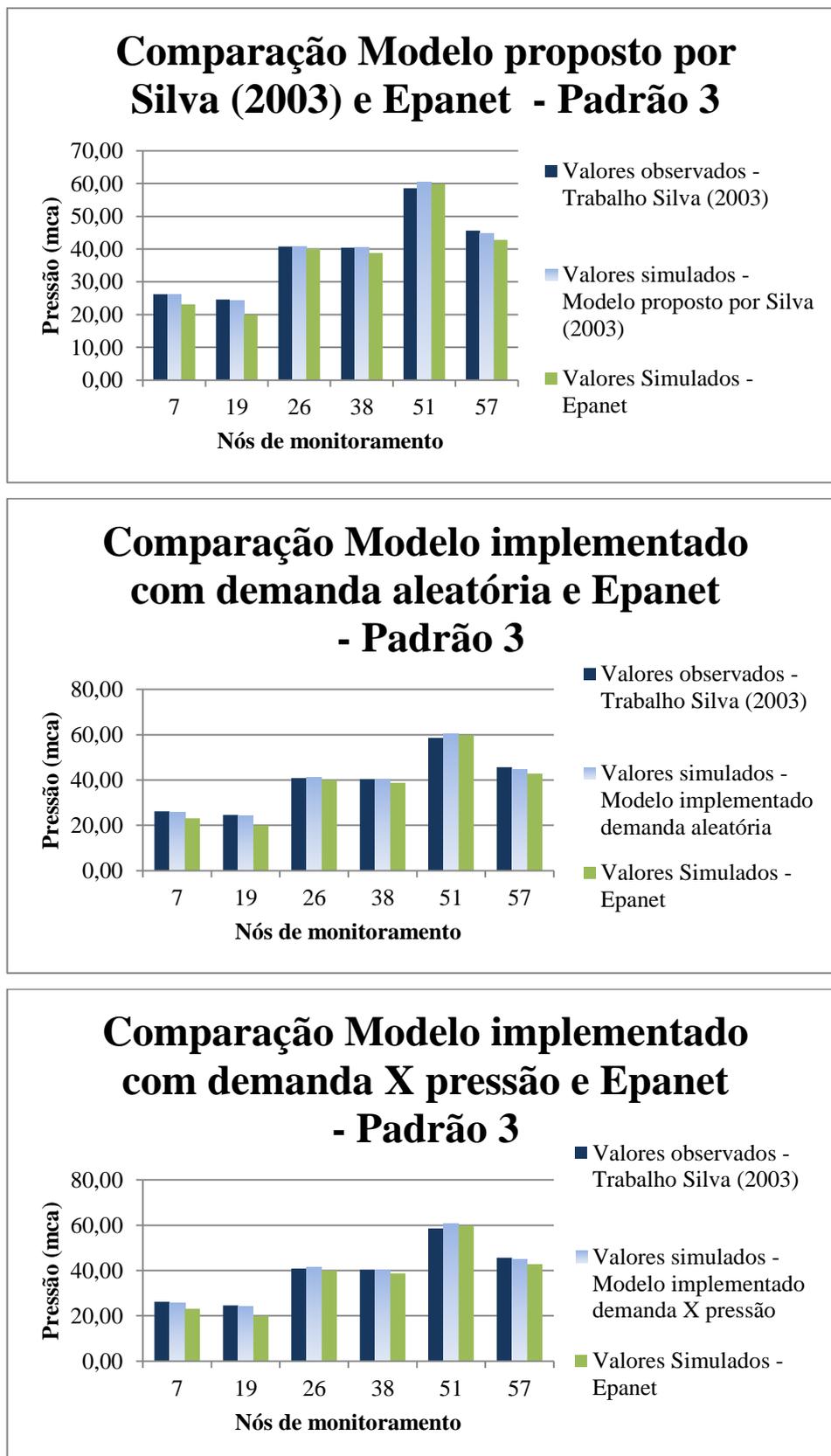


Figura 94 – Comparação entre os valores de pressão observados, simulados pelos modelos e pelo *software* Epanet para a rede real do setor “Monte Carlo” – Padrão 3.

5.5.3. Resultados obtidos para a rede real do setor de Cambuí (MG)

Os resultados obtidos no *software* Epanet para o setor de Cambuí (MG) não se mostraram tão compatíveis com os dados reais de pressão como ocorreu para o setor “Monte Carlo”. A comparação entre seus valores observados e simulados de pressão no *software* Epanet, empregando as variáveis de decisão dos dois modelos ajustados para o sistema são mostrados nas Figuras 95 e 96, para o padrão de consumo máximo (padrão 1).

Analisando a Figura 95, nota-se que os resultados de pressão que o *software* Epanet encontrou empregando os valores de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) apresenta um erro duas vezes menor que quando utilizado os valores de rugosidade e demanda do modelo implementado com a demanda aleatória. E que o nó de monitoramento 159 só foi possível calibrar a partir dos valores do modelo implementado com a demanda aleatória, obtendo um erro pequeno de 0,143 mca.

A Figura 96, que também apresenta as barras em laranja que são os dados simulados pelo *software* Epanet e as cruzadas em verde que são os valores de pressões observados em campo, observa-se que os valores simulados na maioria das vezes é maior que o valor de pressão real.

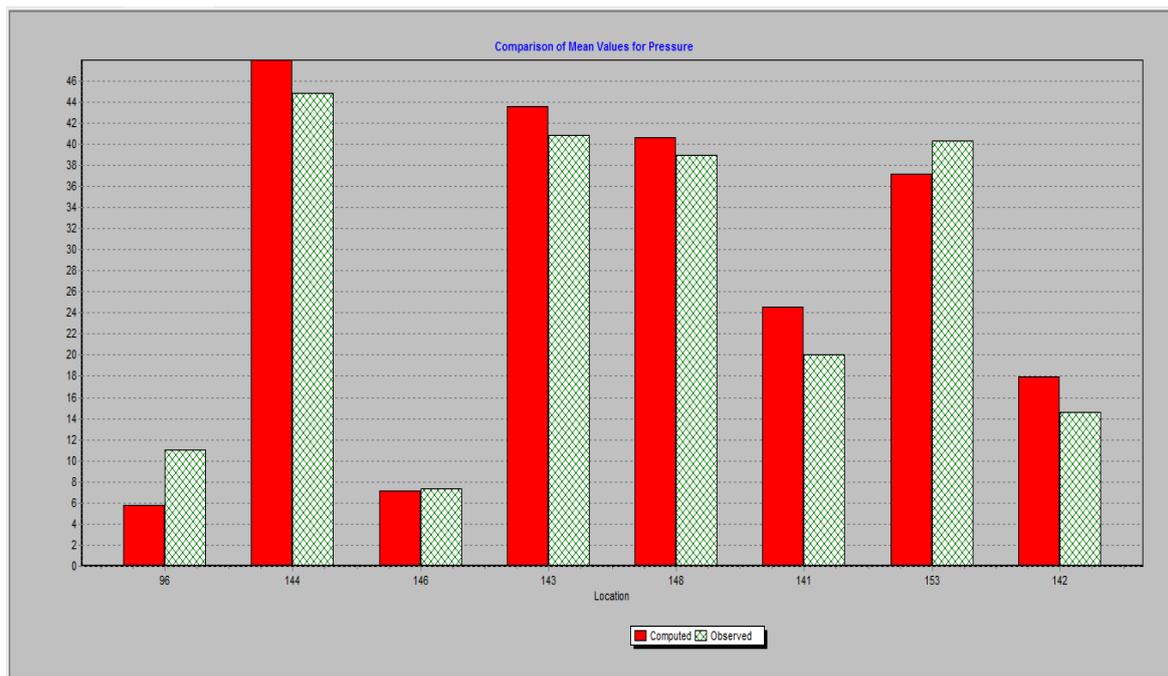
Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
96	1	11.00	5.75	5.248	5.248
144	1	44.84	47.96	3.116	3.116
146	1	7.32	7.11	0.211	0.211
143	1	40.80	43.52	2.721	2.721
148	1	38.90	40.62	1.716	1.716
141	1	20.00	24.60	4.603	4.603
153	1	40.30	37.18	3.116	3.116
142	1	14.60	17.98	3.377	3.377
Network	8	27.22	28.09	3.014	3.353
Correlation Between Means: 0.979					

(a)

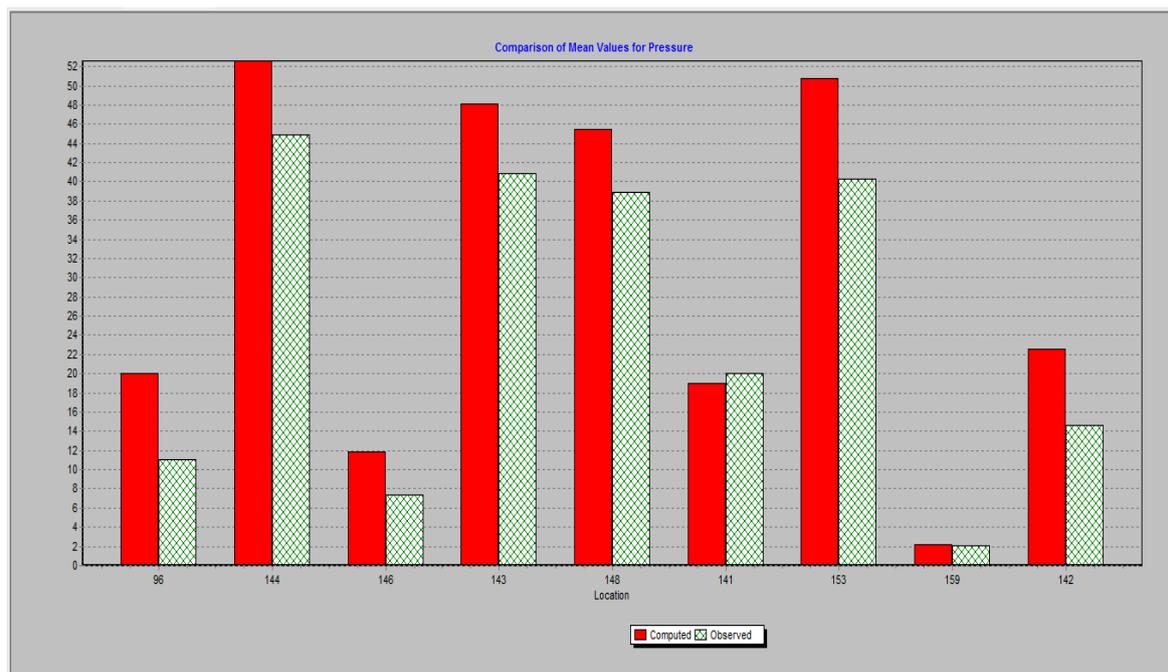
Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
96	1	11.00	19.98	8.976	8.976
144	1	44.84	52.59	7.754	7.754
146	1	7.32	11.91	4.590	4.590
143	1	40.80	48.15	7.349	7.349
148	1	38.90	45.42	6.522	6.522
141	1	20.00	19.00	1.004	1.004
153	1	40.30	50.80	10.501	10.501
159	1	2.10	2.24	0.143	0.143
142	1	14.60	22.61	8.011	8.011
Network	9	24.43	30.30	6.094	6.942
Correlation Between Means: 0.984					

(b)

Figura 95 – Relatório estatístico obtido no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) e (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória – Padrão 1.



