

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Estudo de Modelo de Calibração para ajuste de parâmetros de rugosidade,
demanda e vazamento visando eficiência hídrica e energética em redes de
abastecimento de água. Estudo de caso em São Lourenço - MG**

Jéssica dos Santos

Itajubá, abril de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Estudo de Modelo de Calibração para ajuste de parâmetros de rugosidade,
demanda vazamento visando eficiência hídrica e energética em redes de
abastecimento de água. Estudo de caso em São Lourenço - MG**

Jéssica dos Santos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Engenharia de Energia

Linha: ESMA – Energia, Sociedade e Meio Ambiente.

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

**Abril de 2016
Itajubá – MG**

DEDICATÓRIA

À Deus, de quem me vem tudo, ao meu noivo Rodrigo, aos meus queridos pais e meus irmãos que ao longo deste período sempre me apoiaram e motivaram. E também a todos aqueles que contribuíram de direta ou indiretamente para a realização deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo amor infinito com que enche minha vida, pela oportunidade proporcionada por Ele para enfrentar cada desafio e pela alegria de testemunhar que Ele é o meu Senhor ao longo de toda esta pesquisa.

Agradeço ao professor e amigo Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, pela orientação, conselhos e por possibilitar a pesquisa nessa área de concentração. Obrigado por toda atenção, dedicação e conhecimentos compartilhados.

À toda equipe de pesquisa, com os quais pude aprender, refletir e avançar de forma conjunta durante grande parte da pesquisa. À mestre Thaisa Dias Goulart e ao mestre Diego Levit, aos mestrandos Mariele, Lucas e Fernando, e também aos graduandos Rodrigo e Iago, por todo auxílio nesta pesquisa.

À toda a equipe do SAAE de São Lourenço, agradecendo em especial ao Diretor Hemerson Jader Cunha, por toda disposição em colaborar com a pesquisa, seja através de informações, disposição de seu tempo e permissão para realização de trabalho de campo.

A professora Dra. Nívea Adriana Dias Pons, coordenadora do laboratório de geoprocessamento da UNIFEI, pela disponibilidade em nos auxiliar com a autorização de acesso aos equipamentos do laboratório para a coleta dos dados topográficos.

Ao técnico do laboratório de geoprocessamento da UNIFEI André, pelo auxílio no treinamento dos equipamentos de coletas topográficas e por transcender as possibilidades do trabalho em momentos de dificuldade, criando uma grande agilidade e harmonia ao ritmo da pesquisa.

Ao técnico do laboratório de geoprocessamento da UNIFEI André, por nos auxiliar no treinamento dos equipamentos de coletas topográficas e também por auxiliar em dúvidas durante o tratamento dos dados.

À todo minha família, em especial minha mãe Justina e meu pai Silvio, meus irmãos Renata e Gabriel, que sempre me estimularam a estudar e acompanhavam com empolgação cada avanço obtido durante a pesquisa. Aos meus queridos irmãos,

Ao meu amado noivo, quase esposo, Rodrigo. Por toda paciência e carinho que me acompanhou ao longo dos dois anos de mestrado. Pela paciência nas minhas ausências e pela força que me deu em cada desafio.

Aos amigos da Comunidade Theotokos e toda JAVÉ NISSI, por todo incentivo e paciência para entender minha falta de tempo.

Meus agradecimentos a CAPES DS pela bolsa de estudos e pesquisa concedida durante a fase de mestrado e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, que pela ajuda da bolsa provida através do projeto da FINEP, a pesquisa pôde ter continuidade e um melhor desenvolvimento. À FAPEMIG, pela participação na aquisição de equipamentos tão importantes para obtenção dos dados de campo e auxílio em viagem para apresentação de artigo no XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Brasília, DF. Agradeço também ao Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos – NUMMARH, pela oportunidade de participação junto ao projeto FINEP: Monitoramento, simulação e operação de sistemas de distribuição de água – 983-10.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram para esse trabalho direta ou indiretamente, sendo impossível agradecer a todos aqui.

RESUMO

Ao observar a necessidade de uma boa gestão hídrica para preservação deste recurso que já se faz escasso e garantir o acesso de todos a este bem vital, faz-se necessário o uso de ferramentas de gestão que facilitem e tornem mais eficaz o gerenciamento da água. Os modelos hidráulicos constituem uma ferramenta essencial em que a cada dia mais busca-se entender e aplicar às mais diversas situações. A boa precisão das previsões está diretamente relacionada com a boa calibração do modelo em estudo. A calibração dos modelos hidráulicos de previsão de comportamento das redes de distribuição de água requer uma reavaliação periódica dos parâmetros do modelo. A rede analisada está na cidade de São Lourenço – MG, sendo realizada a comparação entre os resultados de calibração da rugosidade obtidos a partir do modelo proposto por Silva, B. (2003) – Rotina 1 - em comparação com modelos onde é implementado os coeficientes de vazamento C1 e N1 por trecho com os modelos Caliman (2002) – Rotina 2 – e Caliman (2002) associado ao modelo Goulart (2015) – Rotina 3. Os resultados demonstraram que ocorreu melhoria dos resultados de pressão e vazão simulados para as rotinas 2 e 3 em relação a rotina 1, demonstrando que a calibração dos coeficientes de vazamento por trecho fornece melhorias da calibração. Entre os nós de monitoramento em que a pressão apresentou melhor ajuste através dos coeficientes de vazamento (C1 e N1) nas rotinas 2 e 3, observa-se melhor ajuste para a rotina 2 em relação a 3 na maioria dos nós. Para o ajuste dos coeficientes de vazamento C1 e N1, entre as 5 sequências aleatórias adotadas para as simulações da rotina 2, ambas convergiram para o mesmo valor dos coeficientes de vazamento C1 e N1 por área apesar da primeira sequência aleatória necessitar de um processo iterativo a mais que as outras. Esta convergência para o mesmo valor demonstra estabilidade do programa.

Palavras-chave: Calibração, coeficiente de vazamento, sistema de distribuição de água e eficiência hídrica e energética.

ABSTRACT

Observing the need for good water management to preserve this resource that is already being scarce and ensure access for all to this vital resource, it is necessary the use of management tools that facilitate and make more effective water management. Hydraulic models are an essential tool that every day more we seek to understand and apply to different situations. The good forecast accuracy is directly related to the proper calibration of the test model. The calibration of hydraulic models behavior prediction of water distribution networks requires a periodic review of the model parameters. The analyzed network is in São Lourenço - MG, being carried out to compare the roughness of the calibration results obtained from the model proposed by Silva, B. (2003) - Routine 1 - compared to models where it is implemented the leakage coefficients C1 and N1 of the portions Caliman models (2002) - routine 2 - and Caliman (2002) associated with Goulart model (2015) - routine 3. The results showed that there was improvement of pressure results and simulated flow Para as Routines 2:03 in relation to Routine 1 , Demonstrating que one Calibrating the stretch BY leakage coefficients provides improvements Calibration. Among OS WE monitoring in What the pressure presented Best fit through the leakage coefficients (C1 and N1) of the routines 2 and 3, it is observed Best Fit For Routine 2 in relation to 3 in most US. For setting the leakage coefficients C1 and N1 , Entre as 5 random sequences adopted Para as Routine 2 simulations , both converge to the same value of the leakage coefficients C1 and N1 FOR area despite the First random sequence need hum iterative process one rather than as OTHER . This convergence FOR SAME value demonstrates the stability program

Keywords: calibration, leak coefficient, water distribution and energy water efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos do sistema de abastecimento de água.	24
Figura 2 - Indicadores operacionais.	25
Figura 3 - Problemática da gestão da água.	26
Figura 4 - Fluxograma da metodologia de utilização dos DMC's para gestão de perdas de água.	31
Figura 5 - Passos para a calibração de um sistema de distribuição de água.	34
Figura 6 - Fluxograma simplificado de algoritmos genéticos aplicado à calibração.	37
Figura 7 - Técnicas utilizadas para previsão da demanda de água.	41
Figura 8 - Diagrama da estrutura básica do algoritmo genético.	46
Figura 9 - Fase do estudo de simulação de perdas em rede de abastecimento de água em que o Epanet é incluído.	49
Figura 10 - Membros do Grupo de Pesquisa em reunião semanal.	55
Figura 11 - Fluxograma das etapas do estudo.	56
Figura 12 - Vista área da cidade de São Lourenço - MG.	57
Figura 13 - Variação entre a renda média familiar para os três bairros da área de estudo.	58
Figura 14 - Panorama geral do bairro Morada da Serra.	59
Figura 15 - Panorama geral do bairro Palmela.	59
Figura 16 - Panorama geral do bairro Vale dos Pinheiros.	60
Figura 17 - Consumo total médio para os três bairros do setor de estudo.	60
Figura 18 - Representação esquemática de todo o sistema de abastecimento do município.	61
Figura 19 - Esquema do abastecimento de água do setor de estudo.	62
Figura 20 - Localização dos reservatórios, da entrada do setor de estudo e da ETA.	63
Figura 21 - Rede em estudo pertencente a um setor de abastecimento da cidade de São Lourenço - MG.	64
Figura 22 - Equipe de pesquisa após etiquetagem e testes dos equipamentos.	65
Figura 23 - Equipamentos etiquetados (<i>logger</i> e mangueira) já instalados em campo.	66
Figura 24 - Manômetro Bordon usado para comparação com resultados de pressão obtidos pelo <i>logger</i> de pressão.	67
Figura 25 - Pontos de monitoramento selecionados preliminarmente.	69
Figura 26 - Pontos de monitoramento da Campanha de 7 dias.	70
Figura 27 - Pontos de monitoramento campanha madrugada.	71
Figura 28 - Instalação dos <i>loggers</i> de pressão nas residências e proteção do aparelho.	72
Figura 29 - Professor orientador acompanhando em trabalho de campo.	72
Figura 30 - Ponto de monitoramento do nó 14 onde foi necessária a troca de torneira para efetuar as medições.	73
Figura 31 - Vedação da mangueira do <i>logger</i> de pressão a fim de evitar vazamentos e erro de medição.	74
Figura 32 - Desnível do cavalete do ponto de instalação do <i>logger</i> de pressão até o nível da rua.	75
Figura 33 - Distância à esquina mais próxima.	75
Figura 34 - Registros que fecham todo setor dos bairros Vale dos Pinheiros, Morada da Serra e Palmela.	78
Figura 35 - Localização dos registros ao longo da rede.	79
Figura 36 - Exemplos de registros onde são averiguados seu nível de abertura.	80
Figura 37 - Medidor de vazão ultrassônico.	82

Figura 38 - Funcionário do SAAE – São Lourenço acompanhando instalação de equipamento medidor de vazão no Poço de visitas – entrada do setor de estudo.....	82
Figura 39 - Zonas de pressão.....	83
Figura 40 - Fluxograma representando a rotina computacional utilizada.....	86
Figura 41 - Fluxograma dos passos da Rotina 2.....	88
Figura 42 - Organograma dos passos de simulação da Rotina 3.....	89
Figura 43 - Esquema cálculo consumo nodal por proporção consumo no trecho.....	91
Figura 44 - Registro de pressão no nó 14.....	95
Figura 45 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 14.....	95
Figura 46 - Registro de pressão no nó 105.....	96
Figura 47 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 105.....	96
Figura 48 - Registro de pressão no nó 51.....	97
Figura 49 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 51.....	97
Figura 50 - Registro de pressão no nó 111.....	98
Figura 51 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 111.....	98
Figura 52 - Registro de pressão no nó 109.....	99
Figura 53 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 109.....	99
Figura 54 - Registro de pressão no nó 116.....	100
Figura 55 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 116.....	100
Figura 56 - Registro de pressão no nó 112.....	101
Figura 57 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 112.....	101
Figura 58 - Registro de pressão no nó 103.....	102
Figura 59 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 103.....	102
Figura 60 - Registro de pressão no nó 117.....	103
Figura 61 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 117.....	103
Figura 62 - Registro de pressão no nó 113.....	104
Figura 63 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 113.....	104
Figura 64 - Registro de pressão no nó 62.....	105
Figura 65 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 62.....	105
Figura 66 - Registro de pressão no nó 85.....	106
Figura 67 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 85.....	106
Figura 68 - Registro de pressão no nó 108.....	107
Figura 69 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 108.....	107
Figura 70 - Registro de pressão no nó 115.....	108
Figura 71 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 115.....	108
Figura 72 - Registro de pressão no nó 114.....	109
Figura 73 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 114.....	109
Figura 74 - Variação da vazão ao longo de 7 dias de medição.....	110
Figura 75 – Variação da pressão para as medições de madrugada para formação dos patamares do nó 112.....	115
Figura 76 – Variação da pressão para as medições de madrugada para formação dos patamares do nó 117.....	115
Figura 77 – Variação da pressão para as medições de madrugada para formação dos patamares do nó 14.....	116
Figura 78 - Curva com a variação da vazão sucessivos fechamentos da válvula de controle..	116
Figura 79 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 2 - Área 1	119
Figura 80 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 2 - Área 2	119
Figura 81 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 2 - Área 3	120

Figura 82 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 3 - Área 1.	122
Figura 83 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 3 - Área 2	122
Figura 84 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias – Rotina 3 - Área 3.	123
Figura 85 - Comparação entre os valores de ajuste de vazão para as cinco combinações aleatórias em cada padrão de consumo - Rotina 1	124
Figura 86 - Comparação entre os valores de ajuste de vazão para as cinco sementes em cada padrão de consumo - Rotina 2 do Programa Silva, B. (2003).	125
Figura 87 - Comparação entre os valores de ajuste de vazão para as cinco sequências aleatórias em cada padrão de consumo - Rotina 3 do Programa Silva, B. (2003).	126
Figura 88 - Porcentagem de calibração da vazão para o programa Silva, B. (2003) nas 3 rotinas para o padrão 1 de consumo.	127
Figura 89 - Porcentagem de calibração da vazão para o programa Silva, B. (2003) nas 3 rotinas para o padrão 2 de consumo.	127
Figura 90 - Porcentagem de calibração da vazão para o programa Silva, B. (2003) nas 3 rotinas para o padrão 3 de consumo.	128
Figura 91 - Formato geral da evolução da função de aptidão ao longo do processo iterativo.	129
Figura 92 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 1	130
Figura 93 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 2.	131
Figura 94 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 3.	132
Figura 95 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 1.	133
Figura 96 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 2.	133
Figura 97 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 3.	134
Figura 98 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 4.	134
Figura 99 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 5.	135
Figura 100 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 1.	135
Figura 101 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 2.	136
Figura 102 - - Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 3.	136
Figura 103 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 4.	136
Figura 104 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 5.	137
Figura 105- Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 1.	137
Figura 106 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 2.	138
Figura 107 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 3.	138
Figura 108 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 4.	138
Figura 109 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 5.	139
Figura 110 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 14. ..	140
Figura 111 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 111.	140
Figura 112 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 103.	141
Figura 113 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 109.	142
Figura 114 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 116.	142
Figura 115 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 117.	143
Figura 116 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 113.	144
Figura 117 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 62. ..	144
Figura 118 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 85. ..	145
Figura 119 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 108.	145

Figura 120 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 115.	146
Figura 121 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 114.	146
Figura 122 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 105.	147
Figura 123 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 112.	148
Figura 124 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 51. ..	148
Figura 125 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados para a rotina 1 - padrão 1.	149
Figura 126 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados para a rotina 1 - padrão 2.	150
Figura 127 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados para a rotina 1 - padrão 3.	150
Figura 128 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a rotina 2 - padrão 1.	151
Figura 129 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 2 - padrão 2.	152
Figura 130 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a rotina 2 - padrão 3.	152
Figura 131 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 3 - padrão 1.	153
Figura 132 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 3 - padrão 2.	154
Figura 133 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 3 - padrão 3.	154
Figura 134 - Isolinhhas de pressão obtidas por meio do uso do Epanet e das rugosidades simuladas pela Rotina 2.	157
Figura 135 - Isolinhhas de pressão obtidas por meio do uso do Epanet e das rugosidades simuladas pela Rotina 3.	157
Figura 136 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 1.	158
Figura 137 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 1.	159
Figura 138 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 2.	159
Figura 139 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 3.	160
Figura 140 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 4.	160
Figura 141 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 1.	161
Figura 142 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 2.	161
Figura 143 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 3.	162
Figura 144 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 4.	162
Figura 145 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 87.	177
Figura 146 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 104.	177
Figura 147 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 105.	178
Figura 148 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 113.	178
Figura 149 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 103.	179
Figura 150 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 85.	179