(a)

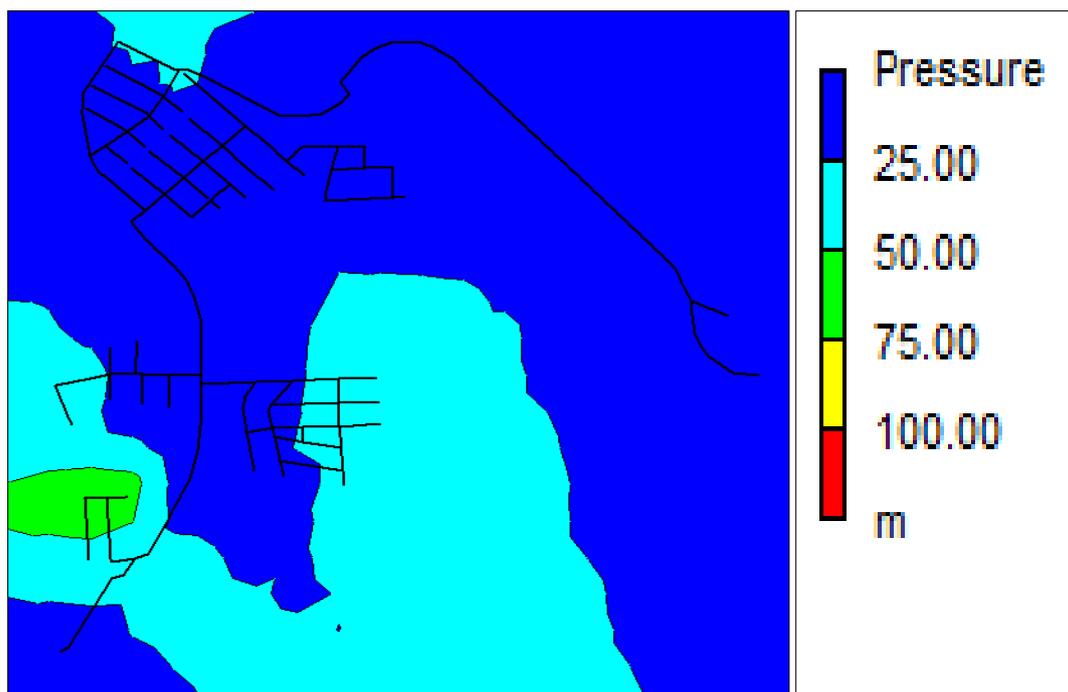


(b)

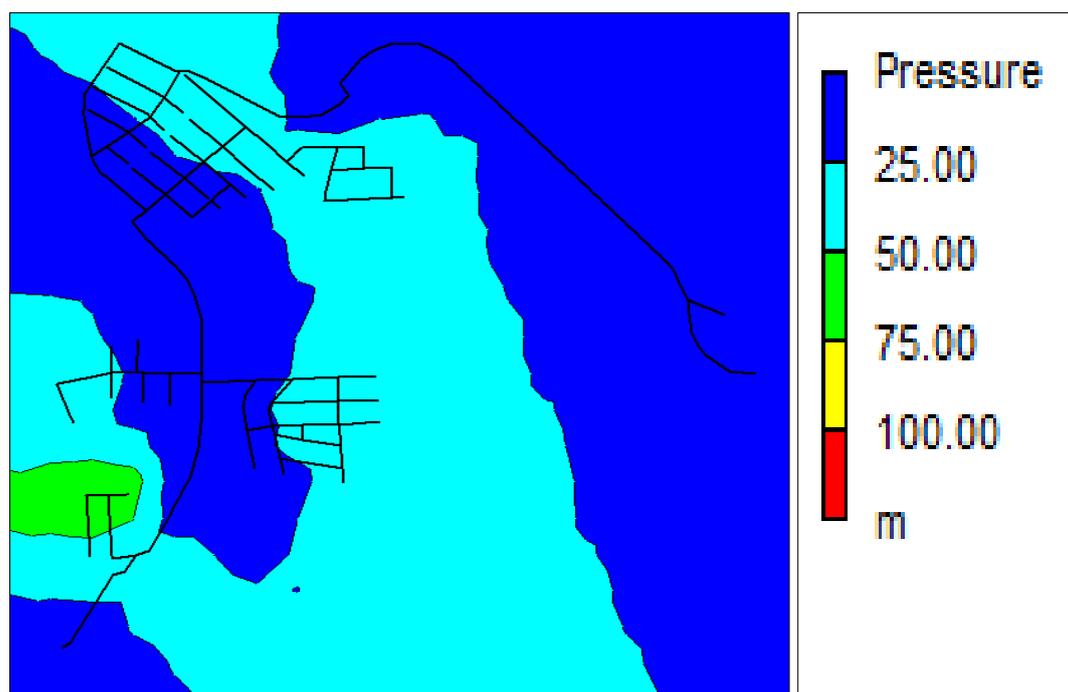
Figura 96 – Comparação dos valores de pressão observados e calculados no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) e (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória – Padrão 1.

A Figura 97 também apresenta o mapa das zonas de pressão para este setor empregando no *software* Epanet as variáveis de decisão resultante da calibração dos modelos, observa-se que há uma diferença na parte mais baixa do bairro Vila Mariana e em todo o bairro Vale das Rosas. A faixa de pressão obtida pelas variáveis do modelo implementado com demanda aleatória é maior e quando observamos o comportamento do nó 153 monitorado nesta região, acredita-se as variáveis de decisão deste modelo estejam mais perto da realidade do sistema, pois o nó 153 trabalha durante todo o dia na faixa de pressão acima de 25 mca. Em ambos os casos, a maior parte da rede trabalha variando de 0 a 50 mca.

Na Figura 98 têm-se a comparação entre os valores de pressão observados em campo, os valores de pressão resultados das calibrações dos modelos e os valores de pressão resultados da simulação pelo o *software* Epanet empregando as variáveis de decisão dos modelos, para o padrão máximo de consumo (padrão 1), observa-se que os modelos obtiveram resultados um pouco mais satisfatórios, e o melhor dentre eles foram os resultados do modelo proposto por Silva (2003). Na maior parte dos nós de monitoramento a simulação no *software* Epanet resultou em valores maiores ainda de pressão.



(a)



(b)

Figura 97 – Mapa das zonas de pressão obtido no *software* EPANET para a calibração: (a) em termos de rugosidade do modelo proposto por Silva (2003) e (b) em termos de rugosidade e demanda aleatória – Padrão 1.

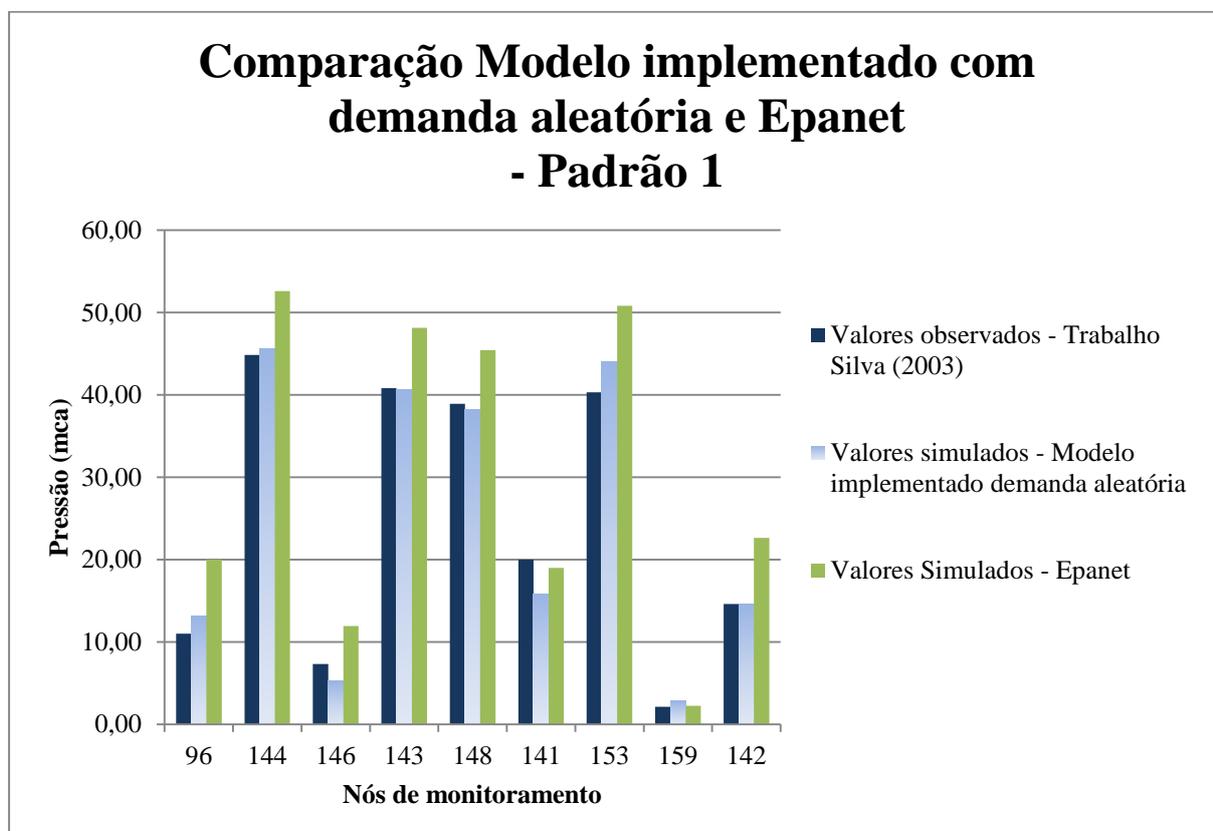
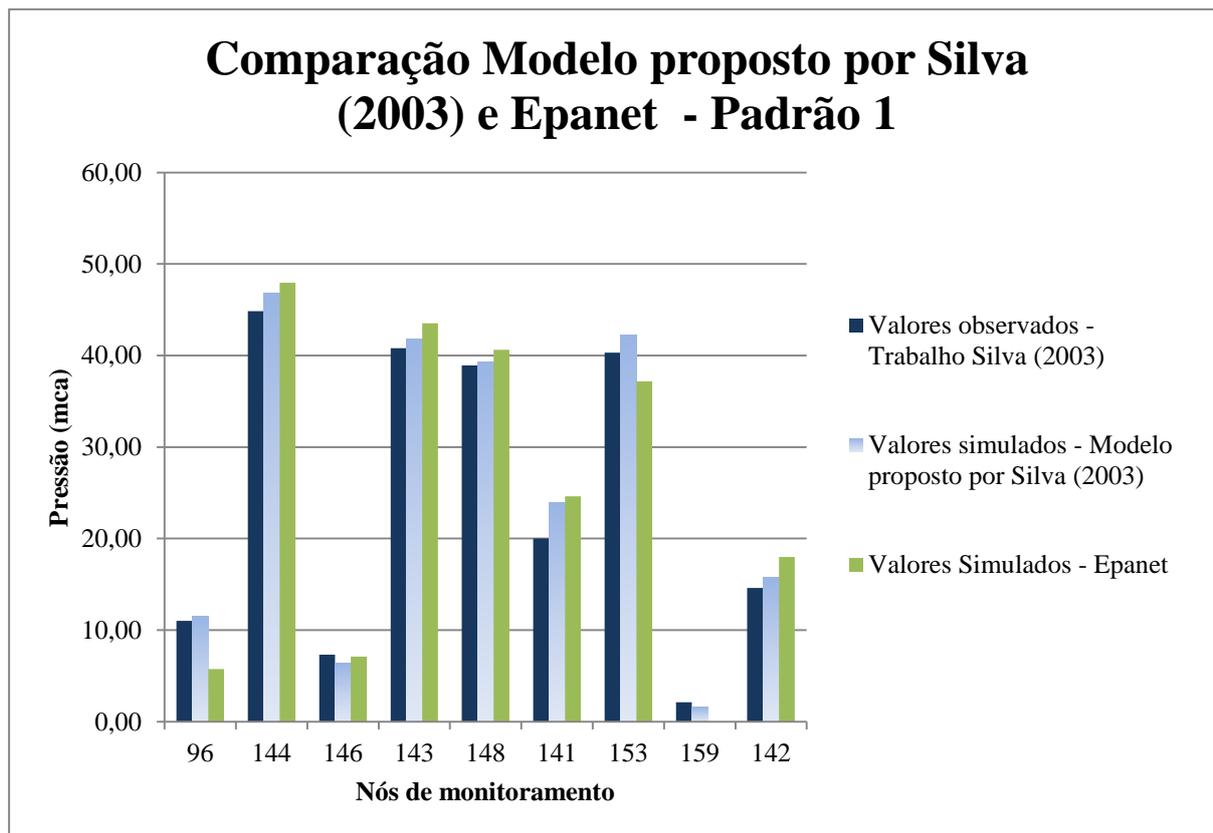