Figura 151 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 62.	180
Figura 152 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 115.	180
Figura 153 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 114.	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações de posição para os cavaletes e respectivos nós de monitoramento.....	76
Tabela 2 - Caracterização dos registros da rede de abastecimento.	77
Tabela 2 - Caracterização dos registros da rede de abastecimento.	78
Tabela 3 - Distribuição dos registros ao longo da RAA (Rede de Abastecimento de Água).....	79
Tabela 4 - Passo a passo para realização da campanha da determinação de vazamento da rede de abastecimento.	81
Tabela 5 - Altitudes de cada ponto de monitoramento de pressão.	94
Tabela 6 - Horários equivalentes a cada padrão de consumo.....	110
Tabela 7 - Média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Morada da Serra.....	111
Tabela 8 - Média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Vale dos Pinheiros.	112
Tabela 9 - Média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Palmela.	113
Tabela 10 - Consumo médio dos bairros [L/s].....	113
Tabela 11 - Valor médio da pressão nos quatro patamares formados.	114
Tabela 12 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 1 – Rotina 2.	117
Tabela 13 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 2 – Rotina 2.	117
Tabela 14 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 3 – Rotina 2.	117
Tabela 15 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 4 – Rotina 2.	118
Tabela 16 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 5 – Rotina 2.	118
Tabela 17 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 1 – Rotina 3.	120
Tabela 18 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 2 – Rotina 3.	121
Tabela 19 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 3 – Rotina 3.	121
Tabela 20 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 4 – Rotina 3.	121
Tabela 21 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 5 – Rotina 3.	121
Tabela 22 - Porcentagem de calibração da vazão simulada para cada semente em relação à vazão medida (real) para a rotina 1 - Programa de Silva, B. (2003).	124
Tabela 23 - Porcentagem de calibração da vazão simulada para cada semente em relação à vazão medida (real) para a Rotina 2 do programa de Silva, B. (2003).	125
Tabela 24 - Porcentagem de calibração da vazão simulada para cada sequência aleatória em relação à vazão medida (real) para a Rotina 3 - Programa de Silva, B. (2003).....	126
Tabela 25 - Comparação entre os resultados de ajuste dos valores de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 1.	129
Tabela 26 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 2.	130
Tabela 27 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 3.	131
Tabela 28 - Rugosidade calibrada por trecho - Rotina 2.....	155
Tabela 29 - Rugosidade calibrada por trecho - Rotina 3.....	156

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Características do Conjunto Motobomba 1 que abastece o setor 4 -----	175
Anexo B – Características do Conjunto Motobomba 2 que abastece o setor 4 -----	176
Anexo C – Características do Conjunto Motobomba do Bôoster instalado no bairro Morada da Serra -----	177
Anexo D – Figuras da variação da pressão em função do tempo obtidos campanha de campo de madrugada para determinação dos coeficientes de vazamento -----	178
Anexo E – Setor da rede de Abastecimento de Água de São Lourenço -----	183

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AGs – Algoritmos Genéticos
- AR – Modelos Autoregressivos
- ARIMA- *Auto Regressive Integrated Moving Average*
- CCA - Canonical Correlation Analysis
- DMC's – Distritos de Medição e Controle
- DN – Diâmetro Nominal
- EE – Estação elevatória
- EPANET – *Software do Environmental Protection Agency*
- ETA – Estação de Tratamento de Água
- FO – Função Objetivo
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
- IDH – Índice de Desenvolvimento Humano
- IDHM – Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
- IPD – Índice de Perdas na Distribuição
- IRN – Instituto de Recursos Naturais
- LENHS – UFPB: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba
- MIGHA - Método Iterativo de Gradiente Hidráulico Alternativo
- NBR – Normas Brasileiras Regulamentadoras
- NUMMARH - Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos
- OLS - *Ordinary Least Squares*
- PNUD – Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
- PV – Poço de Visita
- RAA – Rede de Abastecimento de Água
- RNA - Redes Neurais Artificiais
- SAA – Sistema de Abastecimento de Água
- SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto
- SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*
- SDA – Sistema de distribuição de água

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

SPPS - *Statistical Package for Social Science for Windows*

TMA – *Time Marching Approach*

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

VRP – Válvula Redutora de Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

C – quantidade de padrões de consumo;

C_1 - constante da relação pressão vazamento

C_{N_x} = consumo no nó x

C_{T_x} = consumo no trecho x

D = diâmetro interno do tubo (m)

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)

g = aceleração da gravidade local (m/s^2)

h_f = perda de carga ao longo do comprimento do tubo (mca)

L = comprimento do tubo (m)

l = comprimento do trecho da rede, em m;

L = vazamento em L/s;

M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão;

N – conjunto de pontos de observação de valores de pressão;

N_1 - expoente da relação pressão-vazamento

n_c - conjunto de condutos de monitoramento dos valores de vazão;

n_n - conjunto de nós de monitoramento dos valores de pressão;

n_{po} - número de padrões de observação;

P – carga de pressão (m);

P_{ijSIM} e P_{ijOBS} - representam os valores de pressão simulada e observada, respectivamente, para o nó j e padrão de observação i ;

PA – Porcentagem de ajuste;

Q - é a média dos valores de vazão observados (L/s),

Q_{ikSIM} e Q_{ikOBS} - representam os valores de vazão simulada e observada, respectivamente, para o conduto k e padrão de observação i ;

sim – valores simulados

V = velocidade do líquido no interior do tubo (m/s);

VR – valor real;

VS – valor simulado;

W_h e W_q - pesos atribuídos à importância relativa de minimização dos desvios entre os valores calculados e observados de carga hidráulica e vazão respectivamente.

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. Objetivos Gerais	22
2.2. Objetivos Específicos	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Sistemas de abastecimento de água – Definição e gestão.....	23
3.2. Calibração dos modelos simuladores para rede de distribuição de água	31
3.3. Modelos matemáticos aplicados a previsão de demanda.....	39
3.4. Algoritmos genéticos	44
3.5. Ferramentas computacionais aplicadas ao processamento de dados	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1. Primeira fase	54
4.1.1. Área de estudo	57
4.2. Segunda fase	64
4.2.1. Treinamentos para manuseio dos equipamentos	65
4.2.3. Campanhas de campo	67
4.2.4. Zonas de pressão.....	82
4.3. Terceira fase.....	83
4.3.1. Determinação do consumo nodal	90
4.3.2. Cálculo dos coeficientes de vazamento	91
4.3.3. Porcentagem de ajuste	93
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
5.1. Resultados experimentais obtidos nas campanhas de campo	94
5.1.1. Variação da pressão ao longo do tempo	94
5.1.2. Variação da vazão ao longo do tempo.....	110
5.1.3. Consumo nodal.....	111
5.1.4. Patamares de pressão e vazão – campanha de madrugada	114
5.2. Resultados computacionais.....	117
5.2.1. Coeficientes de vazamento C1 e N1.....	117
5.2.2. Ajuste das vazões	123
5.2.4. Escolha do número de gerações.....	128
5.2.5. Resultados para função de aptidão	132
5.2.6. Pressões	139
5.2.7. Análise das rugosidades	155

5.2.8.	Zonas de pressão obtidas por meio d uso Epanet	156
5.2.9.	Interface computacional	158
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	163
7.	REFERÊNCIAS	166
	ANEXOS	174

1. INTRODUÇÃO

O cenário mundial tem apresentado a urgência de uma melhor gestão hídrica, visto que este recurso é essencial para a manutenção da vida e está a cada dia mais escasso. Em oposição à necessidade de se economizar e valorizar a água, verificam-se altos índices de desperdício e dificuldades para melhorar a qualidade da gestão dos recursos hídricos.

Dentre as ações para combate ao desperdício nas redes de abastecimento, gerenciar as perdas de água por meio de implementação de medidas preventivas é fundamental. Deve-se melhorar as ações para o aumento da vida útil dos elementos do sistema, melhorar sua operação e, ainda, buscar um programa que promova mudança cultural tanto do usuário quanto dos funcionários da empresa, para que as tomadas de decisão de todo este conjunto de pessoas promovam menores índices de desperdício.

Outro fator agravante é que as infraestruturas dos sistemas de abastecimento brasileiros são bastante antigas, que acelera o processo de deterioração, levando a uma maior frequência de manutenção corretiva.

O valor médio de perdas de água na distribuição no Brasil em 2010, segundo o Instituto TrataBrasil (2015) é de 37,5%. Há grande dificuldade em controlar estas perdas que podem prover de vazamentos, erros de medição e consumos clandestinos. Além da perda da água tratada, havendo desvio de seu destino, existem outros desperdícios embutidos, tais como gastos com tratamento (produtos químicos), com funcionários da companhia de água e com energia elétrica utilizada no bombeamento.

Um vazamento maior ou a maior frequência deste, numa determinada área da rede, ocasiona a redução da pressão para valores não permitidos, implicando em mau funcionamento do sistema e ausência de pressão adequada nas residências.

Faz-se necessário o uso de ferramentas que facilitem e tornem mais eficaz a gestão da água. Os modelos hidráulicos constituem uma ferramenta essencial que vem sendo aplicado nas mais diversas situações. A boa precisão das previsões está diretamente relacionada com a boa calibração do modelo em estudo.

O algoritmo genético é um método inspirado no processo de evolução natural (teoria da evolução de Darwin), que realiza busca global a partir da evolução de um conjunto de soluções, resolvendo assim, o problema de busca e otimização proposto. Visto que o algoritmo genético, além de ser aplicável à problemas como gestão de um sistema de distribuição de água, fornece bons resultados para problemas complexos, ele

é bastante usado na simulação hidráulica para calibração da rugosidade em redes de distribuição de água, apesar do tempo de processamento ser maior.

Alguns fatores dificultam a boa calibração, tais como: a falta de dados por parte das companhias de água ou a não disposição desses dados, e redes de distribuição que não possuem setorização. Na setorização das redes de abastecimento de água, a rede é dividida em Distritos de Medição e Controle (DMC's), a fim de obter áreas menores de controle, facilitando gerenciar valores de pressões e vazões. Esta divisão proporciona maior controle de perdas que ocorrem no sistema. A dificuldade de sua implantação é ser uma aplicação recente.

A boa simulação permite identificar áreas com as maiores pressões e maiores índices de vazamentos e facilita a tomada de decisões, favorecendo grandes melhorias na gestão do sistema de distribuição de água.

Algumas das ações que podem melhorar a gestão do sistema são: a determinação mais precisa da quantidade de energia deve ser inserida no sistema por meio de valores sobre o bombeamento e em quais faixas horárias (sendo que o excesso pode gerar ruptura das tubulações/vazamentos), e finalmente, a identificação de pontos da rede que necessitam de dispositivos redutores de pressão.

O estudo fundamenta-se nas melhorias da calibração dos valores de rugosidade e vazão para a rede de abastecimento de água de São Lourenço-MG, em relação ao modelo proposto por Silva, B. (2003) com a técnica de algoritmo genético, buscando valores ótimos de rugosidades. Para seu desenvolvimento, realizou-se o cálculo e inserção dos valores da demanda nodal, análise dos dados de pressão e vazão, e como importante passo o ajuste realiza-se a determinação dos coeficientes de vazamento C1 e N1 por trechos com base em dados de campanha de campo durante a madrugada por meio de implementação no modelo de Silva, B. (2003) de novas rotinas que utilizam os modelos de Caliman (2002) e Goulart (2015).

O projeto base do estudo está associado ao Fundo de Financiamento de Estudos de Projetos e Programas – FINEP, uma Agência Brasileira de Inovação que engloba seis universidades federais do país: UNIFEI, UFMG, UFMS, UFMT, UFPA e UFRGS.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Aplicação e aprimoramento de rotina de calibração de redes de distribuição de água por meio da calibração em estudo de caso real de redes de distribuição de água e análise do vazamento do sistema.

2.2. Objetivos Específicos

Foram desenvolvidos como objetivos específicos:

- Melhorar os resultados de pressão e vazão simulados pela Rotina 1 através da aplicação das rotinas 2 e 3 que consideram os coeficientes de vazamento C1 e N1, da inserção do desnível entre o cavalete e a tubulação na rua e das perdas de carga nos registros da rede;
- Analisar os valores dos coeficientes de vazamento C1 e N1 para as 5 sequências aleatórias adotadas para cada rotina, verificando a estabilidade do programa computacional;
- Reproduzir a metodologia de calibração de redes de distribuição de água por meio do modelo inicial desenvolvido por Silva, B. (2003) em FORTRAN. Esta rotina nomeada aqui de Rotina 1 de simulação, ajusta parâmetros de rugosidade para obter a calibração, tendo como referência pressões e vazões medidas e simuladas.
- Realizar simulações do modelo de Silva, B. (2003), que contém a Rotina de Caliman (2002), que além do ajuste de parâmetros de rugosidade, ajusta parâmetros de vazamento C1 e N1 – chamada de Rotina 2;
- Aplicar simulações do modelo de Silva, B. (2003), Rotina 2, associado à rotina de Goulart (2015), que ajusta valores de demanda nos nós da rede – nomeada aqui de Rotina 3;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sistemas de abastecimento de água – Definição e gestão

Um SAA (Sistema de Abastecimento de Água), segundo Pereira (2012), é o conjunto de infraestruturas e etapas destinadas ao abastecimento de água potável às populações entre as quais se destacam: a fonte de água, a captação, a adução (transporte de água, sem consumo durante o percurso), o tratamento, o armazenamento e a distribuição. Por vezes, torna-se ainda indispensável instalar estações elevatórias, de modo a garantir que a água chega a todos os locais de consumo, mesmo aos mais longínquos e elevados, e que o sistema de adução tenha o vazão e pressão adequados.

A figura 1 apresenta as partes do sistema de abastecimento de água, sendo os elementos descritos por Torres (2014), como:

- Ponto de captação – Extração de água bruta do meio hídrico superficial ou subterrâneo;
- Estação Elevatória (EE) – Elevação de água com o objetivo de que esta circule sob pressão e vença barreiras orográficas;
- Estação de Tratamento de Água (ETA) – Correção das características físicas, químicas e microbiológicas da água, de forma a torná-la adequada para o consumo humano, conforme a legislação aplicável;
- Adutora – Transporte de água tratada da zona de produção ou armazenamento para as zonas de consumo;
- Reservatórios de distribuição – Armazenamento de água tratada, de forma a assegurar a continuidade no abastecimento e a pressão na rede;
- Rede de distribuição – Distribuição da água pelos utilizadores em quantidade e pressão adequada às suas necessidades e de acordo com a legislação vigente.

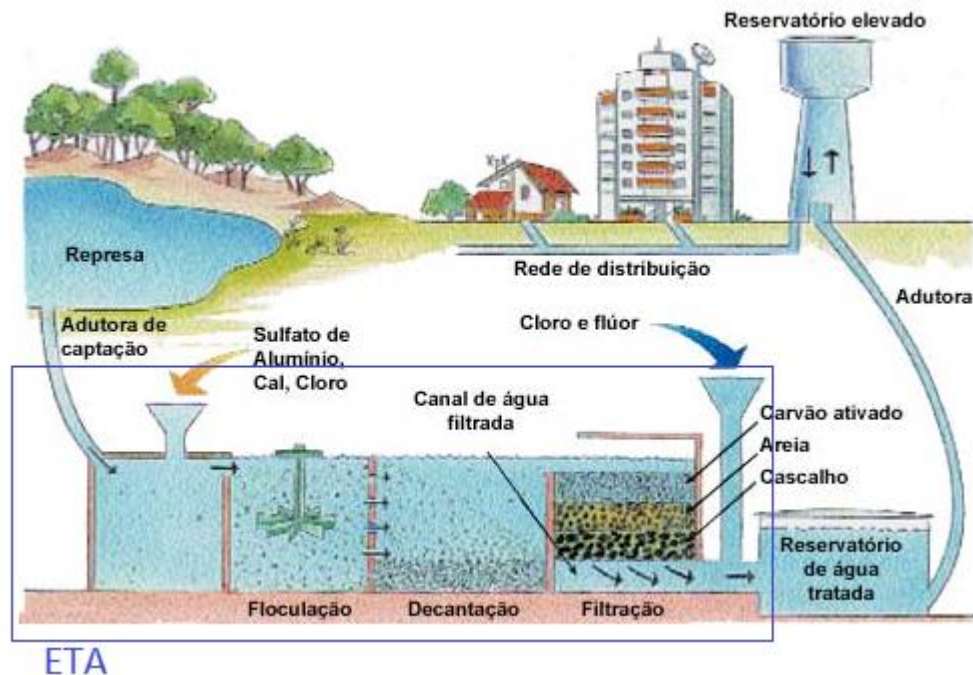


Figura 1 - Elementos do sistema de abastecimento de água.
Fonte: Modificado de AQUAFLUXUS (2015)

As redes de distribuições de água, segundo ODAN *et al.* (2014), são sistemas complexos compostos por tubos, reservatórios e estações de bombeamento. Estes sistemas estão sujeitos à demandas de consumidores de muitos tipos, como resultado de diversas necessidades. Além disso, as companhias de água devem atender à demanda de água com quantidade e qualidade adequadas, ao tentar reduzir os custos por meio de uma operação eficiente.

Como consequência, Tavares *et al.* (2014) descrevem a gestão operacional das infraestruturas urbanas de água, e em particular, de distribuição de água, como uma tarefa pesada e difícil devido à grande dispersão geográfica, a gestão de várias equipes, as muitas ordens de serviço, o processamento de grandes quantidades de dados, a coexistência de múltiplas aplicações computacionais e a necessidade de um conhecimento muito específico.