Figura 98 – Comparação entre os valores de pressão observados, simulados pelos modelos e pelo *software* Epanet para a rede real do setor de Cambuí (MG) – Padrão 1.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho trata de um estudo de aprimoramento de alguns módulos do modelo proposto por Silva (2003) com a técnica de algoritmo genético, cujo objetivo principal é a calibração de redes de distribuição de água através dos valores ótimos de rugosidades absolutas. Assim, foram desenvolvidos e introduzidos o estudo de demanda nodal na tentativa de melhorar os resultados da calibração.

Para as análises de calibração foram utilizadas três redes, sendo uma rede hipotética, que auxiliou na implementação do modelo proposto por Silva (2003), e duas redes reais, sendo que uma das redes reais seus dados foram extraídos do trabalho de Silva (2003) e para a outra rede real os dados foram levantados em campo pela autora. O modelo de calibração que inicialmente calibrava as rugosidades dos trechos passou a calibrar também em termos de demandas nodais, em primeiro momento de maneira aleatória e posteriormente empregando o modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999).

Modelos de calibração mais eficientes foram investigados através das duas redes reais e uma rede hipotética. Uma síntese das conclusões e recomendações do trabalho são apresentadas a seguir.

6.1. Conclusões

6.1.1. Conclusão sobre o aprimoramento de alguns módulos do modelo proposto por Silva (2003)

O aprimoramento de alguns módulos do modelo proposto por Silva (2003) serviu como base na tentativa de melhorar a eficiência do modelo de calibração de setores isolados de redes de distribuição de água. Os principais aprimoramentos realizados foram: a introdução da geração de demandas nodais aleatórias e a introdução da demanda nodal dirigida por pressão do modelo de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). Demandas estas que antes eram valores de entrada do modelo base.

As principais mudanças que ocorreram foram: dentro das sub-rotinas GERADOR e MUTAÇÃO e também a criação de uma nova sub-rotina denominada TUCCIARELLI. Outra questão que se alterou foi o aumento do tempo computacional por aumentar as variáveis de decisão.

Apesar de o modelo resultar a solução ótima das demandas nodais as informações de consumo do setor de rede de distribuição de água em estudo não são descartadas, pois os dados de consumos residenciais auxiliam na elaboração das equações de variação da demanda nodal.

Com este estudo adquiriu-se certo conhecimento de programação para se poder criar, alterar e melhorar modelos de calibração que usam como ferramenta de busca os algoritmos genéticos.

6.1.2. Conclusão sobre as aplicações dos modelos de calibração

Os principais resultados obtidos com os modelos de calibração de redes de distribuição de água foram os seguintes:

- Rede hipotética

- Foram testados os três modelos de calibração em análise, o modelo proposto por Silva (2003), o modelo implementado com a demanda aleatória e o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão. As simulações foram realizadas para 3 condições de consumo, encontrando o erro máximo absoluto de pressão para a condição de consumo máximo nos três modelos, sendo o maior igual a 3,16 mca e apresentado pelo o modelo implementado com a demanda aleatória. Para o padrão de consumo mínimo os resultados dos processos de calibração ensaiados atenderam as normas internacionais (Water Research Center- WRc, 1989 apud SILVA, 2003), alcançando erro absoluto médio de pressão menor que 0,5 mca para 100% dos pontos no modelo proposto por Silva (2003), menor que 2 mca para 100% dos pontos no modelo implementado com a demanda aleatória e novamente menor que 0,5 mca para 100% dos pontos no modelo implementado com a demanda dirigida por pressão;

- Os desvios máximos de vazão entre os valores supostamente observados e os simulados pelos modelos zera para o modelo proposto por Silva (2003) e para o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão seu valor foi de 0,08%. Já para o modelo implementado com a demanda aleatória o valor foi maior, em média igual a 5,43%, para os 3 padrões de consumo. Os valores novamente atendem as normas internacionais;

- Os valores de pressões e vazões apresentaram pouca variação ao longo das simulações nos modelos para as diferentes populações aleatórias empregadas;

- As rugosidades dos trechos e as demandas nodais foram as variáveis de decisão trabalhadas para esta rede, seus valores apresentaram variações significativas;

- A rede hipotética confirmou o funcionamento da implementação do modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) no modelo proposto por Silva (2003), mostrando-se adequada para a etapa preliminar do estudo, e dentre outras vantagens, o tempo computacional e a quantidade de variáveis de decisão também são reduzidos;

- Diante da comparação dos resultados de pressão, no padrão mínimo de consumo, obtidos pelos modelos de calibração e dos resultados obtidos pelos *software* Epanet empregando as variáveis de decisão dos modelos, os modelos de calibração mostraram-se com uma diferença muito pequena entre os valores, menor que 0,5 mca para os todos os pontos.

- Rede real do setor “Monte Carlo” de Silva (2003)

- Assim como realizado para a rede hipotética, a calibração deste setor também feita para 3 condições de consumo, e empregados o modelo proposto por Silva (2003), o modelo implementado com a demanda aleatória e o modelo implementado com a demanda dirigida por pressão. Para os três modelos testados, os valores de pressão calculados estão em geral, bem próximos dos valores observados por Silva (2003), apresentando menores desvios para o padrão de consumo mínimo (padrão 3). Também para os três modelos testados os erros absolutos de pressão apresentaram-se similares para cada um dos padrões de consumo e os menores erros foram encontrados para o modelo proposto por Silva (2003) e o modelo implementado com a demanda aleatória. E assim, como houve nas simulações de Silva (2003) os maiores erros foram encontrados para o nó 51;

- Os valores de vazões calculados nos três modelos para as três condições de consumo foram praticamente os mesmo e em todos as diferenças entre a vazão observada por Silva (2003) e a vazão simulada são imperceptível para os padrões de consumo máximo (padrão 1) e consumo médio (padrão 2), sendo cerca de 1 l/s, na condição de consumo mínimo (padrão 3) a pior condição;

- A faixa de variação adotada de rugosidade nos três modelos estava entre 0,50 mm e 10 mm, e as demandas iniciais aleatórias variaram de acordo com as informações de consumo nodal de Silva (2003) dentro do intervalo de 0,016 l/s a 0,522 l/s, devendo a soma dos

consumos nodais sempre se apresentarem próximo do valor total consumo 6,386 l/s, também de acordo com as informações de consumo nodal de Silva (2003);

- O modelo demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999), foi calibrado a partir dos resultados de pressão obtidos pelos modelos proposto por Silva (2003) e pelo implementado com a demanda aleatória, adotando assim a pressão mínima desejável ao sistema de 28 mca e pressão mínima de 14 mca;

- Esta rede permitiu empregar e comprovar os modelos com implementações a uma rede real, e seus resultados mostraram-se satisfatórios para as normas internacionais;

- Os resultados de rugosidades e demandas nodais encontrados para cada um dos modelos ensaiados para este setor foram também empregados ao *software* de simulação hidráulica Epanet a título de comparação dos resultados de pressão, e os mesmos se mostraram muito próximos aos valores observados por Silva (2003), sendo que os resultados dos modelos de calibração apresenta uma diferença de pressão um pouco menor que os resultados obtidos no *software* Epanet.

- Rede real do setor de Cambuí (MG)

- A rede do setor de Cambuí foi foco do trabalho de campo, sendo coletados dados topográficos e monitorados valores de pressão e vazão por uma semana. Dentre todos os dias de monitoramento de pressão e vazão optou-se por estudar o dia 09 de outubro de 2014, pelos dados apresentarem um comportamento mais definido da rede. Foram instalados neste setor o total 19 loggers de pressão e pulso e um medidor de vazão, ultrassom. Do total 4 apresentaram erros de leitura dos dados, 3 foram empregados nas medidas pontuais no bairro Vale das Rosas, devido a falta de segurança para que ocorressem medidas contínuas, e dos 12 monitorados continuamente e sem erros de leitura foi possível à calibração de 10 nós, 9 espalhados pela rede e 1 na entrada do setor. Assim, dois dos nós monitorados não foram calibrados, o nó 140, fato que pode ser explicado quando observamos as medidas de campo (Figura 43), pelas possíveis manobras de registros que influenciaram o comportamento neste ponto, e o nó 147, que o ajuste de pressão possivelmente não ocorreu devido a baixa sensibilidade de resposta ao consumo, apresentando praticamente valores constantes de pressão durante todo o dia, com uma variação próxima de 0,90 mca (Figura 49);

- Para este setor também foram testados os três modelos, o modelo proposto por Silva (2003), o modelo implementado com a demanda aleatória e o modelo implementado com a

demanda dirigida por pressão, mas apenas para a condição de consumo máximo (padrão 1), devido a vazão na entrada do setor ser de pequena ordem;

- Dentre os três modelos testados apenas o modelo implementado com o modelo de demanda dirigida por pressão não apresentou resultados, o modelo de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) não alcançou os valores adequados de demanda nodal, havendo um problema de convergência no balanço hídrico;

- As diferenças entre os valores de pressão observados e calculados para o modelo proposto por Silva (2003) e para o modelo implementado com a demanda aleatória obtiveram resultados poucos satisfatórios, estando sua maioria acima dos valores sugeridos pelas normas internacionais. Os desvios máximos encontrados pelos modelos foram referentes ao nó 153. Iguais a 3,35 mca e 4,80 mca, respectivamente. O erro maior neste ponto pode ser atribuído a possíveis influências de manobras de registros na rede;

- Os ajustes de vazão para ambos os modelos testado obtiveram uma diferença de aproximadamente 1,03 l/s entre o valor observado e o valor simulado na entrada do setor, caracterizando um valor aceitável pela dificuldade de se calibrar um valor de vazão de baixa ordem (3,38 l/s);

- O consumo mínimo noturno não zera, sendo cerca de 2,1 l/s, não muito distante da vazão máxima diária fornecida. Fato que pode indicar vazamentos ou ligações clandestinas na rede, já que não foram encontrados dados cadastrais de consumidores especiais noturnos ou reservatórios domiciliares;

- A faixa de variação adotada de rugosidade para os modelos também estava entre 0,50 mm e 10 mm, e as demandas iniciais aleatórias variaram de acordo com as informações de consumo do SAAE (2014), dentro do intervalo de 0,004 l/s a 0,056 l/s, devendo a soma dos consumos nodais sempre se apresentarem próximo do valor total consumo 2,189 l/s, valor encontrado através do método do consumo por metro da rede baseado também de acordo com as informações de consumo do SAAE (2014);

- Após os ensaios de calibração neste setor concluiu-se que a para uma rede de baixa vazão na entrada e pouca variação de pressão durante todo o dia, os modelos implementados ainda precisam de maiores ajustes e ainda a verificação dos coeficientes de vazamentos (C1 e N1), já que os valores adotados são referentes a rede real do setor "Monte Carlo". E ainda, mesmo o modelo proposto por Silva (2003) não apresenta resultados muito bons;

- Do mesmo modo que para a rede real do setor "Monte Carlo" os resultados de rugosidades e demandas nodais encontrados, para os dois modelos ensaiados para este setor,

foram também empregados ao *software* de simulação hidráulica Epanet. Os valores de pressão simulados no *software* Epanet com as variáveis de decisão do modelo proposto por Silva (2003) se mostraram mais próximos dos valores observados, mas o nó 159 não conseguiu ser calibrado pelo *software* Epanet neste cenário. Já com as variáveis de decisão do modelo implementado com a demanda aleatória o valor de pressão do nó 159 resultou em um valor mais próximo do observado.

6.2. Recomendações

Após o estudo e dos resultados obtidos e relatados podem ser consideradas as recomendações:

- Futuras campanhas de campo no setor de Cambuí (MG) para monitoramento de mais pontos de vazão no interior da rede de distribuição de água;
- Investigação dos coeficientes de vazamento (C1 e N1) para o setor de Cambuí (MG), através de ensaios noturnos para determinação de patamares de pressão, quando o consumo é quase inexistente;
- Ajuste simultâneo dos coeficientes de vazamento (C1 e N1) com calibração de rugosidades;
- Aprimoramento dos modelos implementados com os estudos de demanda aleatória e demanda dirigida por pressão para redes com pequena vazão na entrada do setor de redes de distribuição de água e baixa oscilação da pressão durante o período das 24 horas, como observado no setor real de Cambuí (MG);
- Realizar novas simulações tomando-se o cuidado de separação de vazamento e demanda nos nós, assim como testes considerando a condição sem vazamento na rede;
- Avaliar em novas simulações o estabelecimento de pressões mínimas e desejáveis para o modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999) para cada nó do setor em estudo;
- A distribuição inicial demanda estabelecida por comprimento de trecho ser substituída pelo método que adota o número de ligações;
- A etapa de aquisição de informações (incluindo válvulas e registros), cadastrais ou obtidas em campo, necessárias para o uso dos modelos de calibração devem ser realizada de maneira cuidadosa e sempre confrontados e verificados.

7. REFERÊNCIAS

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Perdas em sistemas de abastecimento de água: Diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e proposta de medidas para o efetivo combate. **Sumário Executivo**, set. 2013. Disponível em: <<http://www.abes-sp.org.br/arquivos/perdas.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2014.

ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/VerCroqui.aspx?arq=7785>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

ARSENE, C. T. C.; GABRYS, B.; AL-DABASS, D. Decision support system for water distribution systems based on neural networks and graphs theory for leakage detection. **Expert Systems with Applications - Journal Elsevier Ltda**, v.39, p. 13214-13224, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417412007968>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

BHAVE, P.R. Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Environmental Engineering**, v.114, n. 1, p.120, fev. 1988. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1988\)114:1\(120\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9372(1988)114:1(120))>. Acesso em: 28 ago. 2014.

^aBORGES, V. M. N. A.; FILHO, K. Z. Estado da arte em modelos de previsão de demanda de água na operação de sistemas de abastecimento. In: XXX CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2006, Punta del Este. XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este 2006. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/br02282_borges.pdf>. Acesso em: 07 maio 2014.

^bBORGES, V. M. N. A.; FILHO, K. Z. Integração de um modelo de previsão de demanda de água a um modelo simulador em tempo real na operação de sistemas de abastecimento. In: XXX CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2006, Punta del Este. XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,

Punta del Este 2006. Disponível em: <<http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/viewFile/14430/13765>>. Acesso em: 07 maio 2014.

BORGES, V. M. N. A.; FILHO, K. Z.; SOUZA, V. C.; SANTOS, P. C.; DETILIO, M. A.; MELLO, L. A. Modelagem hidráulica de sistemas adutores para operação em tempo real. In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DRENAGEM - SEREA, VIII., Jul. 2008, Lisboa. ANAIS... Instituto Superior Técnico – faculdade de engenharia da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008. p. 11. 1 CD-ROM.

BOULOS, P. F.; WOOD, D. J. Explicit calculation of pipe-network parameters. **Journal of Hydraulics Engineering**, v.116, n. 11, p. 1329-1344, nov. 1990. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281990%29116%3A11%281329%29>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

CARRIJO, I. B. **Extração de regras operacionais ótimos se sistemas de distribuição de água através de algoritmos genéticos multiobjectivo e aprendizado de máquina.** 2004. 234 f. Dissertação (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-01032005-154332/pt-br.php>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

CHEN, X.; LI, Z.; WAN, W.; ZHU, L.; SHAO, Z. A master-slave solving method with adaptive model reformulation technique for water network synthesis using MINLP. **Separation and Purification Technology - Journal Elsevier Ltda**, v.98, p. 516-530, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138358661200370X>>. Acesso em: 28 nov. 2014.

COLOMBO, F. **Calibração de modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água de sistemas reais admitindo vazamentos.** 2007. 200 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos,

SP, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-05042007-103413/pt-br.php>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

COSTA, L. H. M.; CASTRO, M. A. H.; RAMOS, H. Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima de sistemas de abastecimento de água. **Engenharia Ambiental e Sanitária**, v.15, n. 2, p. 187-196, abr./jun. 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n2/a11v15n2.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2013.

CUNHA, A. A. R. **Otimização energética em tempo real da operação de sistemas de abastecimento de água**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-23072009-100529/pt-br.php>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

ESSS - Engineering Simulation and Scientific Software. Curso à distância de Introdução às Técnicas de Otimização, março de 2015.

F. di PIERRO, F.; KHU, S.T.; SAVIC, D.; BERARDI, L. Efficient multi-objective optimal design of water distribution networks on a budget of simulations using hybrid algorithms. **Environmental Modelling & Software**, v.29, n. 2, p. 202-213, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815208001084>>. Acesso em: 18 dez. 2014.

FARES, H.; ZAYED, T. Evaluating water main failure risk using a hierarchical Fuzzy expert system. In: CSCE 2008 ANNUAL CONFERENCE - CSCE, 2008, Québec, QC. **ANAIS...** Department of Building, Civil, and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2008. p.11. Disponível em: <<http://users.encs.concordia.ca/~pavemark/Confrence%20Papers/39%20Risk%20of%20Water%20Mains%20Failure%20Using%20Hierarchal%20Fuzzy%20Expert%20System.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

FUJIWARA, O.; LI, J. Reliability analysis of water distribution networks in consideration of equity, redistribution, and pressure-dependent demand. **Water Resources Research**, v.34, n. 7, p. 18436-1850, jul.1998. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98WR00908/epdf>>. Acesso em: 28 nov. 2014.

GAMEN, L. O.; MARTINEZ, C. B.; VIANA, E. M. F. e NASCIMENTO, J. F. Calibração de um modelo de sistema de abastecimento de água usando Epanet. . In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DRENAGEM - SEREA, XI, 2012, Coimbra. ANAIS... Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra – Coimbra, Jun. 2012. p. 10. 1 CD-ROM

GOOGLE EARTH, Programa Google Earth 7, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/bdgpesq_googlemaps.php#tabela_dado>. Acesso em: 28 maio 2014.

JAIN, A.; VARSHINEY, A. K.; JOSHI, U. C. Short-Term Water Demand Forecast Modelling at IIT Kanpur Using Artificial Neural Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, ASCE, v.15, p. 299-321, 2001. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1014415503476>>. Acesso em: 07 maio 2014.

LAMOGLIA, H. **Estudo da correlação entre perdas de água e energia para setores do sistema de abastecimento de água da cidade de São Lourenço – MG**. 2013. 238 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2013.

LOPES, K. G. O.; COELHO, M. M. L. P.; LIBÂNIO, M. Aplicação do método da análise hierárquica na priorização da reabilitação de redes de distribuição de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, RBRH, v.16, n. 4, p. 181-194, out./dez. 2011. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/eedf46b2fec21fb19b948987549356c2_858d906366e58c5e52913ff5f59d2d2a.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2014.

MARTÍNEZ, F.; CONEJOS, P.; VERCHER, J. Developing an integrated model for water distribution systems considering both distributed leakage and pressure-dependent demands. In: WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT DIVISION CONFERENCE - ASCE, 26th, 1999, Tempe, Arizona, 1999. p.14. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgecv3/UserFiles/Sumarios/eedf46b2fec21fb19b948987549356c2_858d906366e58c5e52913ff5f59d2d2a.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2014.

NASIRIAN, A.; MAGHREBI, M. F.; YAZDANI, S. Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model. **Journal of Water Resource and Protection**, n. 5, p. 294-303, dez./jan. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.53030>>. Acesso em: 18 dez 2014.

OBRADOVIC, D.; LONSDALE, P. (1998). **Public Water Supply Models, Data and Operational Management**. British Library, Londres, 1998. p. 453.

ODAN, F. K. **Estudo de confiabilidade aplicado à otimização de operação em tempo real de redes de abastecimento de água**. 2013. 210 f. Dissertação (Doutorado em Ciências, Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-03092013-135015/pt-br.php>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

ODAN, K. F.; REIS, L. F. Hybrid water demand forecasting model associating artificial neural network with fourier series. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.138, p. 245-256, maio/jun. 2012. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29WR.1943-5452.0000177>>. Acesso em: 06 maio 2014.

ORMSBEE, L. E. Implicit Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.115, n. 2, p. 243-257, mar. 1989. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281989%29115:2%28243%29>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

ORMSBEE, L. E.; WOOD, D.J. Explicit Pipe Network Calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.112, n. 2, p. 166-182, abr. 1986. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1986\)112%3A2\(166\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0733-9496(1986)112%3A2(166))>. Acesso em: 29 ago. 2014.

ORMSBEE, L. E.; LINGEIREDDY, S.; CHASE, D. Optimal Pump Scheduling For Water Distribution Systems. In: MULTIDISCIPLINARY INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCHEDULING : THEORY AND APPLICATIONS - MISTA, 2009, Dublin, Irlanda, 2009. p. 16. Disponível em: <<http://www.mistaconference.org/2009/papers/341-356-072-P.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2014.

PÉREZ, R.; PUIG, V.; PASCUAL, J.; QUEVEDO, J.; LANDEROS, E.; PERALTA, A. Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. **Control Engineering Practice - Journal Elsevier Ltda**, v.19, p. 1157-1167, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066111001201>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

QI, C.; CHANG, N.-B. System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. **Journal of Environmental Management - Journal Elsevier Ltda**, v.92, p. 1628-1641, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479711000272>>. Acesso em: 06 maio 2014.