Devido esta complexidade, já em 1990 se alertava que a automação dos sistemas de abastecimento se fazia necessária, pois a operação de sistemas em tempo real é uma tarefa bastante complexa, e vinha como até atualmente vem recebendo atenção especial, face à necessidade de garantir a confiabilidade no atendimento dos serviços, redução do custo operacional, principalmente associado à energia elétrica e manutenção do sistema, retardando investimentos para a expansão dos sistemas (ZAHED FILHO, 1990).

A seguir são apresentados estudos e conceitos principais sobre sistemas de abastecimento de água nos últimos anos.

Os indicadores permitem uma avaliação sistemática dos sistemas de abastecimento de água. Alegre (1998) apresenta em seu estudo, exemplos de indicadores operacionais, que são citados no quadro da figura 2. Dentre eles, o indicador da “Manutenção preventiva”, que auxilia a classificar a qualidade desta manutenção na gestão da concessionária de água.

INDICADORES OPERACIONAIS			
<i>Operação de rotina</i>	Consumo de energia	(kWh/m ³ /ano)	Mobilidade do pessoal (veículos/km)
<i>Inspecção e manutenção</i>	Inspecção de adutores	(%/ano)	Detecção de fugas (%/ano)
	Inspecção de instalações elevatórias	(%/ano)	Inspecção de marcos de incêndio (%/ano)
	Limpeza de reservatórios	(%/ano)	Calibração de instrumentação (*) (%/ano)
	Inspecção da rede	(%/ano)	Inspecção de equipam. eléctrico (*) (%/ano)
<i>Monitorização de qualidade da água</i>	Amostras analisadas (*)	(Nº /10 ⁶ m ³ /ano)	
<i>Manutenção preventiva</i>	Reabilitação de condutas (*)	(%/ano)	Substituição de contadores (%/ano)
	Substituição de ramais	(%/ano)	Reabilitação de bombas (*) (%/ano)
<i>Perdas de água</i>	Perdas de água totais	(*) (l/km/ano)	
<i>Avárias e reparações</i>	Reparação de roturas e avarias	(Nº /km/ano)	Roturas em ramais (Nº /ramal/ano)
	Roturas em condutas	(Nº /km/ano)	Falhas de energia (horas/inst. elevatória/ano)
<i>Medição de caudal</i>	Frequência de leitura dos contadores	(Nº/contador/ano)	Eficiência da leitura de contadores (%)
			Taxa anual de substituição de contadores (%)

Figura 2 - Indicadores operacionais.

Fonte: Alegre (1998)

Assim, os indicadores constituem-se em importante ferramenta que auxilia na gestão do sistema de abastecimento. Como a empresa de abastecimento de água possui extenso conjunto de dados gerais que tratados, tornam-se informações importantes, Silva e Luvizotto Júnior (1999) apresentam estas informações como indicativos puros (ex.: número de consumidores, extensão da rede, volume produzido, volume consumido, etc). Com as devidas relações destes indicativos “puros”, pode-se obter valiosas informações de diagnóstico do sistema, chamadas de “guias” ou indicadores de gestão.

Exemplos de fatores limitantes da aplicação dos indicadores são descritos por Silva e Luvizzoto Júnior (1999), como a falta de uma cultura de manutenção de um banco de informações atualizadas, ausência de um rigor no trato destas informações, aliado ao desconhecimento do emprego de indicadores. Por isso, sua aplicação é inferior ao esperado no Brasil.

Outro elemento importante a se analisar é o planejamento do sistema de abastecimento. Para realizá-lo, é fundamental saber o tamanho da população a ser atendida, considerando o aumento constante da concentração urbana. Vários conflitos decorrem deste aumento populacional, sendo citados por Tucci *et al.* (2001), a degradação ambiental dos mananciais, o aumento do risco das áreas de abastecimento com a poluição orgânica e química, e a contaminação dos rios pelos esgotos doméstico, industrial e pluvial.

As soluções apresentadas por Tucci *et al.* (2001) para o desenvolvimento adequado das cidades são: capacitação dos profissionais dos municípios para melhor gerenciar os problemas existentes, criação de programas de apoio estaduais e federais para atender às necessidades dos municípios no assessoramento e no incentivo de programas de planejamento preventivos e finalmente, desenvolvimento de programas voltados para o financiamento de sistemas sanitários

O fluxograma da figura 3 descreve os elementos relacionados com a problemática da gestão da água.

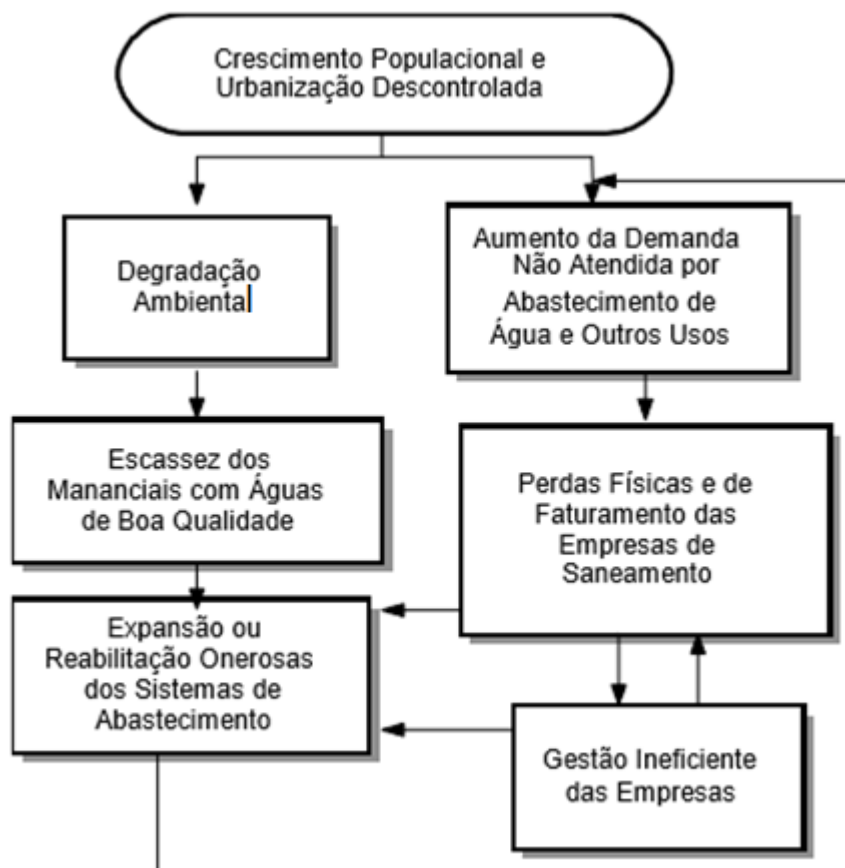


Figura 3 - Problemática da gestão da água.
Fonte: Venturini (2003)

Esta problemática da gestão da água ocasiona altos índices de perdas de água. Antes da análise das ações propostas para combater os altos índices, é importante compreender bem sua conceituação. Frangipani (2007) explica que as perdas de água englobam tanto as perdas reais (físicas), que representam a parcela não consumida, como as perdas aparentes (não-físicas), que correspondem à água consumida e não registrada. As perdas reais originam-se de vazamentos no sistema, vão desde a captação até a distribuição, além de procedimentos operacionais como lavagem de filtros e descargas na rede, quando esses provocam consumos superiores ao estritamente necessário para operação. E as perdas aparentes originam-se de ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados ou que submedem, fraudes em hidrômetros e outras. A redução de perdas reais diminui os custos de produção e as perdas aparentes e permite aumentar a receita tarifária, melhorando a eficiência dos serviços prestados e o desempenho financeiro do prestador dos serviços.

De acordo com o Índice de Perdas na Distribuição (IPD), Gomes (2007 *apud* Silva, O. 2014) classifica a qualidade do gerenciamento dos SDA em três categorias:

- $IPD > 40\%$ - Sistema com mau gerenciamento;
- $40\% \geq IPD \geq 25\%$ - Sistema com gerenciamento de nível intermediário;
- $IPD < 25\%$ - Sistema com bom gerenciamento.

Quanto aos investimentos na área da gestão deste setor para o Brasil, Morais, *et al.* (2010) citam quatro características principais:

1. Devido à escassez de recursos financeiros, as empresas de saneamento procuram solucionar os problemas com ações locais, que não contemplam melhorias no longo prazo e na maioria das vezes, têm caráter emergencial.
2. Os esforços focam-se nas ampliações da capacidade de produção e distribuição, sem que sejam questionados os parâmetros vigentes de operação e controle das diversas unidades operacionais dos sistemas.
3. Atualmente, com o desgaste gradual dos recursos hídricos e as limitações impostas aos recursos financeiros disponíveis, o controle operacional assumiu a mais alta prioridade, tendo em vista que a questão das perdas

está relacionada à falta de investimento na manutenção da estrutura de distribuição.

4. As deficiências operacionais dos sistemas de abastecimento de água são ocasionadas tanto pelo elevado incremento na demanda nos últimos anos, como pela gestão inadequada dos recursos e das atividades de conservação. Dessa forma, os aumentos nas interrupções no fornecimento de água são comuns, o que gera a insatisfação de seus usuários.

A fim de apoiar o gestor na priorização das áreas críticas de perdas de uma cidade, Morais, *et al.* (2010) apresentam o modelo multicritério, baseado no método PROMETHEE I¹. Este modelo visa a alocar investimentos de tempo e de recursos para sistemas de abastecimento de água de uma maneira mais eficiente, focando os seus esforços nas regiões mais críticas.

Referente às ações a serem consideradas para redução de perdas, Almeida *et al.* (2012) citam o gerenciamento de pressões como a principal iniciativa que deve ser adotada quando se deseja reduzir perdas reais em um sistema de distribuição de água, sendo necessário responder a algumas perguntas: qual a área ideal que deve ser usada para delimitar a fim de instalar os dispositivos de controle de pressão; qual a melhor configuração para obtenção do maior ganho; e quais as pressões dinâmicas que devem ser encontradas nessa quadra ou imóvel.

Com a escassez dos recursos hídricos, já ocorre um maior empenho atualmente no combate às perdas de água. Outro fator que favorece ações que minimizem as perdas conforme Silva (2012), é o estímulo às concessionárias de água à Instrução Normativa nº. 02/2011, do Ministério das Cidades (Brasil, 2011), que estabelece como um dos requisitos para liberação de financiamentos para a ampliação do sistema de abastecimento de água, mutuários públicos e o percentual de perdas máximo (o maior entre valores percentuais das perdas na distribuição e faturamento). Neste documento, ficou definido que os prestadores de serviços somente receberão recursos para ampliação destes sistemas, se este índice não superar 40%. Caso contrário, será necessário incluir no respectivo projeto o componente de controle de perdas ou ter sua execução acompanhada pelo desenvolvimento de programa de redução de perdas.

Outro limitador de perdas que é usado como referência na gestão é a NBR 12218/94, da ABNT (ABNT, 1994), “Projeto de rede de distribuição de água para

abastecimento público”, que determina o valor de 500 kPa de pressão estática máxima nas tubulações da rede de distribuição e 100 kPa de pressão dinâmica mínima.

Mutikanga (2012) desenvolve a análise completa das ferramentas e métodos de gestão de perda de água, a fim de identificar lacunas de conhecimento e necessidades de pesquisa *state-of-the-art*. As principais conclusões obtidas neste estudo foram: (i) existem várias ferramentas e metodologias a serem aplicadas para o gerenciamento de perda de água que variam de ferramentas de gestão simples, como indicadores de desempenho para os métodos de otimização evolutiva altamente sofisticadas para a detecção de vazamento; (ii) alta variação de perdas de água de 3% do volume de entrada do sistema nos países desenvolvidos e 70% nos países em desenvolvimento; (iii) as ferramentas e metodologias existentes ou não podem ser diretamente aplicados ou não abordam plenamente todos os aspectos da gestão de perdas de água nos países em desenvolvimento; (iv) a maioria das ferramentas e metodologias desenvolvidas em vazamentos e pouco tem sido feito até agora sobre as perdas aparentes que são significativos nos sistemas de distribuição de água dos países em desenvolvimento; (v) gerenciamento de pressão é uma estratégia poderosa e de baixo custo para a gestão de vazamento; (vi) não há metodologia clara para a priorização de estratégias de redução de perda de água, e (vii) não metodologia clara para a realização da análise dos níveis econômicos de perdas de água. Portanto, conforme Mutikanga (2012), existem lacunas de conhecimento e há necessidade de desenvolver ferramentas e metodologias mais apropriadas que holisticamente abordam as características únicas do sistema dos sistemas de distribuição de água nos países em desenvolvimento.

Como metodologias de redução de perdas, Marques (2013) descreve duas opções. A primeira refere-se à gestão da pressão à entrada do sistema ou subsistema (mais comum na prática), por meio da instalação de diferentes tipos de dispositivos de redução da pressão (VRP com pressão fixa à saída, VRP modulada por tempo e VRP modulada por pressão no ponto crítico); e a segunda, baseia-se na primeira, e refere-se à setorização de redes de distribuição de água de grandes dimensões para fornecer aos gestores uma melhor compreensão das condições da infraestrutura atual e futura e escolher o plano de investimento mais adequado a curto, médio e longo prazos, de forma a aumentar o desempenho global do sistema.

Já para a problemática da gestão das várias ordens de serviço, uma opção é apresentada por Marques *et al.* (2014), que desenvolveu o AQUAFIELD, uma solução de mobilidade que facilita o processo de gestão de ordens de trabalho de redes de água e

saneamento. O AQUAFIELD gerou muitas melhorias na gestão global das redes de água, entre elas: eficiência operacional, aumento da qualidade do serviço ao cliente, maior qualidade da informação e benefícios ambientais.

A complexidade da rede de abastecimento muitas vezes dificulta a análise da fonte dos problemas e dos locais onde se deve agir. Assim, a disposição da rede que favorece a gestão é apresentada por Sousa Júnior (2015), que demonstra que face à complexidade dos sistemas de distribuição de água, a existência de subdivisões em sistemas menores para delimitar várias áreas de abastecimento, permitem analisar isoladamente cada área e, assim, definir e orientar ações localizadas que possibilitam uma gestão mais adequada.

Assim, Sousa Júnior (2015) apresenta a metodologia que se baseia na subdivisão do setor, onde avalia-se a utilização dos DMC's, Distritos de Medição e Controle que abrangem áreas menores de controle, mais gerenciáveis em termos de pressões e vazões, o que facilita a redução de perdas que ocorrem no sistema de distribuição), como ferramenta efetiva na gestão de perdas de água e a propor uma metodologia para aprimorar os trabalhos de redução dessas perdas. A figura 4 apresenta detalhadamente os elementos para desenvolvimento da metodologia.

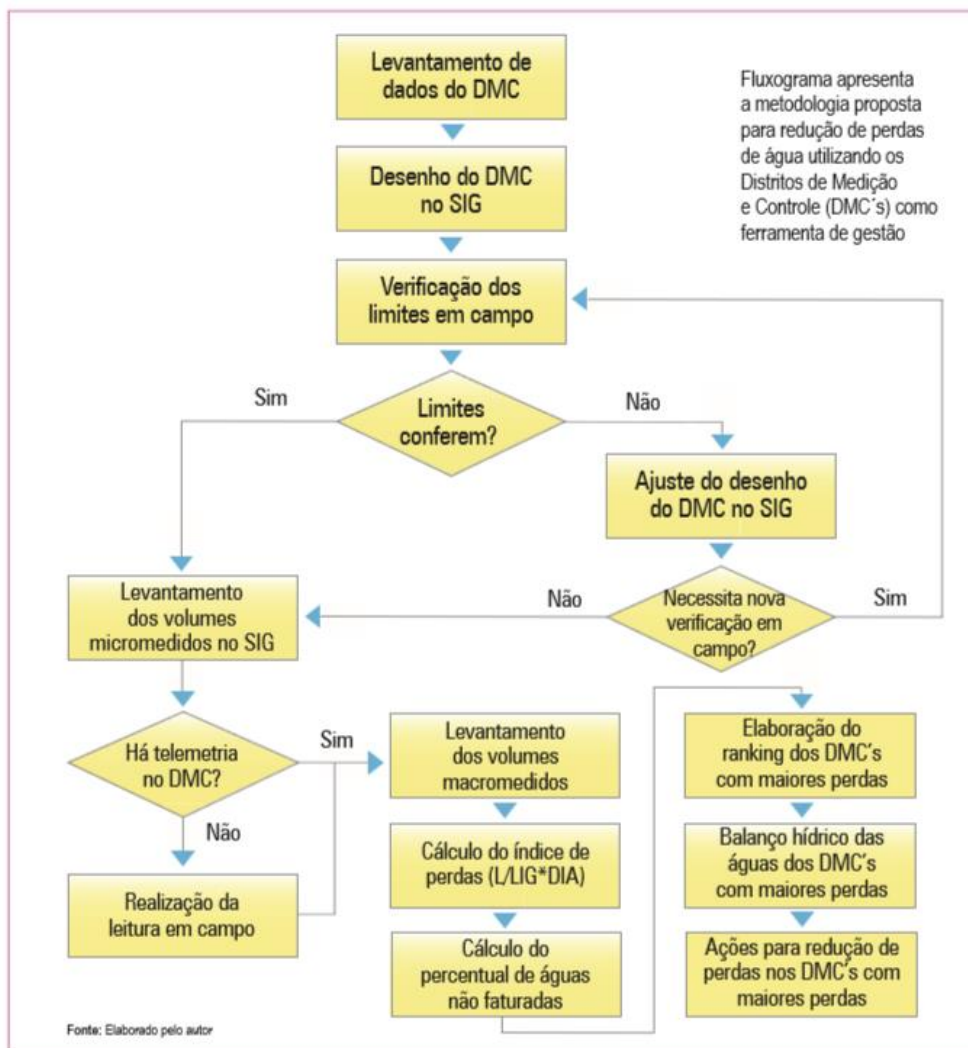


Figura 4 - Fluxograma da metodologia de utilização dos DMC's para gestão de perdas de água.
Fonte: Sousa Júnior (2015)

3.2. Calibração dos modelos simuladores para rede de distribuição de água

A calibração é definida por Santos, F. (2013) como o conjunto de operações que estabelecem a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição e os valores representados por uma medida materializada ou um material de referência. Para as SDA, a calibração refere-se à aproximação dos resultados obtidos por um modelo matemático aos valores fornecidos pelas medições.

Santos, F. (2013), pesquisador de Portugal, mostra que um SDA se encontra calibrado quando este não produza um erro superior ao admissível, que representa com a fiabilidade a realidade e que o erro da calibração se refere à diferença entre os valores

estimados pelo modelo matemático ajustado e os valores reais, obtidos por medição no terreno.

O uso da calibração é bastante aplicado, pois não há variedade de processos de medidas que sejam econômicas e confiáveis para obtenção de dados de rugosidade das tubulações e de distribuição de vazões. Assim, a melhor solução é o ajuste dos parâmetros necessários para produzir resultados que melhor se ajustem as condições reais observadas nos dados medidos em campo.

Obter modelos matemáticos dos sistemas de distribuição com elevada qualidade é possível hoje, com base nos sistemas cadastrais, nos sistemas de monitorização, controle e supervisão (*Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA*) (MARQUES, 2013). E para isso, faz-se necessário a longa e árdua tarefa de calibração para a confiabilidade dos resultados obtidos.

Conforme Rocha *et al.* (2009), o processo de calibração é importante porque as equações de condições de equilíbrio hidráulico dependem de vários fatores, como características do fluido transportado, geografia local e aspectos físicos das peças do sistema, traduzindo-se, portanto, em uma grande quantidade de variáveis envolvidas e, o uso adequado e preciso, tanto quanto possível dessas variáveis se traduzirá na confiabilidade dos modelos hidráulicos.

O processo de calibração que utiliza RNA (Redes Neurais Artificiais), conforme Rocha *et al.* (2011), consiste em treinar a rede neural por meio de uma série de dados sintéticos, obtidos por intermédio da variação conhecida dos parâmetros que se deseja calibrar. Após a rede neural estar treinada, pode-se obter os valores dos parâmetros calibrados após fornecer os valores medidos de pressão e vazão.

Alegre *et al.* (2006) apresentam como elementos da verificação e calibração de um modelo:

- Identificação das anomalias de funcionamento do modelo;
- Análise de falhas e correção por meio de um processo iterativo e;
- Verificação da conformidade dos resultados obtidos com os dados de projeto, medições de vazão e pressão, etc.

As fases que envolvem o processo de calibração de um sistema de distribuição de água (figura 5) são apresentadas por Ormsbee e Lingireddy (1997) como sendo sete:

1. Identificar a finalidade do modelo – este passo envolve a identificação do objetivo do modelo, analisando o valor do erro que será considerado admissível;

2. Determinar a estimativa inicial dos parâmetros de calibração – nesta fase busca-se calcular, por meio de regras heurísticas, que contêm algum grau de incerteza, os valores previstos de certos parâmetros como rugosidade dos condutas e consumos nos nós;

3. Recolher os dados para a calibração – levantamento dos dados medidos em campo, por meio de testes e ensaios;

4. Avaliar os resultados do modelo – análise dos resultados do modelo, por meio dos dados estimados no segundo passo e coletados no terceiro, a fim de validar o modelo pela comparação com a realidade;

5. Macro-calibração – Avaliação das fontes dos erros obtidos no passo anterior, visto que, quando este valor excede os 30%, estará provavelmente associado a um erro adicional e não só à estimativa inicial dos parâmetros, podendo estar relacionado com a não detecção de um registro fechado;

6. Análise de sensibilidade – Varia-se os parâmetros para a análise dos efeitos associados a fim de identificar os componentes e parâmetros que mais influenciam o comportamento da rede, e que mais influenciam no erro observado no SDA; e

7. Micro-calibração – já tendo alcançado um grande nível de aproximação com a realidade, ajusta-se os parâmetros anteriormente estimados, tais como a rugosidade dos condutos.

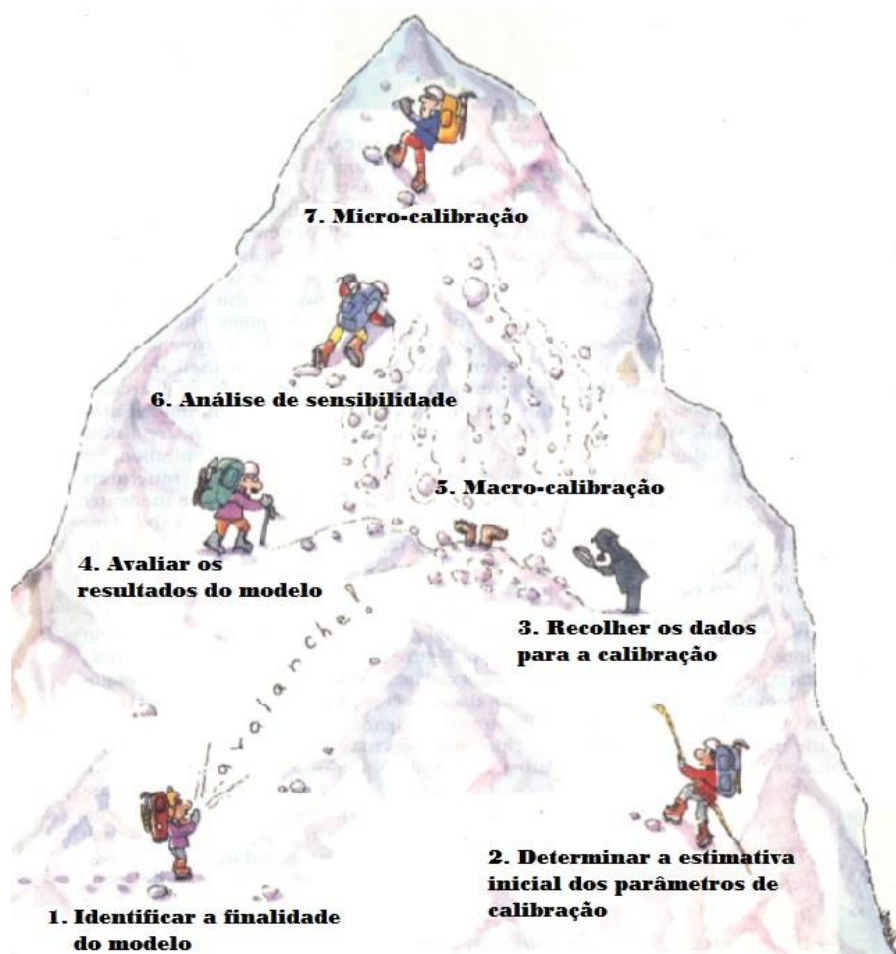


Figura 5 - Passos para a calibração de um sistema de distribuição de água.
 Fonte: Modificado de Ormsbee e Lingireddy (1997).

As técnicas utilizadas para calibração de rugosidades de redes de distribuição têm sido desenvolvidas desde a década de 70 e são apresentadas como divididas em três classes, conforme Rocha *et al.* (2011): (1) procedimentos de tentativa e erro por meio do uso de equações analíticas (WALSKI, 1983; BHAVE, 1988); (2) métodos explícitos ou simulação hidráulica (ORMSBEE e WOOD, 1986a e 1986b; BOULOS e WOOD, 1990); e (3) métodos implícitos ou otimização.

Existe diferença entre a calibração de um sistema de medição e a calibração numérica aplicada a um sistema de abastecimento. Segundo Salvino (2012), a calibração de um sistema de medição consiste em um conjunto de operações, sob condições específicas e controladas, que relaciona os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. Já a calibração de modelos numéricos de um sistema de abastecimento aproxima

os valores calculados ou simulados de um modelo hidráulico tomando por referência as medições em diversos pontos da rede real. A calibração ainda utiliza dados das medições de pressão e vazão, simultaneamente, propiciando uma tentativa de ajuste mais complexa, quando comparada com uma calibração de um sistema de medição.

Vários autores têm desenvolvido estudos sobre calibração de rede de abastecimento de água nos últimos anos. A seguir, são apresentados alguns destes estudos e a metodologia aplicada por cada um.

Pizzo e Luvizotto (2001) apresentam em seu estudo um modelo para calibração baseado no acoplamento de um modelo hidráulico, o *Time Marching Approach* (TMA). Com o modelo de busca de Nelder-Mead, em que se considerou valores de pressão monitorados, sendo possível também trabalhar com o monitoramento de vazões ou de vazões e pressões simultaneamente. O TMA consiste em um método de evolução no tempo, de um transitório hipotético, que converge para o regime permanente final (real). Já o Nelder Mead representa um dos mais populares esquemas de busca de valor ótimo, sem utilizar derivadas, no qual o algoritmo mantém um conjunto de N+1 pontos, para guiar esta busca, onde N representa o número de variáveis de busca.

Caliman (2002) apresenta um algoritmo que determina os parâmetros de vazamento C1 e N1 para trechos de um sistema de abastecimento de água, de acordo com três áreas de pressão que são definidas pela incidência de vazamentos. Assim, analisa a localização otimizada de válvulas de controle de pressão, visando a minimizar as perdas por vazamentos, utilizando um modelo do tipo pressão x vazamento. A aplicação do estudo é realizada na rede de água em São Carlos – SP.

Silva, B. (2003) propõe um método de calibração que utiliza duas etapas, sendo os AGs (algoritmos genéticos) aplicados como ferramenta na resolução dos problemas inversos correspondentes. Várias possibilidades de ajustes foram testadas no trabalho, destacando o ajuste de parâmetros de rugosidades de trechos de rede, coeficientes de vazamentos C1 e N1 e localização de registros. Nos estudos realizados aplicam-se setores de rede da Cidade de São Carlos - SP. Os resultados obtidos demonstraram-se robustos em identificar rugosidades e trechos dotados de válvulas, bem como os parâmetros do modelo de vazamentos, além de indicar possibilidades de melhorias na eficiência dos AGs.

No estudo apresentado por Soares (2003) é desenvolvida uma rotina computacional considerando perdas por vazamento relação demanda/pressão, acoplando-se ao simulador hidráulico EPANET. Para a calibração, em termos de rugosidade

absolutas, demandas, diâmetros, cotas e parâmetros do modelo de vazamentos utiliza-se os modelos inversos resolvidos com o suporte da tecnologia dos Algoritmos Genéticos (AGs) e procedimento híbrido (AGs e Método Simplex). Assim, a utilização do modelo híbrido mostra-se vantajosa por poupar esforço computacional e refinar a solução final em termos da função objetivo e das variáveis de decisão, em relação à solução final obtida pelos AGs somente.

Colombo (2007) utiliza em seu estudo de calibração de rede, o código computacional desenvolvido por Soares (2003), sendo este código baseado na minimização dos desvios entre os parâmetros (pressão e vazão) não reais para uma rede hipotética, tendo substituído assim, a rede hipotética por uma rede real e aplicado parâmetros reais. Foram feitas modificações na rotina proposta, inserindo assim o modelo de JOWITT & XU (1990).

Visto que o procedimento inverso e os algoritmos genéticos são técnicas de otimização bastante utilizadas, Neves *et al.* (2007), para analisar a influência do número de pontos de observação na qualidade dos resultados obtidos por processo de calibração, utilizaram o programa CALIBRA desenvolvido por Neves (2007). Esse programa utiliza um modelo de cálculo de rede em regime permanente, procedimento de calibração inverso e AG como técnica de calibração. A figura 6 apresenta o fluxograma simplificado do modelo de calibração descrito.

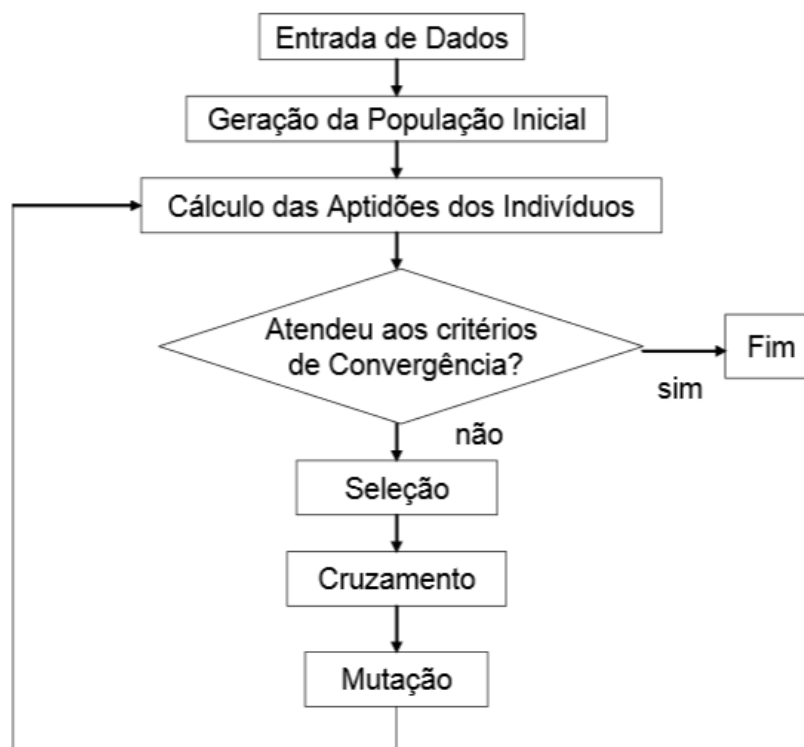


Figura 6 - Fluxograma simplificado de algoritmos genéticos aplicado à calibração.
 Fonte: Neves (2007)

Rocha *et al.* (2009) propõem a calibração da rugosidade em redes de abastecimento a partir de gradientes hidráulicos por meio do uso de método iterativo. Para isso, um programa foi desenvolvido para calibração das rugosidades das tubulações de redes utilizando o MIGHA (Método Iterativo de Gradiente Hidráulico Alternativo). Utilizou-se uma rede hipotética que avalia o desempenho do método em situações nas quais não se conhece a pressão em todos os nós da rede. Também foram realizadas análises comparativas com a técnica dos AG's, sendo relatadas diferenças entre eles.

Rocha *et al.* (2011) determinam em seu trabalho as rugosidades das tubulações de uma RDA hipotética e assim, aplica o MIGHA que, por meio de iterações com o simulador hidráulico EPANET, ajusta continuamente as rugosidades, enquanto a RNA treina a rede e estima as rugosidades. Para realizar as modelagens dos dois métodos, foi utilizada a linguagem DELPHI 7.0 em função de sua facilidade de uso e por proporcionar um tratamento adequado à modelagem numérica.

Salvino *et al.* (2011) apresentam uma alternativa de calibração por meio de um processo iterativo que utiliza como variáveis calibráveis, a demanda e as rugosidades absolutas das tubulações. A validação do modelo foi verificada por meio da calibração da

rede piloto de distribuição de água do LENHS – UFPB (Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba).

Zaque *et al.* (2012) analisam em seu estudo a influência do número de cenários na calibração de modelos de redes de distribuição de água para análise hidráulica e diagnóstico de sistemas de distribuição de água com abastecimento intermitente. Para isso, foi aplicado o software EPANET 2 e empregado algoritmos genéticos para a solução do problema inverso.

Como o monitoramento remoto possibilita sistemas de calibração mais velozes capazes de calibrar enquanto recebem dados, Abe (2014) desenvolve trabalho em que propõe dois novos métodos de calibração baseados em redes neurais artificiais construtivas a fim de aumentar a velocidade de processamento e o desempenho dos sistemas de calibração. O primeiro método consiste em calibrar utilizando apenas redes neurais artificiais, produzindo respostas de modelos hidráulicos por meio do uso do Epanet e transformando-os em padrões de treinamento para as RNA construtivas. Já o segundo consiste no desenvolvimento de um sistema de calibração híbrido.