RENAUD, E.; MASSIAC, J.C. D.; BREMOND, B.; LAPLAUD, C. SIROCO. A decision support system for rehabilitation adapted for small and medium size water distribution companies. In: 2nd LEADING EDGE CONFERENCE ON STRATEGIC ASSET MANAGEMENT - LESAM, 2007, Lisbon, Portugal, 2007. p. 15. Disponível em: <<http://casses.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/04/RenaudSIROCO-Paper.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2014.

ROCHA, V. A. G. M.; ARAÚJO, J. K.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, M. G.; COSTA, L. H., M. Comparativa entre RNA, AG e Mígha na determinação de rugosidades através de

calibração de redes hidráulicas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, RBRH**, v.18, n. 1, p. 125-134, jan./mar. 2013. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=97&SUMARIO=1495>>. Acesso em: 03 set. 2014.

SAAE de Cambuí (MG). Serviço Autônomo de Água e Esgoto. 2014. Comunicação pessoal.

SAAE de Cambuí. Serviço Autônomo de Água e Esgoto. 2014a. Disponível em: <<http://www.saaecambui.com.br/historia-do-saae/>>. Acesso em: 13 ago. 2014.

SALVINO, M. M.; GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O.; ROCHA, N. B. S. Modelo iterativo de calibração de redes de abastecimento de água com vistas à reabilitação. In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO SOBRE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO E DRENAGEM - SEREA, XI., 2012, Coimbra. **ANAIS...** Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra – Coimbra, 2012. p. 15. 1 CD-ROM

SANTOS, A. C. N. **Estudo de calibração de uma rede de distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos**. 2010. 72 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2010. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0036252.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2014.

SANTOS, C. C. **Previsão de demanda de água na região metropolitana de São Paulo com redes neurais artificiais e condições socioambientais e meteorológicas**. 2011. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-25082011-155119/pt-br.php>>. Acesso em: 28 jun. 2013.

SARKER, R. C.; TRINIDAD, S. G.; IMTEAZ, M. Temperature and Rainfall Thresholds corresponding to water consumption in Greater Melbourne, Australia. In: 20th INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 2013, Adelaide, Austrália, 2013. p.7. Disponível em: <<http://www.mssanz.org.au/modsim2013/L7/sarker.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2014.

SILVA, F. G. B. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**. 2003. 234 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética. In: SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – SIBESA, VI., 2002, Vitória. **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) – Vitória, 2002. p. 16. Disponível em: <http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea_publicacoes13.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F.; KEPLER, A. S.; FORMIGA T. K.; CARRIJO, I. B. Modelos de calibração de rede de distribuição de água considerando fugas: Estudo de caso do setor real Monte Carlo. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2003, Curitiba. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003. p.20. Disponível em: <http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea_publicacoes16.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2014.

SILVA, F. G. B.; VIANA, A. N. C.; RIBEIRO, D. L. C. Studies using entropy to determine the optimal point of monitoring, studying in São Lourenço, MG, Brazil. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2013: SHOWCASING THE FUTURE, 2013, Cincinnati, Ohio, EUA. **Anais...** Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE) – Cincinnati, Ohio, EUA, 2013. p. 7.1 CD-ROM

SILVA, F. G. B.; BARROS, R. M.; LAMOGLIA, H. A.; RIBEIRO, D. L. C. Initial calibration studies of water distribution system – São Lourenço – MG, Brazil. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS 2013: SHOWCASING THE FUTURE, 2013, Cincinnati, Ohio, EUA. **Anais...** Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE) – Cincinnati, Ohio, EUA, 2013. p. 7.1 CD-ROM

SHAMIR, U.; SALOMONS, E. Optimal Real-Time Operation of Urban Water Distribution Systems Using Reduced Models. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.134, n. 2, p. 181-185, mar./abr. 2008. Disponível em:

<<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282008%29134%3A2%28181%29>>. Acesso em: 18 nov. 2014.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2011**, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=105>>. Acesso em: 19 maio 2014.

SOARES, A. K. **Calibração de modelo de rede de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas por pressão**. 2003. 178 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13102004-150130/pt-br.php>>. Acesso em: 20 maio 2014.

TSUTIYA, M.T. (2004). **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. p. 643.

TABESH, M.; JAMASB, R.; MOEINI, R. Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses. **Urban Water Journal**, v.8, n. 2, p. 93-102, abr. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2010.548525>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.125, n. 3, p. 277-285, mar. 1999. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281999%29125%3A3%28277%29>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

TUDOR, R.; LAVRIC, V. Optimization of Total Networks of Water-Using and Treatment Units by Genetic Algorithms. **American Chemical Society**, v.49, p. 3715-3731, mar. 2010. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie901687z>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

WALSKI, T. M. Technique for calibrating network models. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.109, n. 4, p. 360-372, out. 1983. Disponível em:

<<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281983%29109:4%28360%29>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

WALSKI, T. M. Case study: pipe network model calibration issues. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.112, n. 2, p. 238-249, abr. 1986. Disponível em: <<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?48340>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

WESTPHAL, K. S.; VOGEL, R. M.; KIRSHEN, P.; CHAPRA, S. Decision Support System for Adaptive Water Supply Management. **Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE**, v.129, n. 3, p. 165-177, maio 2003. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282003%29129%3A3%28165%29>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

WU, Z. Y.; WALSKI, T. M.; MANKOWSKI, R.; HERRIN, G.; GURRIERI, R.; TRYBY, M. Calibrating Water Distribution Model Via Genetic Algorithms. In: 2002 AWWA IMTECH CONFERENCE - AWWA, 2002, Cidade de Kansas, Estados Unidos, 2002. p. 10. Disponível em: <<http://www.genetic-programming.org/hc2006/Wu-Paper-5.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

YAZDANI, A.; OTOO, R. A.; JEFFREY, P. Resilience enhancing expansion strategies for water distribution systems: A network theory approach. **Environmental Modelling & Software - Journal Elsevier Ltda**, v.26, p. 1574-1582, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815211001770>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

ZAQUE, R. A. M.; SOARES, A. K.; LIMA, G. A. R. Influência do número de cenários na calibração de modelos de redes de distribuição de água. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - SILUBESA, XV, 2012, Belo Horizonte. **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) – Belo Horizonte, 2012. p. 17. 1 CD-ROM.

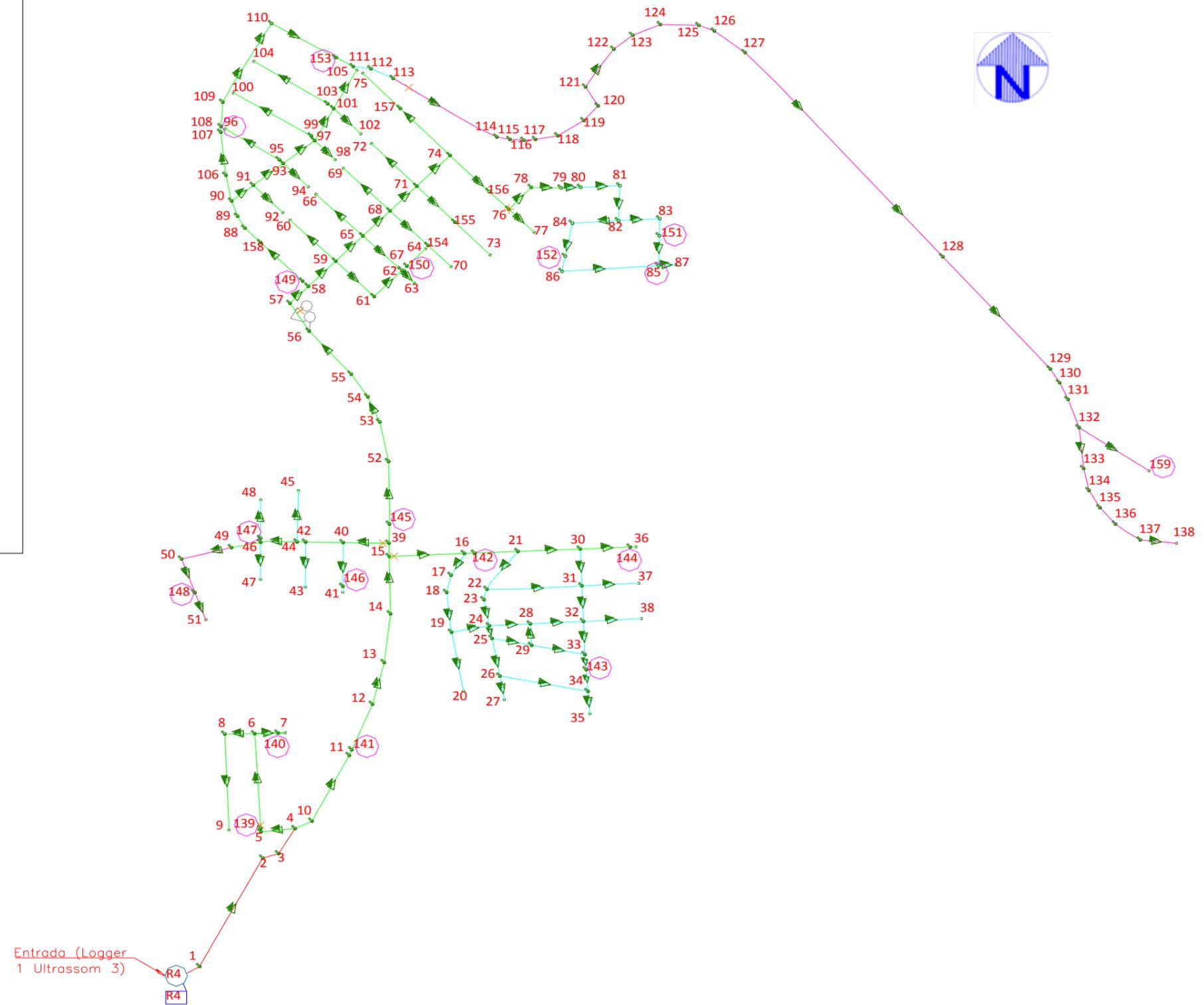
ANEXO A – Rede de distribuição de água do setor de Cambuí (MG): Bairros Água Branca, Vale do Sol, Vale das Montanhas, Vila Mariana e Vale das Rosas



ANEXO B – Localização dos nós na rede de distribuição do setor de Cambuí (MG): Bairros Água Branca, Vale do Sol, Vale das Montanhas, Vila Mariana e Vale das Rosas

LEGENDA:

-  Seta do sentido de escoamento
-  Nó
-  Pontos de monitoramento - Data Logger
-  Reservatório tubular
-  Reservatório tipo caixa
-  Tubulação - Ø 32 mm
-  Tubulação - Ø 50 mm
-  Tubulação - Ø 60 mm
-  Tubulação - Ø 75 mm
-  Tubulação - Ø 85 mm
-  Tubulação - Ø 150 mm
-  Válvula



ANEXO C – Informações fornecidas pelo SAAE do município de Cambuí (MG)