No processo de calibração realizado por Silva, O. (2014) é utilizado o *software* LenhsCalibra, que utiliza um algoritmo de otimização baseado na técnica de algoritmos genéticos. Desta forma, foi realizada a calibração multivariada, incluindo como variáveis de busca a demanda e a rugosidade das tubulações, cujos valores são ajustados por meio de simulações a partir dos níveis de vazão e pressões reais. Os resultados obtidos pelo modelo calibrado do sistema estudado pelo autor, além de serem satisfatórios, possibilitam identificar o registro de descargas utilizadas para limpeza da rede e pontos na rede com demandas superiores às que, efetivamente, são consumidas pelos clientes.

Na República Tcheca, Kovar e Rucka (2013) apresentam um estudo no qual se descreve um novo *software* que está sendo desenvolvido para ajudar os especialistas em água para calibrar modelos hidráulicos, que utilizam os valores medidos na rede de abastecimento de água. A ferramenta técnica para a calibração chama-se ADAM e é um *software* de simulação para análise hidráulica de redes de abastecimento de água.

Na Estônia, Puust e Vassiljev (2014) apresentam um estudo na rede de abastecimento de água na cidade de Tallinn, em que foram atualizados os valores de rugosidade dos tubos e os vazamentos. Duas abordagens diferentes foram aplicadas pelos autores para a calibração do modelo, usando: (a) ferramentas disponíveis comercialmente (algoritmo genético) e (b) ferramentas de pesquisa personalizada (Levenberg-Marquardt),

onde verifica-se que os resultados da calibração entre as duas aplicações possuem semelhanças.

Em Israel, os pesquisadores Maskit e Ostfeld (2014) limitam os vazamentos de água no sistema de distribuição variando na faixa de 5% a 55% em relação ao fornecimento total, sendo que esse valor aumenta geralmente com o valor da pressão. O valor de vazamento é definido por $q = \beta \cdot L \cdot P^\alpha$, onde P é a pressão no tubo, L é o comprimento do tubo e, alfa (α) e beta (β), são os coeficientes do modelo de vazamento. Os trechos da rede são divididas de acordo com suas propriedades, e para cada grupo de tubulações, os valores de beta e alfa são definidos. Por meio da utilização de um algoritmo genético e EPANET os valores de alfa e beta são alterados até que a calibração adequada seja atingida.

Goulart (2015) desenvolve o aprimoramento de iterações do método de calibração de redes de distribuição de água proposto por Silva, B. (2003) por meio do uso da ferramenta de busca dos algoritmos genéticos, calibrando duas redes de distribuição de água reais da cidade de São Carlos (SP), e ajustando parâmetros, principalmente de rugosidades e de vazamentos. Para o aprimoramento do modelo, ocorre a introdução da demanda nodal como uma nova variável de decisão, onde se atribui valores aleatórios de demanda aos nós em um primeiro passo e em seguida, trabalha-se conforme o modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999). São testadas uma rede hipotética de distribuição de água e duas redes reais. A primeira rede real testada é a mesma ensaiada por Silva, B. (2003) - o setor "Monte Carlo" - e a segunda rede real é um setor da cidade de Cambuí (MG).

3.3. Modelos matemáticos aplicados a previsão de demanda

A boa qualidade de dados sobre a previsão da demanda é essencial para que os modelos computacionais sejam capazes de simular o comportamento hidráulico do sistema da forma mais próxima a realidade possível. Assim, é necessário obter dados e informações o bem próximo ao real. Em um sistema de distribuição de água, a boa previsão de demanda é uma ferramenta que ajuda a maximizar a eficiência hidroenergética por meio da previsão do comportamento hidráulico, além de colaborar na gestão do consumo de água para que se possa criar ou expandir um SAA.

Parte da água de abastecimento é perdida em vazamentos na rede e este volume é incluso, segundo Gupta, et al. (2016), nas demandas baseadas em volume, o que aumenta seu valor.

Odan *et al.* (2014) afirmam que a implementação de um modelo de previsão de demanda de água envolve a seleção de um modelo, definindo as suas melhores estruturas e variáveis de entrada, e também a definição de seus critérios de avaliação.

Para alguns sistemas no Brasil, Venturini (2003) descreve a ocorrência da falta de planejamento no setor de abastecimento, com demandas previstas subestimadas, o que causa uma operação ineficaz. Isto ocorre principalmente, devido às mudanças no perfil dos consumidores, em função do estabelecimento de centros comerciais em áreas inicialmente residenciais, a verticalização das construções e a implementação de conjuntos habitacionais geram um crescimento que dificulta a formulação de previsões de demanda.

Borges (2003) explica as três diferentes aplicações para o estudo da demanda de água:

- Longo prazo (anual), utilizado no planejamento, em planos diretores, estudos de concepção e projeto de construção;
- Médio prazo (meses/semanas), planejamento operacional e projetos de adaptação;
- e
- Curto prazo, programação da operação, sendo diário para a ETA (Estação de Tratamento de Água) e horário ou menor para a adução.

Segundo Silva, O. (2014), os modelos de previsão de consumo a curto prazo têm como principal objetivo aperfeiçoar a operação do sistema de abastecimento de água, de forma a oferecer um serviço de qualidade a um menor custo. Outro tipo de utilização remete para a redução de perdas encontradas nos sistemas de distribuição de água, permitindo uma economia considerável de água. A projeção a longo prazo nos sistemas de abastecimento quantifica as solicitações máximas que servem como elementos de decisão na construção, manutenção e operação do sistema.

Os modelos desenvolvidos para previsão, conforme Silva, O. (2014), têm dependência com a sua finalidade e também com o horizonte de previsão do consumo, de forma que utilizam técnicas estatísticas convencionais, tais como a regressão linear ou múltipla para a análise da série temporal e técnicas com base em sistemas inteligentes como Redes Neurais Artificiais (RNA).

Vieira *et al.* (2012) ressaltam que os modelos matemáticos na análise de sistemas de recursos hídricos apresentam simplificações devido a sua representação espaço-temporal de seus componentes ou pelas aproximações utilizadas para representar os processos não-lineares.

Para a previsão de demanda de água, Borges e Filho (2006) apresentam diferentes ferramentas que podem ser empregadas, podendo ser aplicadas desde a estatística convencional, como a regressão linear simples ou múltipla.

Oliveira (2014) descreve que nos modelos autoregressivos (AR), o valor de uma variável no tempo seguinte depende do valor da mesma variável no tempo anterior, sendo assim, aplicável principalmente na modelagem de dados contínuos com alta relação temporal.

As técnicas de previsão de demanda são sintetizadas por Jain e Ormsbee (2002) e apresentadas na figura 7.

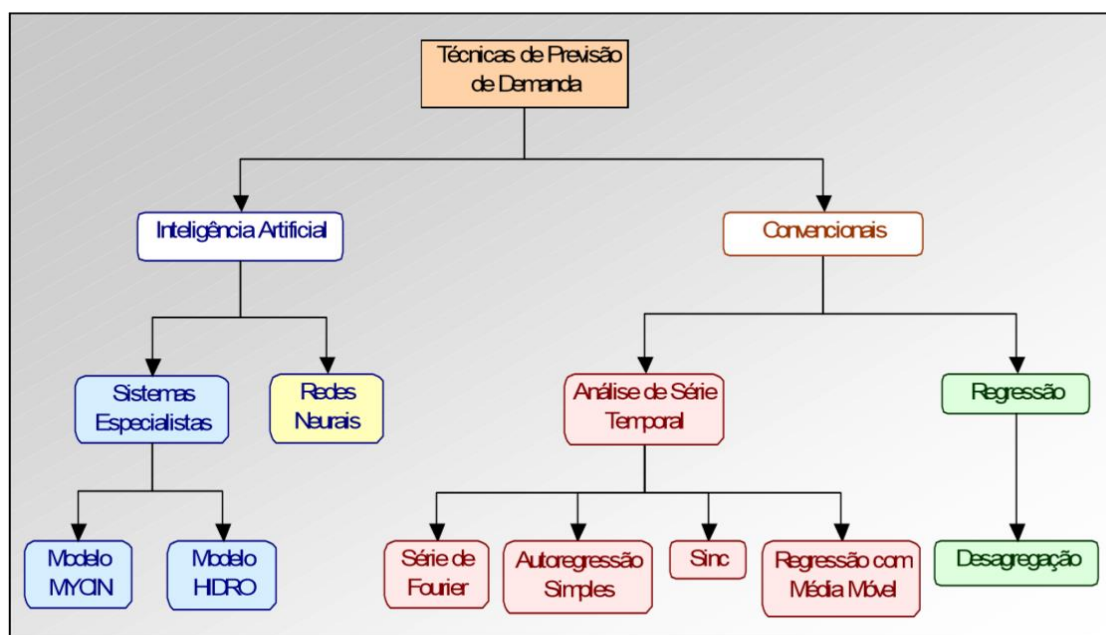


Figura 7 - Técnicas utilizadas para previsão da demanda de água.
Fonte: Jain e Ormsbee (2002).

A seguir, são apresentados estudos desenvolvidos sobre modelos matemáticos aplicados à previsão de demanda nos últimos anos e a metodologia aplicada por cada um.

Borges (2003) apresenta uma evolução metodológica na operação do Sistema Adutor Metropolitano de São Paulo, em tempo real por meio da implementação de um

modelo matemático (tempo real) de previsão de consumo de água horário, para uma melhoria no desempenho operacional. O modelo de previsão de demanda utilizado foi desenvolvido por Zahed (1990), baseado na série de Fourier. O modelo possibilita desenvolver/implantar regras operacionais mais eficientes, constatado devido a redução do número de mudanças da posição das válvulas e no estado das bombas, além da redução do custo de energia elétrica.

Santos, C. (2011) realiza a previsão de demanda de águas em sistemas urbanos de abastecimento por meio do uso de Rede Neural Artificial (RNA) por intermédio de inserção de dados de consumo de água e variáveis meteorológicas e socioambientais, aplicando a região metropolitana de São Paulo. Assim, o desempenho dos modelos foi avaliado a partir do erro médio, absoluto, quadrático e pelo coeficiente de correlação, exatidão, viés e outros coeficientes.

Devido ao fato dos modelos para simulação de sistemas hídricos superficiais com base de tempo mensal não incorporarem certas complexidades, haja visto as limitações matemáticas dos seus algoritmos, Vieira *et al.* (2012) apresentam um modelo de simulação que tem como principais características, a incorporação de não-linearidades dos processos hidráulicos e operacionais de estruturas hidráulicas mais usuais. As limitações operacionais e hidráulicas foram incluídas no modelo por meio de restrições lineares (balanço hídrico; volumes mínimo, máximos e metas; capacidade dos componentes; etc.) e não-lineares (vazão vertida máxima, vazão descarregada máxima, área da superfície líquida do reservatório, etc.).

Barros e Menezes (2012) propõem a análise da relação entre a produção e o consumo de água na região metropolitana de Goiânia, utilizando o método estatístico de previsão de Holt-Winters para as próximas décadas. Pellegrini e Flogliatto (2000) apud Barros e Menezes (2012) mostram que os modelos de Holt-Winters descrevem apropriadamente dados em que se verifica a ocorrência de tendência linear, além de componente de sazonalidade, que sua aplicação é válida pra séries não estacionárias e que o modelo de é baseado em três equações alisadoras: uma para o nível, outra para tendência e outra para sazonalidade.

Sousa *et al.* (2013) avaliaram se a oferta de água no Estado do Paraná seria suficiente para atender a expansão crescente do consumo, dado o expressivo desenvolvimento econômico e demográfico, para o ano de 2015, utilizando modelos econométricos agregados e desagregados de produção inversa, do tipo linear, Cobb-Douglas e exponencial para projetar o consumo total de água.

Os autores usam os modelos agregados de produção inversa, no qual o consumo total é função de cada um dos produtos setoriais da economia e do contingente populacional rural e urbano. Os modelos agregados foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (*ordinary least squares* – OLS) e para os modelos desagregados, empregou-se o método de regressão canônica (*canonical correlation analysis* - CCA).

Na Holanda, Bakker *et al.* (2013) analisam que apesar da literatura mostrar que modelos de previsão de demanda de água que utilizam setor (entrada única) serem capazes de gerar uma previsão bastante precisa, a mudança das condições meteorológicas gera erros de previsão bastante grandes. Assim, os autores desenvolvem estudo em que três modelos de previsão diferentes são avaliados: um modelo Heurístico, um modelo de transferência e um modelo de regressão linear múltipla. As simulações com os modelos mostram que com a introdução do tempo os erros de previsão podem ser reduzidos em 11% e os erros médios em 7%.

Oliveira (2014) propõe uma metodologia para investigar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e as alterações da demanda hídrica no futuro por meio da abordagem estocástica, que inclui as projeções climáticas, hidrológicas, populacionais e agropecuárias para a geração de séries de demandas hídricas no futuro. O cálculo da razão entre a demanda para usos consuntivos e a disponibilidade hídrica (demanda/disponibilidade) entre 2011 e 2040 apresenta tendência de aumento neste percentual ao longo dos anos, passando de 6,06% em 2011 para 13,82% em 2040.

O estudo desenvolvido por Silva, O. (2014) busca realizar a caracterização, modelação e previsão do consumo de água em um subsistema de distribuição da empresa Águas do Douro e Paiva S.A. Para isso, foi realizada a análise das sucessões cronológicas em modelos estocásticos ARIMA por meio do software estatístico SPSS e um outro modelo que foi desenvolvido com recurso ao MSeExcel, utilizando o suplemento solver para calcular os parâmetros. Os resultados para este caso foram bastante próximo para os dois modelos.

Na Irlanda, Prieto *et al.* (2015) desenvolvem estudo sobre um modelo baseado na análise periódica dos parâmetros hidráulicos, desenvolvido para determinar a demanda de água em função do tempo, permitindo assim, uma melhor compreensão do padrão de consumo e a condição da rede de abastecimento. O modelo é testado para investigar o consumo de água diariamente das categorias selecionadas de usuários que foram isoladas de diferentes redes de distribuição na cidade de Sligo. O modelo fornece uma análise

rápida, revelando as regularidades da demanda de água que poderiam beneficiar os gerentes de serviços públicos de água e pesquisadores.

No Canadá, Shabani e Naser (2015) usam uma ampla gama de variáveis explicativas em seus modelos de previsão de demanda de água. Resaltam que não tem sido dada atenção suficiente ao período ou natureza caótica/variável da série temporal implantada em técnicas de previsão de demanda e desenvolvem estudo com o objetivo de quantificar o caos nas variáveis de tempo usados em modelos de previsão de demanda. O método utilizado é o de análise de correlação para verificar a evidência de caos determinístico e a pesquisa mostra que as variáveis explicativas apresentam caos dimensional elevado em sistemas estocásticos.

3.4. Algoritmos genéticos

Os Algoritmos genéticos (AGs) são diferenciados de outras técnicas de pesquisa por Lee (2008) devido vários aspectos:

- o algoritmo realiza várias pesquisas em paralelo em diferentes direções, reduzindo a possibilidade de se aprisionar em um ótimo local;
- os AG trabalham com uma codificação dos seus parâmetros em vez dos seus próprios valores. A codificação de um parâmetro ajudará o operador genético a evoluir do estado atual para o próximo, com os recursos computacionais básicos;
- o AG avalia o nível de adaptação de cada string para guiar a sua busca em vez da função de otimização. Não existe a necessidade de calcular derivadas ou outros conhecimentos adicionais, diminuindo a exigência computacional; e
- a estratégia utilizada por esta técnica explora a pesquisa no espaço de soluções onde a probabilidade de encontrar um melhor desempenho é mais elevada.

Assim, os AGs são métodos heurísticos baseados na teoria da evolução de Darwin de busca global por meio da evolução de uma população de indivíduos (conjunto de soluções), onde cada um é a representação da possível solução do problema (GONÇALVES, 2012). O termo heurístico está relacionado com o fato de que eles nem sempre encontram uma solução ótima para o problema, e quando encontram, nem sempre é a mesma solução (MAIA JÚNIOR, 2012).

Segundo Gonçalves (2012), os AG foram criados por Holland (1975) e desenvolvidos e consolidados por Goldberg (1989), sendo que a teoria tradicional de AG

criada por Holland assume que de um modo geral, os AGs funcionam por descobertas, enfatizando ou recombinao “blocos de construcao” das solucoes de uma forma paralela. O conceito e de que as boas solucoes tendem a ser descobertas por “blocos de construcao” com boas combinaoes de valores de respostas, que conferem maior adequacao na cadeia em que eles estao presentes.

A seguir analisa-se as vantagens e desvantagens deste método.

Como limitacao deste método, Maia Júnior (2012) afirma que eles não são tão bons assim com relacao a tempo de processamento, sendo, portanto, mais adequados em problemas especialmente dificeis.

Odan (2013) apresenta algumas vantagens em relacao aos métodos convencionais:

- A busca e realizada a partir de uma populacao de solucoes, ao invés de uma única solucao a cada otimizacao, e utiliza informacao apenas da funcao objetivo, não necessitando de derivadas da funcao objetivo ou de outras informacoes;
- Usa regras de transicao probabilísticas e não determinísticas na identificacao de solucoes alternativas;
- E de fácil implementacao, não necessitando conhecimentos matemáticos complexos; e
- Pode realizar buscas mesmo com grande número de variáveis.