Tabela 15 – Dados da rede em estudo

Número de trechos	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Material tubulação
1	Entrada	1	85	18,96	PVC
2	1	2	85	172,62	PVC
3	2	3	85	21,78	PVC
4	3	4	85	41,00	PVC
5	4	5	60	44,93	PVC
6	4	10	60	24,71	PVC
7	5	139	60	4,80	PVC
8	6	140	60	30,80	PVC
9	6	8	60	39,43	PVC
10	8	9	60	134,04	PVC
11	10	11	60	103,91	PVC
12	11	141	60	8,55	PVC
13	12	13	60	60,27	PVC
14	13	14	60	68,61	PVC
15	14	15	60	80,06	PVC
16	15	16	60	99,02	PVC
17	15	39	60	18,57	PVC
18	16	17	50	35,05	PVC
19	16	142	60	13,45	PVC
20	17	18	50	24,62	PVC
21	18	19	50	55,99	PVC
22	19	20	50	83,55	PVC
23	19	24	50	50,58	PVC
24	21	22	50	67,32	PVC
25	21	30	60	82,04	PVC
26	22	23	50	15,07	PVC
27	22	31	50	124,82	PVC
28	23	24	50	37,20	PVC
29	24	25	50	17,97	PVC
30	24	28	50	54,16	PVC
31	25	26	50	53,53	PVC
32	25	29	50	53,35	PVC
33	26	27	50	33,68	PVC
34	26	34	50	118,29	PVC
35	28	32	50	70,03	PVC
36	29	28	50	29,90	PVC
37	29	33	50	71,52	PVC
38	30	31	50	52,21	PVC
39	30	144	60	65,73	PVC

Continuação da Tabela 15 – Dados da rede em estudo

Número de trechos	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Material tubulação
40	31	32	50	49,78	PVC
41	31	37	50	74,60	PVC
42	32	33	50	46,21	PVC
43	32	38	50	76,60	PVC
44	33	143	50	21,20	PVC
45	34	35	50	31,55	PVC
46	39	40	60	60,24	PVC
47	39	145	60	26,60	PVC
48	40	146	50	61,08	PVC
49	40	42	60	49,32	PVC
50	42	43	50	63,14	PVC
51	42	44	60	11,30	PVC
52	44	45	50	71,94	PVC
53	44	46	60	48,09	PVC
54	46	47	50	52,05	PVC
55	46	147	50	5,50	PVC
56	46	49	60	38,84	PVC
57	49	50	32	67,59	PVC
58	50	148	32	49,96	PVC
59	52	53	60	56,50	PVC
60	53	54	60	38,48	PVC
61	54	55	60	38,34	PVC
62	55	56	60	81,60	PVC
63	56	57	60	46,40	PVC
64	57	58	60	33,81	PVC
65	58	59	60	50,38	PVC
66	58	149	60	10,50	PVC
67	59	60	60	83,31	PVC
68	59	61	60	70,78	PVC
69	59	65	60	50,14	PVC
70	61	62	60	51,65	PVC
71	62	63	60	24,90	PVC
72	62	150	60	9,00	PVC
73	65	66	60	85,54	PVC
74	65	67	60	64,20	PVC
75	65	68	60	49,95	PVC
76	68	69	60	85,40	PVC
77	68	154	60	69,40	PVC
78	68	71	60	49,24	PVC
79	71	72	60	84,71	PVC
80	71	155	60	70,97	PVC

Continuação da Tabela 15 – Dados da rede em estudo

Número de trechos	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Material tubulação
81	71	74	60	61,23	PVC
82	74	157	60	92,71	PVC
83	74	156	60	71,87	PVC
84	76	77	60	46,55	PVC
85	76	78	60	42,54	PVC
86	78	79	60	39,30	PVC
87	79	80	50	25,60	PVC
88	80	81	50	53,74	PVC
89	81	82	50	48,80	PVC
90	82	83	50	54,40	PVC
91	82	84		60,66	PVC
92	83	151	50	23,80	PVC
93	84	152	50	46,99	PVC
94	85	87	50	22,05	PVC
95	86	85	50	127,25	PVC
96	88	89	60	19,32	PVC
97	89	90	60	22,5	PVC
98	90	91	60	36,06	PVC
99	90	106	60	36,90	PVC
100	91	92	60	55,65	PVC
101	91	93	60	49,70	PVC
102	93	94	60	47,64	PVC
103	93	95	60	7,43	PVC
104	93	97	60	52,18	PVC
105	95	96	60	82,70	PVC
106	97	98	60	39,22	PVC
107	97	99	60	7,88	PVC
108	97	101	60	51,26	PVC
109	99	100	60	118,93	PVC
110	101	102	60	50,40	PVC
111	101	103	60	10,36	PVC
112	101	105	60	61,53	PVC
113	103	104	60	113,80	PVC
114	106	107	60	60,50	PVC
115	107	108	60	7,87	PVC
116	108	109	60	34,08	PVC
117	109	110	60	127,22	PVC
118	110	153	60	97,50	PVC
119	111	112	50	23,77	PVC
120	112	113	50	32,19	PVC
121	113	114	32	159,18	PVC

Continuação da Tabela 15 – Dados da rede em estudo

Número de trechos	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Material tubulação
122	114	115	32	17,50	PVC
123	115	116	32	18,40	PVC
124	116	117	32	15,27	PVC
125	117	118	32	29,97	PVC
126	118	119	32	40,11	PVC
127	119	120	32	27,80	PVC
128	120	121	32	31,26	PVC
129	121	122	32	64,52	PVC
130	122	123	32	31,52	PVC
131	123	124	32	39,33	PVC
132	124	125	32	50,59	PVC
133	125	126	32	21,85	PVC
134	126	127	32	50,31	PVC
135	127	128	32	385,91	PVC
136	128	129	32	210,81	PVC
137	129	130	32	22,98	PVC
138	130	131	32	25,77	PVC
139	131	132	32	41,99	PVC
140	132	133	32	57,41	PVC
141	132	159	32	110,00	PVC
142	133	134	32	31,42	PVC
143	134	135	32	27,97	PVC
144	135	136	32	30,67	PVC
145	136	137	32	39,44	PVC
146	137	138	32	42,72	PVC
147	139	6	60	132,60	PVC
148	140	7	60	10,60	PVC
149	141	12	60	69,17	PVC
150	142	21	60	56,95	PVC
151	143	34	50	30,34	PVC
152	144	36	60	7,20	PVC
153	145	52	60	87,35	PVC
154	146	41	50	8,40	PVC
155	147	48	50	53,50	PVC
156	148	51	32	41,84	PVC
157	149	158	60	77,06	PVC
158	150	64	60	36,38	PVC
159	151	85	50	41,77	PVC
160	152	86	50	22,00	PVC
161	153	111	60	25,66	PVC
162	154	70	60	42,81	PVC

Continuação da Tabela 15 – Dados da rede em estudo

Número de trechos	Nó inicial	Nó final	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Material tubulação
163	155	73	60	65,44	PVC
164	156	76	60	36,07	PVC
165	157	75	60	69,69	PVC
166	158	88	60	28,87	PVC

 Serviço Autônomo de Água e Esgoto Amélia Lopes, 47- Centro Cambuí - MG Autarquia Municipal CNPJ: 00.460.408/0001- 46		Listagem dos usuários Bairro = LOT. ÁGUA BRANCA <i>Por logradouro</i>								<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">12/08/2014</div>	
Cód.	Usuário	End. Ligação	Bairro	Economias	Rota de leitura	Sit.	Serv.	Hidrômetro	Cons méd.	Dt ligação	
09258-5	RONALDO DE SALES	AV. BENTO JACINTO, 00050	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000580	A	1	A11N358832	00010	31/10/2011	
03773-9	CLAUDIO CLEMENTE BUENO	AV. BENTO JACINTO, 00110	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000620	A	1	A06N044431	00015	16/05/1988	
07745-3	CARLOS FLORIPES	AV. BENTO JACINTO, 00140	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000630	A	1	A07N034383	00022	02/05/2007	
03774-7	NATALIA DE QUEIROZ LIMA	AV. BENTO JACINTO, 00150	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000640	A	1	A08E087470	00028	15/04/1982	
04549-2	CARLOS FLORIPES	AV. BENTO JACINTO, 00160	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000650	A	1	A90L602280	00018	24/04/1998	
09022-5	ALESSANDRO DA SILVA DE OLIVEIRA	AV. BENTO JACINTO, 00191	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000660	A	2	A11N087858	00041	07/06/2011	
03772-1	MARIA REGINA DA SILVA	AV. BENTO JACINTO, 00220	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000590	A	1	Y98L022992	00016	15/06/1990	
08324-6	JOSE CARLOS YAMAMOTO	AV. BENTO JACINTO, 00220 B	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000600	A	1	A09N124438	00006	22/05/2009	
03784-6	MARIA ANGELA NOGUEIRA	AV. BENTO JACINTO, 00222	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000610	A	1	A07N288062	00013	-	
03775-4	VALOI DOMENICI	AV. BENTO JACINTO, 00342	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000670	A	1	A91T000026	00024	23/03/1982	
03788-7	MARIA ROSA MOREIRA	AV. BENTO JACINTO, 00352	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000680	A	1	A01N124115	00034	15/04/1988	
04115-2	JOSÉ CLAUDIO DE C. BASTOS	AV. BENTO JACINTO, 00355	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000710	A	2	A03L300665	00077	12/08/2003	
03776-2	JOSE MARIA DE LIMA	AV. BENTO JACINTO, 00368	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000690	A	1	A07N450846	00008	15/04/1996	
09375-7	JAIME FERNANDES COHEN	AV. BENTO JACINTO, 00370	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000700	A	2	A120062015	00046	19/04/2012	
03787-9	ANTONIO FELIPPE DE SALLES NETO	AV. BENTO JACINTO, 00390	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000720	A	1	A90L382086	00012	05/06/1995	
03786-1	WALDIRENE MENDES ANDRADE	AV. BENTO JACINTO, 00400	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000730	A	1	A03S228091	00070	-	
05333-0	ALCEU ANTONIO DA ROSA	AV. BENTO JACINTO, 00401	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000740	A	2	A99X009153	00026	29/05/2000	
05361-1	MARCO AURÉLIO DE SOUZA	AV. BENTO JACINTO, 00407	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000750	P	1	A90T623155	00000	07/07/2000	
03783-8	ROBSON ANTONIO DE MORAIS	AV. BENTO JACINTO, 00426	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000760	A	2	A03S174420	00087	-	
03777-0	ALAIDE SOARES SILVA	AV. BENTO JACINTO, 00436	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0000770	A	2	A03S172586	00002	12/05/1989	
06177-0	MARCOS KIYOSHI MORINISHI E CAIO	AV. BENTO JACINTO, 00476	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0001650	A	2	A02L328113	00009	02/09/2002	
06176-2	ANA MARIA MERLIM	AV. BENTO JACINTO, 00486	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0001670	A	2	A02N092620	00012	02/09/2002	
09713-9	FLAVIO OLIVEIRA PIRES	AV. BENTO JACINTO, 00496	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0001680	A	1	A12N422665	00009	19/07/2013	
09512-5	CRISTIANE SOUZA SANTOS MENDES	AV. BENTO JACINTO, 00540	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0001660	A	1	A12G075634	00008	22/10/2012	
04637-5	COLÉGIO NILTA D ONOFRIO CARVALHO	AV. BENTO JACINTO, 00575	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	I 02 00 00-0001690	A	2	A03S299677	00020	14/07/1998	
05322-3	ACQUA META	AV. BENTO JACINTO, 00575 A	LOT. ÁGUA BRANCA	01 B	I 02 00 00-0001700	P	2	A03S299671	00018	12/05/2000	
07828-7	ROTARY CLUB DE CAMBUI	AV. BENTO JACINTO, 00905	LOT. ÁGUA BRANCA	01 B	I 02 00 00-0001790	A	2	A07N043215	00002	03/08/2007	
03771-3	ALUIZIO BUENO	ESTR. ESTRADA AGUA BRANCA, S/N LOT. AGUA BRANCA ALUIZIO	LOT. ÁGUA BRANCA	01 A	J 02 00 00-0000010	A	1	A08E084719	00010	15/01/1990	
04033-7	GRUPO DE RODEIO DE CAMBUI	ESTR. ESTRADA AGUA BRANCA, S/N LOT. ÁGUA BRANCA RODEIO	LOT. ÁGUA BRANCA	01 B	G 03 00 00-0001350	P	2		00184	03/06/1983	

Figura 99 – Exemplo da listagem dos consumos dos usuários para o Bairro Água Branca no mês de julho de 2014. (Fonte: SAAE, 2014)

ANEXO D – Relatório da estação geodésia utilizado como base e fornecido pela empresa Geotec – Minas Sondagens e Serviços Ltda.