Sousa (2013) mostra mais uma vantagem do método, apresentando a importancia da recombinao, visto que distingue os algoritmos genéticos de todos os outros algoritmos de otimizacao, pois a partir das variaoes produzidas permite que sejam explorados novos pontos no espaco de busca das solucoes.

Odan (2013) representa a estrutura básica dos AGs por meio de 4 operaoes, sendo estas:

1. Cálculo da aptidão (*ajusteness*): avalia o quão próximo a solucao está da ótima;
2. Selecao: ocorre após o processo de avaliacao da aptidão, e da mesma forma que na selecao natural, selecionam-se para a reproducao os organismos mais adaptados ao meio e as solucoes com melhor valor de aptidão;
3. Cruzamento (*crossover*): também denominado recombinao. Consiste na combinao das solucoes pais selecionadas para a criaao de novas solucoes filhas, podendo ser de simples permuta (representacao binária)

ou combinação das características correspondentes entre soluções atuais;
e

4. Mutação: processo que induz a introdução de pequenas mudanç as aleatórias nos genes das soluções geradas por meio da combinação, que pode ser “bit” a “bit” (representação binária) ou variável por variável (representação real).

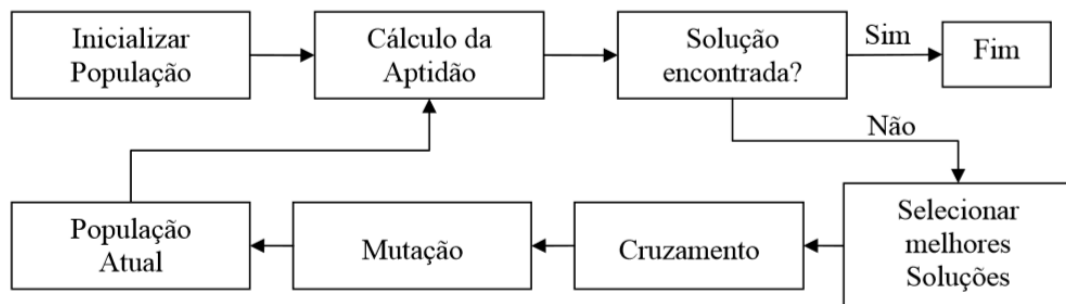


Figura 8 - Diagrama da estrutura básica do algoritmo genético.
Fonte: Odan (2013).

Haja visto que o Algoritmo genético, além de ser aplicável fornece bons resultados para problemas complexos, ele é bastante utilizado para a simulação hidráulica na calibração da rugosidade em redes de distribuic o de água, apesar do tempo de processamento ser maior.

3.5. Ferramentas computacionais aplicadas ao processamento de dados

O desenvolvimento das ferramentas computacionais é um elemento essencial que possibilita o processamento de grande volume de dados. Portanto, sem elas a modelagem computacional de sistemas utilizados em diversos tipos de estudos não seria possível.

Há uma grande preocupação das Companhias de Saneamento, conforme Nazaré e Souza (2011), na busca da implementação de processos gerenciais e operacionais mais eficientes e precisos que auxiliem os gestores das companhias de saneamento na tomada de decisões, que minimizem as perdas de faturamento, vinculadas tanto às perdas reais de água (parcela da água produzida e não consumida) quanto às perdas aparentes (parcela da água consumida e não faturada), ambas advindas da fragilidade administrativa dos métodos gerenciais.

A implementação das ferramentas já existentes e criação de novas representa uma busca constante pelos pesquisadores da área devido a automatização e praticidade que proporcionam.

Nazaré e Souza (2011), afirmam que quanto a operação, a simulação hidráulica dos sistemas de abastecimento de água através de modelagem computacional, é uma ferramenta muito importante, e assim, ao ser utilizada da forma correta e com o equacionamento matemático devido, pode reproduzir o comportamento real do sistema físico que representa.

Existe uma variedade de *softwares* que auxiliam a projeção e análise de redes de distribuição já existentes por meio da modelagem. Dentre os principais modelos de simulação hidráulica de abastecimento de água, conforme Olaia (2012) tem-se: Hidrocad, Epanet, Watercad, Strumap, Synergee Water e o INSSAA.

Borges (2003) apresenta a divisão destas ferramentas em três tipos. Sendo estas:

- Tipo 1 – modelos que apresentam todos os recursos básicos para simulações em regime permanente. Exemplos: Hidrocad e Epanet.
- Tipo 2 – modelos que apresentam recursos adequados à simulação de rede hidráulica em tempo estendido e possuem interface gráfica, controle lógico e condições adequadas de calibração do modelo. Exemplos: Watercad.
- Tipo 3 – os modelos que propõem para além das condições anteriores, a integração com o sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) de supervisão e controle operacional da rede hidráulica. Estes modelos são os mais completos dos modelos descritos, exigindo assim, maior experiência por parte dos usuários. Os referidos modelos destacam-se por apresentarem várias opções de simulação com variações de cenários e de operações controle, como por exemplo, sobre o acionamento dos elementos como válvulas e bombas. Exemplos: Strumap e Synergee.

Como auxílio para a escolha da ferramenta computacional a ser aplicada, alguns critérios são utilizados para auxiliar. Alegre, *et al.* (2006) apresentam os seguintes critérios de análise:

- O custo;
- A facilidade de utilização;
- A operacionalidade e flexibilidade do programa;

- A robustez do modelo;
- A velocidade de processamento;
- As componentes representadas;
- A interface com o utilizador;
- As características do modelo de qualidade;
- A integração com bases de dados de CAD, SIG e SCADA;
- O apoio técnico e a documentação.

Tavares *et al.* (2014) alertam que a disponibilidade de uma ferramenta informática não é, por si só, suficiente para uma exploração adequada das infraestruturas. O conhecimento dos processos e as boas práticas de trabalho são fundamentais, assim como a sistematização destes fatores da operação cotidiana. Neste contexto, e em particular para as entidades de pequena e média dimensões, as dificuldades técnicas e a limitação dos recursos são um entrave para a implementação de boas práticas operacionais.

A seguir são apresentadas as especificações para três exemplos de ferramentas computacionais de processamento de dados: Epanet, Hidrocad e Watercad.

3.5.1. Epanet

Rocha *et al.* (2011) descrevem o EPANET como um programa de uso livre, desenvolvido pela U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), dos Estados Unidos da América, e robusto, porém por ser bastante eficaz é utilizado em projetos de redes de distribuição de água. Sendo assim, é capaz de promover a fusão das rotinas de otimização e do cálculo hidráulico, pelo fato de ser incorporado a outros programas, adaptando-se assim às necessidades do usuário. Para que isto ocorra, dispõe-se das rotinas de cálculo presentes em uma biblioteca (Epanet2.dll), que são adaptadas para a implementação de programas específicos. Outras vantagens quanto a sua flexibilização, são apresentadas por Lamoglia, *et al.* (2011): flexibilidade quanto às alterações de consumo e mudanças de níveis do reservatório.

O Epanet constitui em ferramenta mais aplicada, havendo diversos estudos na área que o utilizam em diversos países. Ele fornece as pressões nos nós, níveis de água nos reservatórios, custo de energia de bombeamento e os parâmetros da qualidade da água. Apresenta resultados para simulações estáticas e dinâmicas (OLAIA, 2012).

No caso específico do trabalho desenvolvido por Rocha *et al.* (2011), o EPANET foi utilizado em conjunto com a rede neural artificial (RNA), como ferramenta para ajustar as rugosidades da tubulação da rede de abastecimento simulada até que a função objetivo atingisse um valor mínimo.

Lamoglia *et al.* (2011) também utilizaram o *software* Epanet com o objetivo para avaliação hidráulica da rede de distribuição de água na cidade de Passos-MG, obtendo valores de pressão nos nós e de vazão nos trechos. Em linhas gerais dos trabalhos que utilizam o Epanet, as etapas principais de um trabalho com esta ferramenta incluem os itens aplicados neste estudo, conforme demonstra a figura 9.

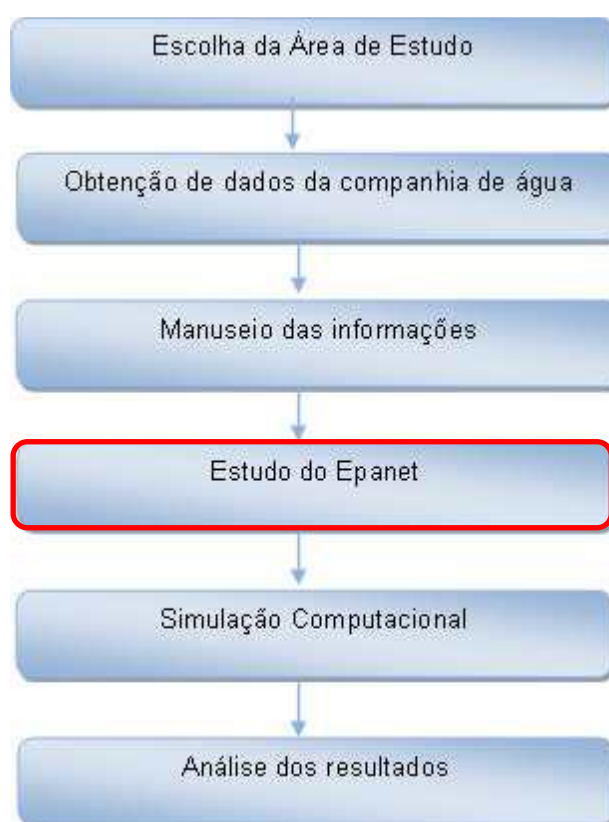


Figura 9 - Fase do estudo de simulação de perdas em rede de abastecimento de água em que o Epanet é incluído.

Fonte: Modificado de Lamoglia, *et al.* (2011)

O processo de modelagem com o Epanet inclui conforme estudo apresentado: projeto do arranjo da rede de distribuição de água, edição das propriedades dos objetos que constituem o sistema (trechos de tubulação e nós com as cotas topográficas para os nós, diâmetro, rugosidade e comprimento das tubulações), descrição das condições de

operacionalidade, seleção de um conjunto de opções de simulação, execução da simulação hidráulica, obtenção dos resultados da simulação, calibração e validação.

Segundo Moura (2006), a modelagem de um sistema de distribuição de água através do EPANET utiliza tipicamente os seguintes passos:

- a) Projetar uma representação esquemática do sistema de distribuição ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um arquivo de texto;
- b) Editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema;
- c) Descrever as condições de operacionalidade do sistema;
- d) Selecionar um conjunto de opções de simulação;
- e) Executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água; e
- f) Visualizar e interpretar os resultados da simulação.

Assim, selecionam-se as unidades das grandezas a serem usadas e a opção de cálculo da perda de carga contínua. Lamoglia *et al.* (2011) demonstram que o programa fornece várias opções de cálculo (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach e Chezy Manning), tendo sido utilizada na aplicação deste estudo a equação de Hazen-Williams, que é uma das fórmulas mais utilizadas para o cálculo de perda de carga em sistema de pressão, que possui a restrição de ser usada apenas para água e foi desenvolvida inicialmente, para escoamentos turbulentos. O principal destaque dos resultados obtidos, é que como se tratou de simulação de um bairro isolado (que não sofre grande influência da rede de distribuição de água da cidade), os resultados da simulação apresentaram-se bastante próximos aos dados reais.

Lourencetti *et al.* (2011), demonstram em seu estudo três aplicações para esta ferramenta computacional, sendo que os dados provenientes de simulações hidráulicas realizadas utilizando o software Epanet foram usados no:

- I) Treinamento;
- II) Validação cruzada;
- III) Teste de RNAs, por meio de rotinas de programação desenvolvidas na plataforma do software *Scilab*.

O objetivo do estudo de Lourencetti *et al.* (2011) é a análise do comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água (SDAA), via redes neurais artificiais (RNAs). As três aplicações citadas foram usadas levando-se em consideração que o uso de um modelo de simulação hidráulica é inviável para operações em tempo real de SDAAs (excessivo tempo de processamento computacional). Buscou-se então uma abordagem que

usa o seu conhecimento de uma forma mais eficiente por meio de uma RNA de camada oculta única.

É importante ressaltar que o uso do Epanet e outros softwares não visam apenas a redução das perdas de água no sistema de abastecimento. Além das perdas de água, desperdício com o dinheiro com tratamento, visa-se a redução do consumo elétrico envolvido no processo.

Desta forma, Nazaré e Souza (2011) afirmam que mais de 90% dos gastos de uma empresa de saneamento são relativos ao consumo elétrico das estações elevatórias, assim, as ações visando o aumento da eficiência nessas empresas concentram-se, de forma geral, na redução do consumo energético mantendo o atendimento pleno da demanda.

Faria *et al.* (2009) apresentam como ponto negativo do Epanet a falta de um ambiente gráfico adequado para a digitalização da rede sobre uma imagem de satélite, bem como a obtenção das características espaciais dos nós da rede, apresentado como solução, a gestão de sistemas de abastecimento de água por meio de Sistemas de Informações Geográficas (*SIG*). Desta forma, o *SIG* ajuda gestores na manutenção, prevenção, visualização, avaliação e análise do sistema de abastecimento de água e possibilita maior economia, tanto para empresa de saneamento administradora do sistema quanto para o consumidor. As funcionalidades de um *SIG* são fundamentais para o gerenciamento de rede de abastecimento e ajudam no gerenciamento da rede na previsão de mudanças, bem como no planejamento de obras de conservação ou expansão.

Assim, no trabalho desenvolvido por Faria *et al.* (2009) integra-se os *softwares* SPRING e EPANET, na simulação de pressão e vazão de uma rede de abastecimento de água, causada pela expansão da rede já existente no município de Viçosa – MG, a fim de avaliar se as ferramentas utilizadas gerenciamento da rede sobre as demandas de pressão e vazão do novo sistema de abastecimento.

Castro (2004), por meio do uso de duas ferramentas computacionais já bastante utilizadas, o AutoCAD e o Epanet, desenvolve um pacote computacional aplicado ao planejamento e operação de redes de abastecimento de água, que cria uma forma dinâmica de exportar arquivos do AutoCAD para o Epanet por meio da programação AutoLISP. Este pacote é constituído de duas rotinas, em que o primeiro possibilita que o usuário forneça os elementos gráficos e os dados básicos dos constituintes da rede de abastecimento de água e o segundo, permite a especificação dos métodos a serem empregados na simulação matemática, como o cálculo das perdas de carga e das demandas, e é onde se define em que condições o traçado da rede será exportado.

As principais vantagens deste pacote são:

- Minimizar os esforços gastos na fase de pré-processamento da simulação computacional de uma rede hidráulica, uma das etapas que requer a maior parte do tempo gasto na realização dos estudos.
- Possibilitar ao usuário utilizar a interface gráfica do AutoCAD, um dos programas mais conhecidos e difundidos no meio da engenharia, e os recursos matemáticos do Epanet, simulador do comportamento hidráulico e da qualidade da água em redes pressurizadas.

Quanto à capacidade de processamento computacional e o tempo envolvido neste processo, Galvão *et al.* (2006) afirmam que o EPANET e os demais modelos para análise de sistemas de escoamento de água, demandam uma considerável capacidade de processamento computacional quando utilizados como suporte a algoritmos que exigem a execução de múltiplas simulações, pois os dados são iterativamente modificados, como os algoritmos de otimização e de calibração.

O EPANET é uma ferramenta que possibilita simulação simultânea de diversos cenários em modelos hidráulicos com significativa redução do tempo de processamento. A principal vantagem das grades é possibilitar o uso de grande volume de recursos computacionais remotos a um custo reduzido. A grade computacional utilizada foi a OurGrid, onde os resultados refletem uma redução de 94% no tempo de processamento ao executar 10.000 simulações do EPANET em relação aos resultados de um computador com apenas um processador.

3.5.2. Hidrocad

Outra ferramenta já bastante aplicada é o Hidrocad. Conforme Olaia (2012), possibilita realizar cálculos e dimensionar redes de distribuição de água, sendo um programa flexível, que se adapta a diversos tipos de situações, podendo ser aplicada tanto para pequenas quanto grandes redes de abastecimento, além dos três tipos de redes: ramificadas, malhadas ou mistas. O modelo geométrico utilizado pelo programa é importado diretamente do Autocad e os demais são definidos no próprio programa. No

caso de redes malhadas, estas são identificadas automaticamente, não tendo a necessidade de definí-las explicitamente.

3.5.3. Watercad

O modelo Watercad, conforme Borges (2003), é uma evolução do modelo Cybernet, da Haestad Methods, que surgiu na década de 1980. É o modelo simulador em uso na Sabesp, sendo baseado no modelo EPANET (USEPA, 2001) e utiliza como premissas hidráulicas: a rede de condutos forçados em regime permanente, estático em determinado momento ou em tempo extensivo. Este modelo possui os seguintes rotinas:

- Qualidade de água;
- interface com o software AutoCAD;
- sistema geográfico de informação; e
- custos.