Relatório de Processamento dos Pontos					
GNSS Solutions, Copyright (C) 2010 by ASHTECH, 13/8/2013 13:50:39					
www.ashtech.com					
Nome do Projeto: GEOTEC 13_08_13/ Cambuí (MG)					
Sistema de Referência Espacial: SIRGAS2000 UTM FUSO23S					
Fuso Horário: (GMT-03:00) Brasília					
Unidades Lineares: Metros					
Resumo do Sistema de Coordenadas					
Sistema de coordenadas					
Nome:	SIRGAS2000 UTM		Projeção		
Projeto:	FUSO23S		Classe da Projeção:	Transversa_Mercator	
Tipo:	Projectado		latitude_of_origin	0° 00' 00.00000"W	
Nome da Unidade:	Metros		central_meridian	45° 00' 00.00000"W	
Metros por unidade:	1		scale_factor	0.999600000000	
Datum Vertical:	Elipsóide		false_easting	500000.000 m	
Unidade vertical:	Metros		false_northing	1000000.000 m	
Metros por unidade:	1				
Dado					
Nome:	SIRGAS2000		Pontos de Controle: 2		
Nome da Elipse:	GRS1980		Pontos de Referência: 0		
Eixo Semi-maior:	6378137.000 m		Pontos Levantados: 1		
Achatamento Inverso:	298.257222101		Pontos Alvo: 0		
DX para WGS84:	0.0000 m		Pontos Intermediários: 0		
DY para WGS84:	0.0000 m				
DZ para WGS84:	0.00000 m				
RX para WGS84:	0.000000 "				
RY para WGS84:	0.000000 "				
RZ para WGS84:	0.000000 "				
ppm para WGS84:	0.0000000000				
Pontos de Controle					
NOME	COORDENADAS	68.7%		ESTADO	
MG1N	Este	363219.729	0.001	Fixo	
	Norte	7531309.952	0.001	Fixo	
	Altura da elipse	883.720	0.004	Fixo	
MGVA	Este	454956.776	0.001	Fixo	
	Norte	7617734.104	0.001	Fixo	
	Altura da elipse	957.280	0.010	Fixo	
Pontos Levantados					
NOME	COORDENADAS	68.7%		ESTADO	
BASE	Este	390742.682	0.006	Ajustado	
	Norte	7497992.526	0.005	Ajustado	
	Altura da elipse	1016.228	0.014	Ajustado	
Arquivos					
NOME	Hora de Inicio	Int.Gravação	Épocas	Tamanho(Kb)	Tipo
GG00BF13.224	13/08/13 18:02	1	14479	25779L1/L2	GPS/GLONASS/IRNSS
mg1n2241.13c	13/08/11 21:00	15	5760	5596L1/L2	GPS/GLONASS
mgva2241.13c	13/08/11 21:00	15	5756	3131	L1/L2 GPS

Observações

POUNTO	Modelo Antena	Altura Antena	Tipo Antena	Modelo Receptor	Hora de Inicio	Nome do Ficheiro
BASE	MG0900506	1.080	Inclinada	ProMark500	13/08/12 18:02:43	G8008F13.224
MGIN	TRMS5971.00	0.000	Vertical	TRIMBLE	13/08/11 21:00:00	mgin2241.13c
MGVA	ASIN700700.B	0.109	Vertical	ASINTECH	13/08/11 21:00:00	mgva2241.13c

Processos

BASE	Arquivo da BASE	Móvel	Arquivo do Móvel	Modo	Num
MGIN	mgin2241.13c	MGVA	mgva2241.13c	Static	1
MGIN	mgin2241.13c	BASE	G8008F13.224	Static	2
MGVA	mgva2241.13c	BASE	G8008F13.224	Static	3

Vetores Processados

Vetor Formado	Comprimento Vetorial	RMS 68.7%		Componentes Vetoriais	Erro 68.7% SV PDOP	QA	Solução
MGIN - BASE 13/08/12 18:02	43231.061	0.027	X	10887.579	0.015 16 1.3		Fixo
			Y	28038.923	0.015		
			Z	-31051.636	0.015		
MGIN - MGVA 13/08/11 21:00	126087.653	0.218	X	88630.511	0.126 10 1.5		Fixo
			Y	41145.745	0.126		
			Z	79685.359	0.126		
MGVA - BASE 13/08/12 18:02	135935.376	0.074	X	-77742.859	0.043 9 1.8		Fixo
			Y	-13106.849	0.043		
			Z	-110737.008	0.043		

Vetores Ajustados

Vetor Formado	Comprimento Vetorial	Comprimento Resid.		Vetor Componentes	Resid.	Tests	QA
MGIN - BASE 13/08/12 18:02	43231.062	0.001	X	10887.580	0.001		
			Y	28038.922	-0.000		
			Z	-31051.636	-0.000		
MGIN - MGVA 13/08/11 21:00	126087.626	0.069	X	88630.448	-0.062		
			Y	41145.769	0.025		
			Z	79685.374	0.015		
MGVA - BASE 13/08/12 18:02	135935.384	0.011	X	-77742.869	-0.010		
			Y	-13106.847	0.003		
			Z	-110737.011	-0.003		

ANEXO E – Dados obtidos nas campanhas de campo à Cambuí (MG) em 2014

Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG)

Nós	Coord. Leste	Coord. Norte	Altitude (m)
R4	391709,7495	7497852,5761	958,73
1	391713,4399	7497857,2512	958,40
2	391809,2964	7498058,0750	926,38
3	391835,2560	7498072,7359	924,36
4	391859,7360	7498119,5611	916,79
5	391835,1127	7498123,9516	917,35
6	391806,4891	7498224,5708	896,55
7	391841,4613	7498253,5924	898,55
8	391767,8680	7498203,9916	894,37
9	391796,1944	7498099,7794	916,80
10	391900,0954	7498147,4386	920,79
11	391948,2395	7498211,6312	924,82
12	391949,5250	7498249,2660	925,10
13	391934,7648	7498367,6121	925,26
14	391934,1692	7498434,9691	923,98
15	391936,0189	7498492,1505	922,27
16	392037,5598	7498490,8872	902,98
17	392018,3311	7498445,2189	899,63
18	392017,0227	7498411,4413	898,36
19	392021,5497	7498379,8746	897,91
20	392036,3363	7498299,7983	910,26
21	392105,6765	7498488,1889	889,21
22	392069,7693	7498443,5352	891,16
23	392066,8727	7498424,1900	892,35
24	392069,9288	7498389,4505	892,30
25	392073,6309	7498371,8259	890,25
26	392084,0501	7498317,2273	896,37
27	392086,9238	7498293,3899	901,36

Continuação da Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG)

Nós	Coord. Leste	Coord. Norte	Altitude (m)
28	392121,3886	7498391,2399	885,39
29	392124,3904	7498361,7736	884,79
30	392193,6323	7498490,5726	873,56
31	392194,3892	7498441,0678	874,72
32	392194,1998	7498389,3650	872,47
33	392193,3864	7498346,9924	874,68
34	392194,0872	7498294,5387	875,52
35	392194,9308	7498266,3312	874,98
36	392260,4319	7498493,2905	869,76
37	392264,3487	7498443,2925	871,29
38	392254,3451	7498391,8259	870,87
39	391934,8942	7498506,2169	921,80
40	391874,2136	7498505,1193	908,98
41	391869,1366	7498440,3545	911,30
42	391825,5391	7498505,7484	898,02
43	391821,5280	7498452,2841	903,26
44	391813,9252	7498516,5368	895,88
45	391815,9306	7498580,8992	902,01
46	391763,8466	7498510,7098	887,18
47	391763,5764	7498468,5341	888,20
48	391764,4589	7498565,7269	888,40
49	391712,8124	7498507,1816	879,78
50	391660,2253	7498487,1152	876,83
51	391678,6418	7498431,5661	878,32
52	391935,1696	7498630,8051	918,60
53	391931,2926	7498646,5419	918,19
54	391920,8766	7498676,6195	917,70
55	391909,7574	7498700,5578	917,46
56	391868,7629	7498775,4097	916,19
57	391803,5522	7498829,0559	912,33

Continuação da Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG)

Nós	Coord. Leste	Coord. Norte	Altitude (m)
58	391844,0552	7498836,6719	912,03
59	391847,3221	7498836,4458	912,10
60	391822,0462	7498934,9265	898,84
61	391929,8579	7498814,8019	906,57
62	391964,2041	7498847,4909	894,73
63	391978,8983	7498831,4985	897,03
64	391996,3421	7498876,8097	882,11
65	391916,5036	7498905,6528	885,90
66	391857,8886	7498964,2614	885,45
67	391959,9825	7498852,3648	894,07
68	391952,3424	7498935,1973	876,21
69	391898,9013	7498998,1329	872,51
70	392028,8472	7498851,1024	883,70
71	391991,6269	7498968,7690	865,05
72	391936,7280	7499029,4460	863,60
73	392074,2575	7498874,2271	871,41
74	392034,7195	7499005,9996	862,23
75	391928,5463	7499126,5948	861,47
76	392108,7661	7498932,1118	862,90
77	392124,3435	7498906,9037	863,34
78	392137,5970	7498960,3957	866,24
79	392157,4434	7498949,8809	867,35
80	392241,9677	7498934,4380	865,32
81	392317,9633	7498928,0614	870,90
82	392303,8932	7498872,4243	865,46
83	392366,4063	7498860,5018	867,14
84	392239,0657	7498883,5047	864,04
85	392358,4493	7498812,3910	866,12
86	392224,0489	7498835,0262	863,62
87	392376,1979	7498808,9689	867,94
88	391772,3060	7498916,3613	905,75

Continuação da Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG)