Segundo Olaia (2012), o Watercad proporciona resultados da modelação hidráulica de forma a otimizar, gerir e controlar uma distribuição eficiente da água e de todos os respetivos custos associados. Seus resultados fornecem tanto a possibilidade da modelação hidráulica, quanto da qualidade da água, para sistemas de distribuição. Ele auxilia as empresas de serviços a analisar, dimensionar e otimizar os sistemas de distribuição de água.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho deu-se em três fases: a primeira envolveu a determinação do local de estudo e levantamento das informações existentes, a segunda fase contemplou os trabalhos de campo desde os treinamentos até a execução para obtenção dos dados de pressão e de vazão e, a terceira fase, incluiu o tratamento dos dados e as simulações computacionais a fim de obter a calibração.

4.1. Primeira fase

Na primeira etapa foi escolhido o município de São Lourenço-MG para desenvolvimento do estudo. Esta escolha deu-se devido a três fatores:

- Presença de um setor isolado que favorece a análise dos fatores que influenciam no setor;
- Disponibilidade do SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) – São Lourenço em colaborar com fornecimento de dados e assessoria nos trabalhos de campo, o que é fundamental para obtenção dos resultados;
- Proximidade da cidade de Itajubá (sede da Universidade Federal de Itajubá) – aproximadamente 75 km.

Após a escolha do local de estudo, foram realizados levantamentos de dados do traçado da rede isolada em estudo e conferência por meio de participação de reuniões com funcionários do SAAE – São Lourenço sobre informações referentes aos registros, funcionamentos das bombas, gastos de energia elétrica, traçado e material das tubulações da rede de abastecimento.

Nesta fase foram desenvolvidos também a revisão bibliográfica, a fim de se obter respaldo teórico para continuidade do estudo, além da troca de informações e aprendizados com membros do grupo de pesquisa do Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos – NUMMARH, do projeto vinculado a FINEP: Monitoramento, simulação e operação de sistemas de distribuição de água – 983-10 em reuniões semanais (Figura 10).



Figura 10 - Membros do Grupo de Pesquisa em reunião semanal

As três fases do estudo e seus elementos fundamentais estão sintetizadas no fluxograma da figura 11.

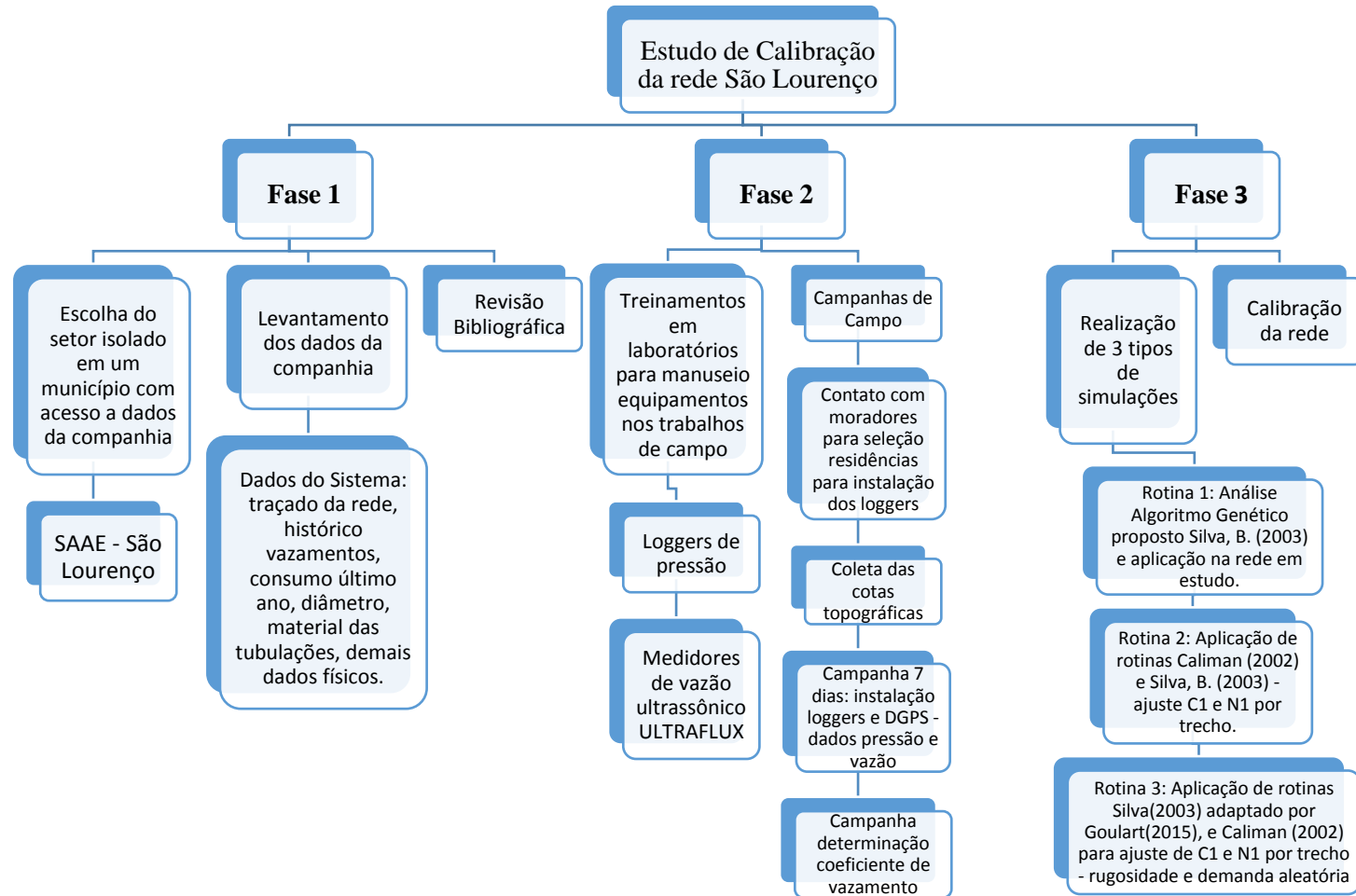


Figura 11 - Fluxograma das etapas do estudo

4.1.1. Área de estudo

Segundo o IBGE (2010), a cidade de São Lourenço – MG (figura 12), possui como população estimada para o ano de 2015, 44.781 habitantes e uma área de 58,019 km². O rio utilizado para a captação da água para o abastecimento é o Rio Verde, principal rio de São Lourenço, que faz parte da bacia hidrográfica do Rio Grande.

A cidade possui um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de 0,759 (PNUD, 2013), pertencendo assim, aos municípios com Desenvolvimento Humano Alto (IDHM: 0,700 e 0,799). Por ser uma das estâncias hidrominerais mais conhecidas do Brasil, São Lourenço tem como base de sua economia as atividades comerciais e turísticas.



Figura 12 - Vista área da cidade de São Lourenço - MG.
Fonte: São Lourenço (2015)

Por ser uma cidade turística, o fluxo de pessoas na cidade oscila consideravelmente. Segundo Bobsin (2014), nos feriados e temporadas de férias, São Lourenço chega a receber uma população flutuante de até 100 mil pessoas, o que já alerta para picos de demanda hídrica em determinadas épocas do ano. A verticalização do município é a alternativa para seu crescimento, sendo necessário previsões do aumento da demanda nas redes de abastecimento, tal que suporte a verticalização.

A rede em estudo engloba três bairros da cidade de São Lourenço-MG: Vale dos Pinheiros, Morada da Serra e Palmela. A figura 13 apresenta a renda média das famílias de cada bairro que demonstra a diferença socioeconômica existente entre eles.

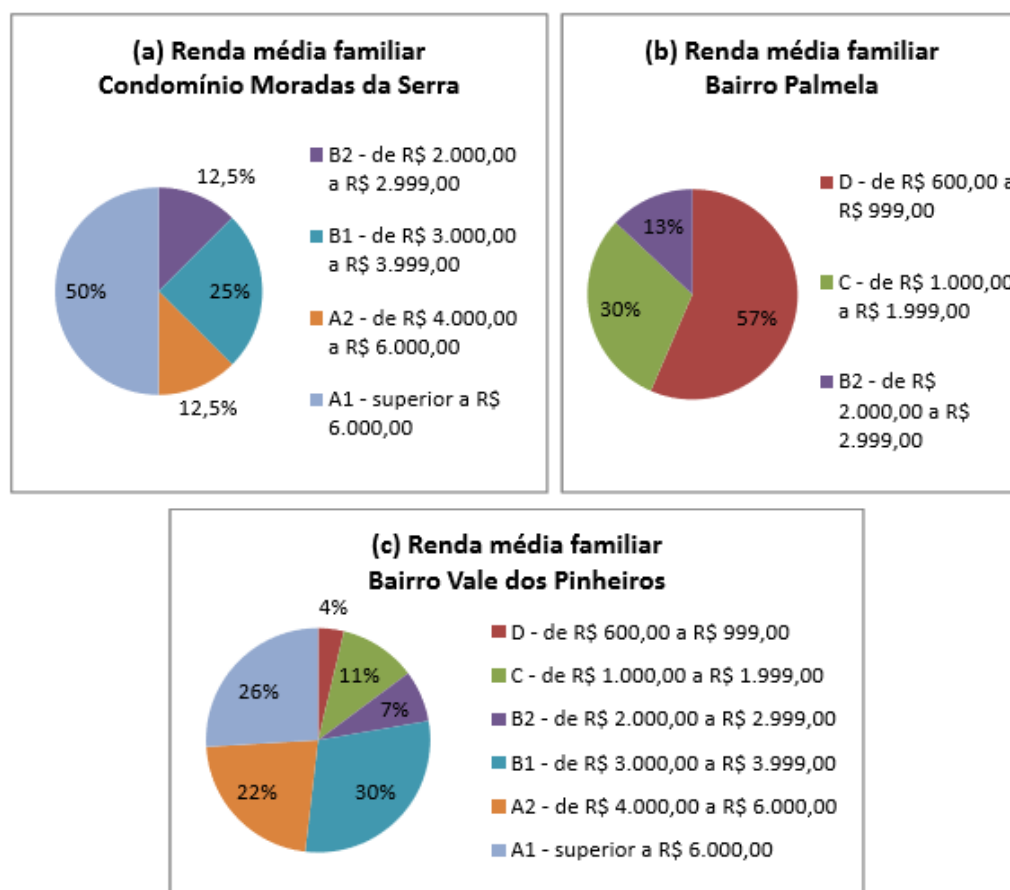


Figura 13 – Variação entre a renda média familiar para os três bairros da área de estudo.
Fonte: Bobsin (2014)

Bobsin (2014) descreve as classes sociais da população de cada bairro, sendo que o condomínio Morada da Serra (Figura 14) possui moradores pertencentes as classes A1, A2, B1 e B2, apresentando 50% das famílias na classe A1, 12,5% das famílias na classe A2, 25% das famílias na classe B1 e 12,5% das famílias na classe B2. Já o bairro Palmela (Figura 15) é constituído por famílias com renda nas faixas B2 (13% das famílias), C (30% das famílias) e D (57% das famílias). E o bairro Vale dos Pinheiros (Figura 16), possui maior variedade nas classes de renda familiar, tendo 26% das famílias na classe A1, 22% das famílias na classe A2, 30% das

famílias na classe B1, 7% das famílias na classe B2, 11% das famílias na classe C e 4% das famílias na classe D.



Figura 14 - Panorama geral do bairro Morada da Serra.

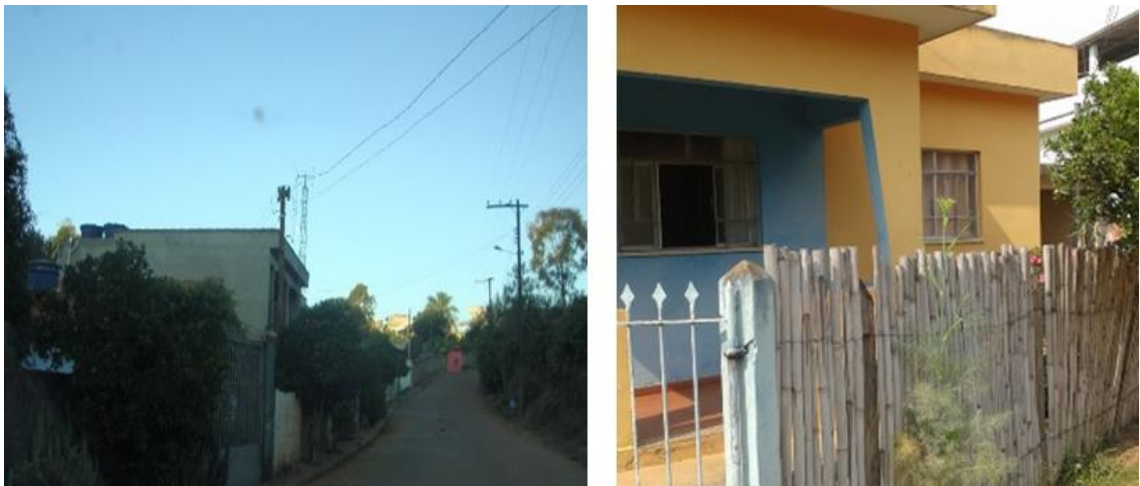


Figura 15 - Panorama geral do bairro Palmela.



Figura 16 - Panorama geral do bairro Vale dos Pinheiros.

A figura 17 apresenta a média do consumo mensal calculado para 7 meses de 2014 (junho a dezembro) para os bairros Palmela, Morada da Serra e Vale dos Pinheiros.

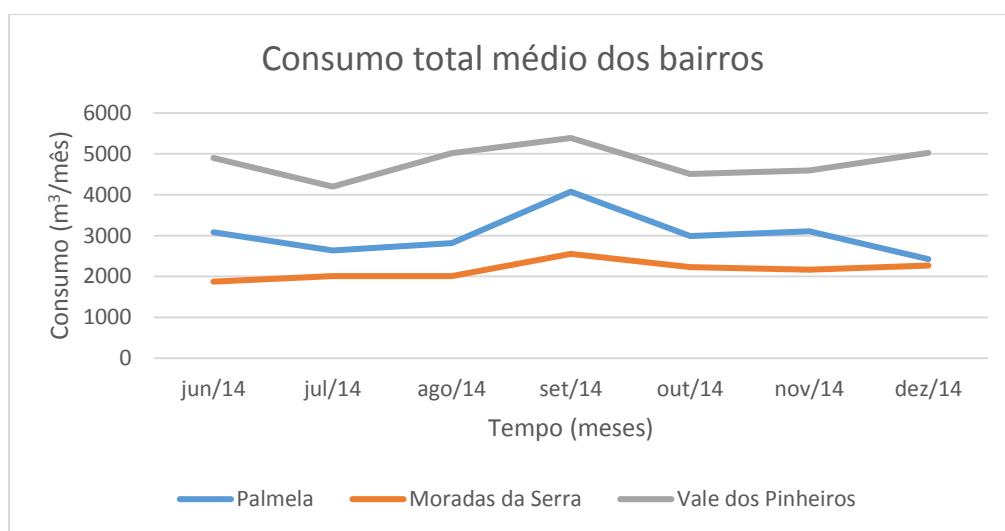


Figura 17 - Consumo total médio para os três bairros do setor de estudo.

Para o abastecimento do município a água tratada é bombeada até o reservatório do bairro Solar dos Lagos através de um conduto adutor localizado na estação elevatória Vila Nova e do reservatório e é distribuída para dois conjuntos de bairros. O primeiro conjunto é composto pelos bairros do setor em estudo (Vale dos Pinheiros, Palmela e Morada da Serra) e o segundo pelos bairros: Santa Mônica, Santa Mônica 2, São Matheus, Serra Verde, Porta do Céu e Lagoa Seca.

A representação esquemática da figura 18 descreve em mais detalhes os componentes do sistema de abastecimento de água de São Lourenço – MG.