Nós	Coord. Leste	Coord. Norte	Altitude (m)
89	391759,1706	7498934,7522	903,12
90	391751,5190	7498960,3960	901,51
91	391784,6343	7498974,5936	897,88
92	391758,4960	7498956,4442	901,14
93	391819,5313	7499004,9938	885,52
94	391849,8553	7498979,9386	885,12
95	392402,2147	7499163,4824	885,80
96	391743,4190	7499063,0895	891,58
97	391858,1373	7499042,7969	871,49
98	391886,4469	7499012,6877	872,00
99	391851,4962	7499049,9843	871,48
100	391750,9519	7499113,6823	879,24
101	391885,7253	7499085,9369	861,60
102	391923,7565	7499043,7362	863,51
103	391881,6001	7499093,3834	862,00
104	391783,5739	7499152,2147	865,51
105	391917,9608	7499130,2813	861,09
106	391741,4923	7499003,0282	900,08
107	391736,9726	7499050,7380	893,45
108	391739,5871	7499066,0035	891,48
109	391741,2674	7499100,0505	884,19
110	391810,6360	7499206,4855	859,74
111	391911,2651	7499146,1344	860,73
112	391941,0254	7499139,1393	863,85
113	391956,0134	7499128,7452	864,44
114	392118,1628	7499032,8035	875,56
115	392141,0087	7499032,2152	876,89
116	392166,7986	7499036,5686	877,29
117	392191,1099	7499047,1243	878,61
118	392222,4257	7499079,2160	879,27
119	392238,1294	7499105,4113	879,51

Continuação da Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG)

Nós	Coord. Leste	Coord. Norte	Altitude (m)
120	392257,4764	7499136,2134	880,02
121	392278,4645	7499160,3601	880,65
122	392310,6081	7499177,9386	881,77
123	392339,4912	7499183,2772	882,55
124	392373,0197	7499178,3345	883,93
125	392402,2147	7499163,4824	885,83
126	392418,9260	7499149,0297	886,04
127	392433,8459	7499132,8594	886,97
128	392599,1647	7498951,2064	900,38
129	392797,1516	7498731,6790	887,53
130	392810,6249	7498716,2427	886,85
131	392828,4032	7498693,8531	885,09
132	392842,7288	7498657,5701	882,58
133	392851,3767	7498609,5247	879,82
134	392854,8941	7498581,3741	878,20
135	392866,2902	7498546,3917	875,77
136	392893,5744	7498508,9259	872,19
137	392917,5302	7498489,3606	870,14
138	392990,2871	7498443,7430	866,63
139	391835,1460	7498115,2524	918,32
140	391832,3052	7498248,7725	896,87
141	391949,4117	7498225,3237	923,33
142	392052,7708	7498492,1072	900,04
143	392193,5711	7498370,9503	874,46
144	392253,4085	7498492,5166	870,04
145	391934,0887	7498514,2875	921,67
146	391868,9958	7498449,7899	910,67
147	391763,7754	7498521,1190	887,26
148	391665,8875	7498467,3259	877,13
149	391833,4233	7498847,6483	911,36

Continuação da Tabela 16 – Dados das coordenadas e altitudes dos nós da rede de distribuição de água no setor de Cambuí (MG)

Nós	Coord. Leste	Coord. Norte	Altitude (m)
150	391973,4503	7498854,7128	892,12
151	392358,5576	7498835,6317	866,27
152	392226,094	7498845,8351	863,80
153	391895,6852	7499150,3221	860,03
154	392001,8634	7498877,0640	880,47
155	392039,4128	7498909,4192	870,74
156	392084,8463	7498950,9616	862,68
157	391971,0081	7499104,0218	861,80
158	391783,5207	7498906,1178	907,28
159	392900,2140	7498652,8258	894,04

Tabela 17 – Dados de pressão dos nós monitorados no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG)

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

Continuação da Tabela 17 – Dados de pressão dos nós monitorados no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG)

Hora (min)	LOGGER 01	LOGGER 02	LOGGER 03	LOGGER 05	LOGGER 06	LOGGER 11	LOGGER 13	LOGGER 14	LOGGER 17	LOGGER 19	LOGGER 20
	Pressão (mca)										
23:00:00	1,89	17,20	7,67	57,97	15,87	38,10	45,90	48,30	24,20	45,30	11,00
23:59:00	1,96	16,99	7,61	60,12	17,78	49,20	46,50	50,70	25,00	46,10	11,50

Tabela 18 – Valores e horários das pressões mínimas, médias e máximas no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG)

Tempo (min)	12:33:00	23:12:00	02:51:00
Status Pressão	Pressão mín. (mca)	Pressão méd. (mca)	Pressão máx. (mca)
LOGGER 01	1,79	1,90	3,42
LOGGER 02*	11,00	16,72	28,56
LOGGER 03	7,80	7,65	7,39
LOGGER 05	44,84	58,53	65,84
LOGGER 06	7,32	16,28	24,49
LOGGER 11	26,60	38,30	65,30
LOGGER 13	40,80	46,40	61,10
LOGGER 14	38,90	48,99	57,40
LOGGER 17	20,00	23,89	28,00
LOGGER 19	40,30	45,40	57,10
LOGGER 20	2,10	11,00	23,40

*Obs.: Devido a uma queda de pressão repentina no intervalo de 12:28 à 12:36 horas foi adotado um valor médio de pressão igual a 11 mca para o nó 96, como mostra a Figura 100.

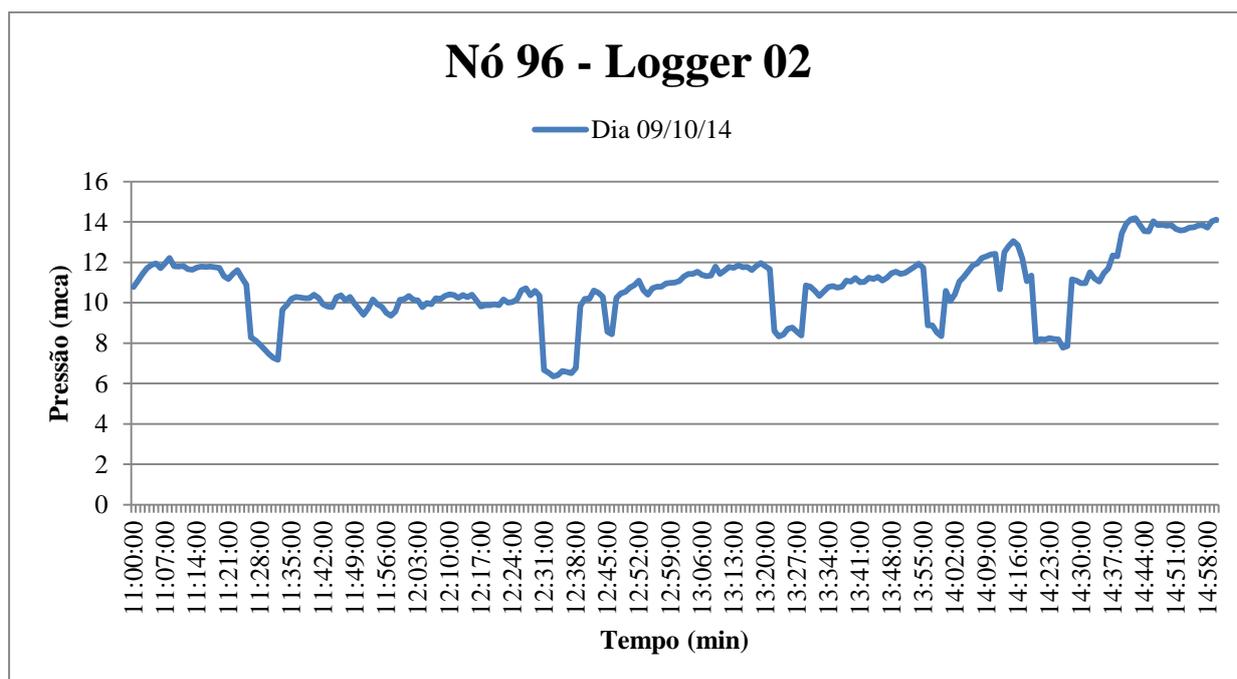


Figura 100 – Variação de pressão no nó 96 no dia 09 de outubro de 2014, das 11:00h às 15:00h.

Tabela 19 – Dados de vazão na entrada da rede monitorados no dia 09 de outubro de 2014 no setor de Cambuí (MG)

Hora (min)	ULTRASSOM 01
	Vazão (l/s)
00:00:09	2,784
01:00:09	2,831
02:00:09	2,759
03:00:09	2,642
04:00:09	2,422
05:00:09	2,183
06:00:09	2,500
07:00:09	2,762
08:00:09	3,197
09:00:09	3,374
10:00:09	3,243
11:00:09	3,76
12:00:09	3,404
13:00:09	3,358
14:00:09	3,067
15:00:09	3,194
16:00:09	2,997
17:00:09	3,029
18:00:09	3,21
19:00:09	3,049
20:00:09	3,145
21:00:09	3,055
22:00:09	3,04
23:00:09	2,910
23:59:09	2,844

Tabela 20 – Valores e horários das vazões mínimas, médias e máximas no dia 09 de outubro de 2014 na entrada do setor de Cambuí (MG)

Tempo (min)	12:33:00	23:12:00	02:51:00
Status Vazão	Vazão mín. (mca)	Vazão méd. (mca)	Vazão máx. (mca)
ULTRASSOM	2,67	2,96	3,38

ANEXO F – Informações referentes a rede hipotética

Tabela 21 – Propriedades dos nós da rede hipotética

Nó	Cota topográfica (m)	Consumo (l/s)
Reservatório	150	0,0
2	116	11,8
3	114	6,4
4	110	5,2
5	112	8,9
6	114	8,7
7	116	20,2

Tabela 22 – Propriedades dos trechos da rede hipotética

Trecho	Comprimento (m)	Material	DN	DN interno (mm)	ϵ teórica (mm)
1	1000	f ^o f ^o		366,20	0,06
2	1560	PVC		204,20	0,03
3	1870	PVC		156,40	0,03
4	1920	PVC		108,40	0,03
5	1000	PVC		108,40	0,03
6	1560	PVC		108,40	0,03
7	1790	PVC		156,40	0,03
8	1790	PVC		204,20	0,03

Tabela 23 – Valores de pressão e vazão simulados no *software* Epanet para a rede hipotética

Nó	Padrão 1 (12:00)	Padrão 2 (15:00)	Padrão 3 (01:00)
	Pressão (mca)	Pressão (mca)	Pressão (mca)
Entrada Setor	1,87	1,82	2,00
2	33,01	33,63	35,85
3	26,42	29,05	37,40
4	24,77	28,70	41,09
5	15,55	21,14	38,68
6	20,00	24,10	37,04
7	24,03	26,75	35,38
	Vazão (l/s)	Vazão (l/s)	Vazão (l/s)
Entrada Setor	91,80	79,56	18,36

ANEXO G – Dados do setor de rede real “Monte Carlos” obtidos pelo trabalho de Silva (2003)

NÓ	COTA DO TERRENO (m)	DEMANDA referência (L/s)	NÓ ORIGEM	NÓ 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

Figura 101 – Propriedades dos nós e trechos da rede real do setor “Monte Carlo”. (Fonte: SILVA, 2003)

NO	COTA DO TERRENO	DEMANDA	NO	NO	COMPRIMENTO	DIÂMETRO	RUGOSIDADE
	(m)	referência	ORIGEM	DESTINO	(m)	(mm)	(mm)
		(L/s)					
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

Figura 102 – Continuação das propriedades dos nós e trechos da rede real do setor “Monte Carlo”. (Fonte: SILVA, 2003)

Tabela 24 – Valores de pressão e vazão observados para a rede real do setor de “Monte Carlo”

Pressão (mca)							Vazão (l/s)	Condição de demanda
Nós							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

(Fonte: SILVA, 2003)

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 h, demanda média 9:00 h e demanda máxima 14:00 h.