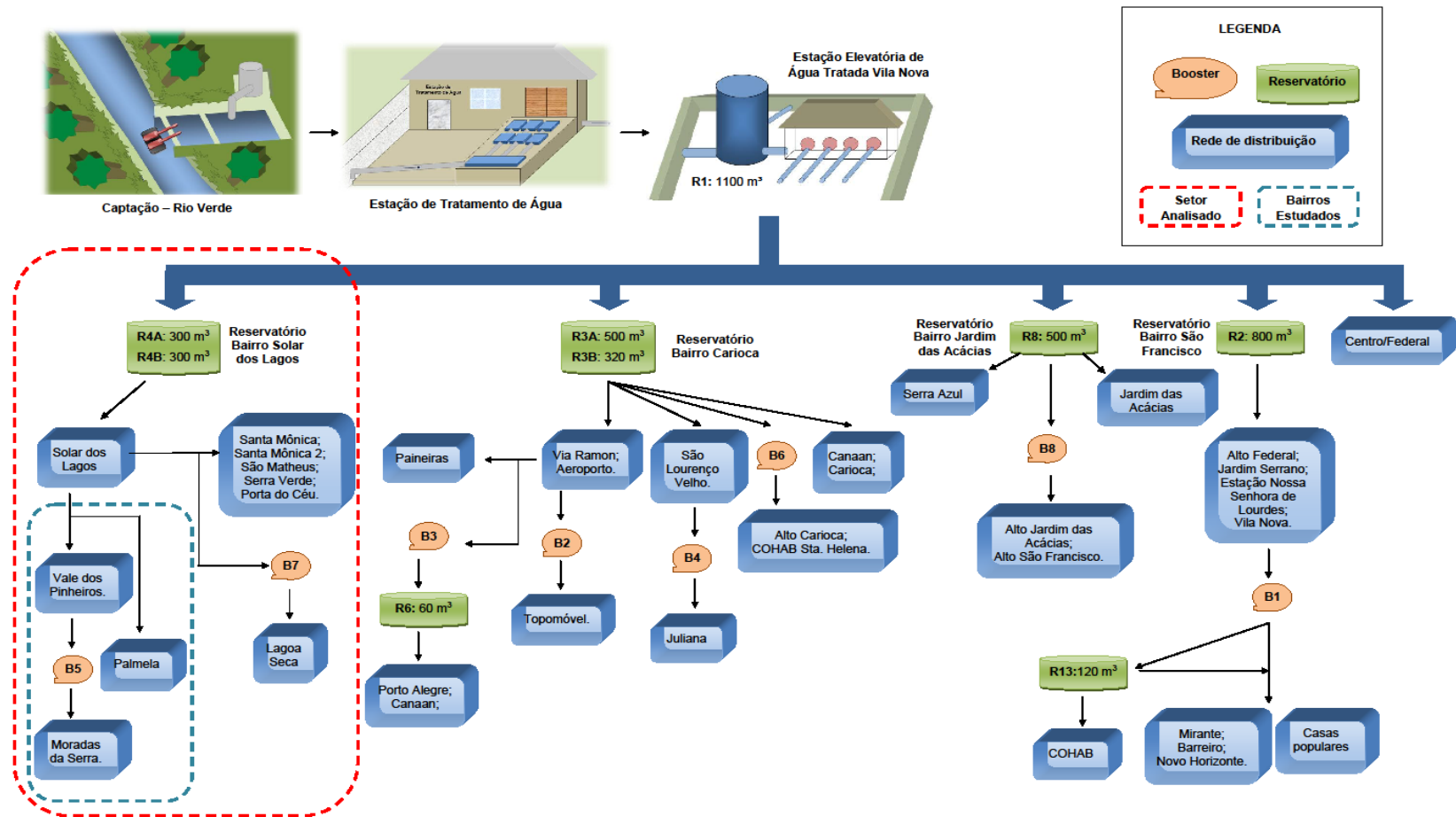


Figura 18 – Representação esquemática de todo o sistema de abastecimento do município.
Fonte: Lamoglia (2013)

Pode-se observar melhor a disposição do reservatório Vila Nova, a estação elevatória e do reservatório do Bairro Solar dos Lagos, que abastece o setor de estudo através da figura 19.

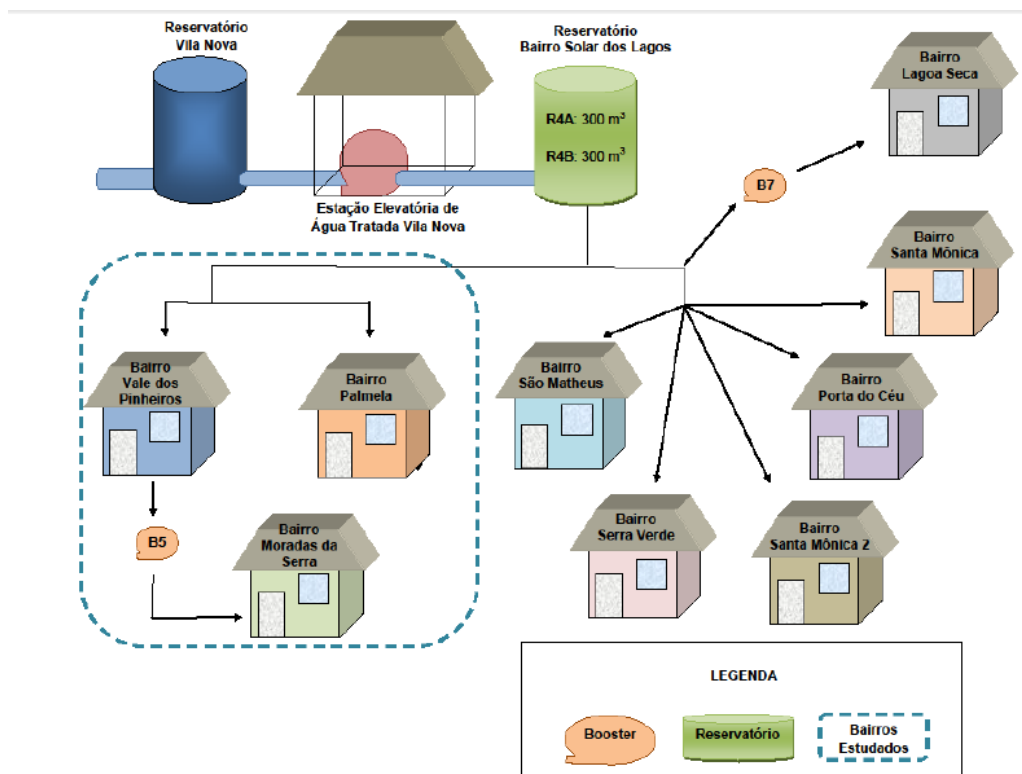


Figura 19 - Esquema do abastecimento de água do setor de estudo.
Fonte: Lamoglia (2013)

A figura 20 apresenta a localização: do Reservatório 1 (R1) presente no Vila Nova, do R4 presente no bairro Solar dos Lagos, o ponto da entrada do setor de estudo, a ETA e o ponto de captação de água para o tratamento, apresentando as distâncias entre estes pontos.

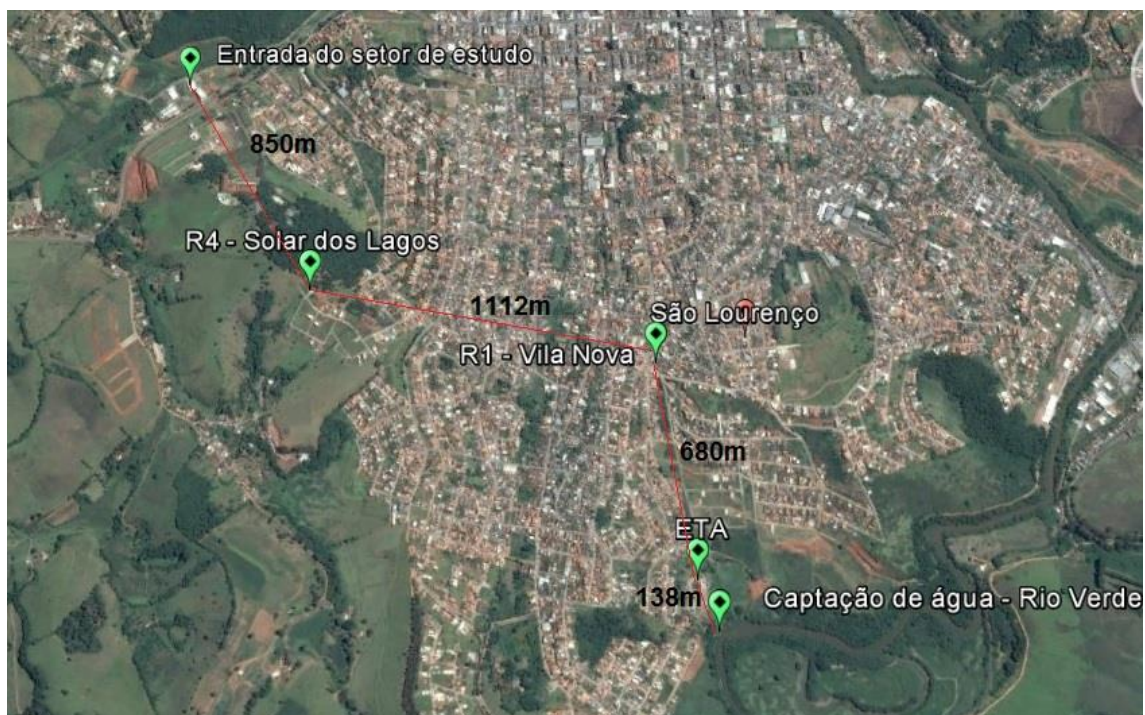


Figura 20 – Localização dos reservatórios, da entrada do setor de estudo e da ETA.

Como o SAA de São Lourenço se divide em quatro setores, observa-se que a área de estudo pertence ao setor 4 e é composta de estação elevatória, adutora de água tratada e reservatório:

- Estação Elevatória: Localizada no Reservatório R1 - Vila Nova é composto de dois conjuntos motor-bombas (01 + 01 reserva), potência de 60 CV (44,10 kW), Vazão de 144 m³/h e Altura Manométrica de 61 mca. A elevatória funciona em média 21 horas por dia, com revezamento dos conjuntos motor-bombas, sendo desligada quando o reservatório atinge o nível máximo. Não há controle de nível mínimo.
- Adutora de Água Tratada: Composta de duas tubulações em paralelo com extensão de 1.600 metros cada, sendo uma em Tubo PVC DEFOFO DN 200, Classe 1 MPa e outra, mais antiga, em Tubo de Cimento Amianto, DN 150 mm, Classe 20.

- Reservatório bairro Solar dos Lagos: Dois reservatórios construídos em concreto armado, tipo apoiado, com capacidade total de 600 m³ (300 + 300).

A rede de abastecimento de água em estudo foi escolhida por ser um setor isolado, possuindo esta 117 nós, 121 trechos e 6 registros.

A configuração da rede está presente na figura 21.

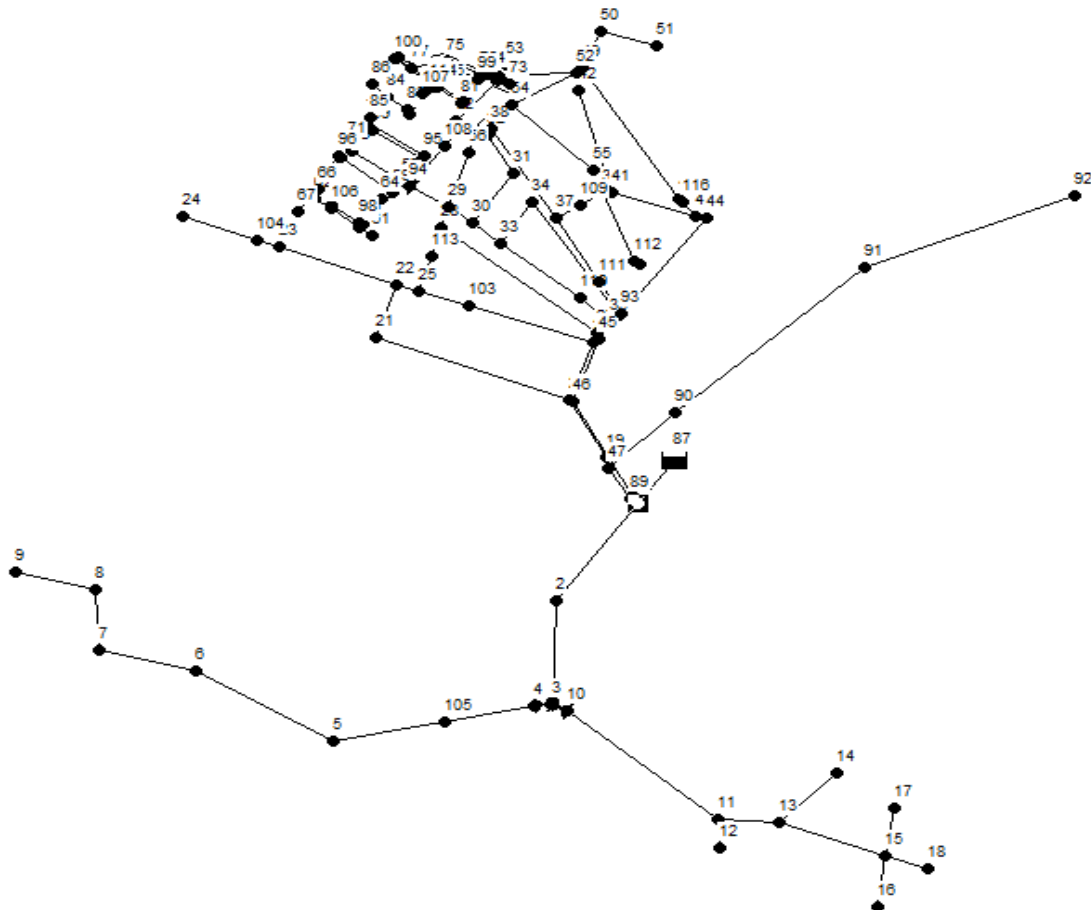


Figura 21 - Rede em estudo pertencente a um setor de abastecimento da cidade de São Lourenço - MG

4.2. Segunda fase

Nesta fase, ocorre o treinamento para manuseio dos equipamentos utilizados nas campanhas de campo e aferição destes baseado em equipamentos de referência do laboratório. Devido a toda complexidade de um trabalho de campo o máximo de treino e preparo deve ser buscado a fim de minimizar imprevistos na coleta dos dados de pressão

e vazão na área de estudo, além de assegurar que o equipamento não estava danificado antes de levá-lo a campo.

4.2.1. Treinamentos para manuseio dos equipamentos

São realizados treinamentos para os 3 medidores de vazão ultrassônicos e os 23 medidores de pressão. Apesar de não ser utilizado os 23 medidores, todos são configurados, testados e levados para campo para disponibilidade de equipamentos reservas no caso de falhas de outros equipamentos.

Os treinamentos para os medidores de vazão são realizados no Instituto de Recursos Naturais (IRN) – UNIFEI e os medidores de pressão etiquetados, testados e programados no Laboratório de estruturas hidráulicas do IRN - UNIFEI.

Durante os testes com os *loggers* medidores de pressão, é realizada a etiquetagem de cada *logger*, suas mangueiras e conexões, o que muito facilita as instalações em campo. Cada *logger* é testado e os dados são analisados para constatar o bom funcionamento dos equipamentos a fim de minimizar falhas nas campanhas de campo.



Figura 22 – Equipe de pesquisa após etiquetagem e testes dos equipamentos.



Figura 23 - Equipamentos etiquetados (*logger* e mangueira) já instalados em campo.

4.2.2. Aferição dos equipamentos

No teste dos medidores de pressão, são comparados os valores por eles registrados e os valores medidos pelo equipamento do laboratório, o Manômetro Bordon, obtendo resultados com bom ajuste.

A aferição é realizada para os 3 medidores de vazão ultrassônicos e os 23 medidores de pressão.

O processo de aferição dos medidores de vazão também são realizados no Instituto de Recursos Naturais (IRN) – UNIFEI no Laboratório de estruturas hidráulicas do IRN - UNIFEI.



Figura 24 - Manômetro Borden usado para comparação com resultados de pressão obtidos pelo logger de pressão.

4.2.3. Campanhas de campo

Após os testes dos equipamentos em laboratório são realizadas 7 campanhas de campo:

- 1 - Seleção das residências;
- 2 - Campanha de 7 dias;
- 3 - Medições do desnível do cavalete e distâncias de referência;
- 4 – Visita a escritório;
- 5 – Conferência dos registros;
- 6 – Levantamento de dados topográficos; e
- 7 - Campanha de madrugada obtenção C1 e N1.

Estas campanhas encontram-se descritas mais detalhadamente nos itens 4.2.3.1 à 4.2.3.7.

4.2.3.1. Seleção das residências

Na primeira campanha de campo são selecionadas as residências de forma a obter representatividade ao longo de toda rede de abastecimento com valores de pressão medidos pela equipe para comparação com valores simulados. Visto que os *loggers* de pressão são instalados nos cavaletes residenciais, é necessário a seleção das residências, contato com os moradores para obter permissão para a instalação, além do agendamento de horário em que os moradores se encontrariam em casa nos dias de instalação de cada campanha.

Inicialmente, são selecionados 18 pontos de monitoramento, já considerando a possibilidade de falhas, tais como, problema na torneira durante a medição, morador que apesar de orientado, eventualmente desligasse a torneira ou alguma casa em que apesar de haver o agendamento da instalação do aparelho não tivesse morador presente.

A fim de passar maior confiabilidade aos moradores, um funcionário do SAAE junto com o carro da companhia acompanha as visitas.

Assim, após ajustes devido moradores que estariam viajando ou que não poderiam receber a equipe por outro motivo, são reajustados alguns nós de monitoramento, tendo o número de 18 pontos de monitoramento selecionados anteriormente à realização das campanhas, presentes na figura 25.

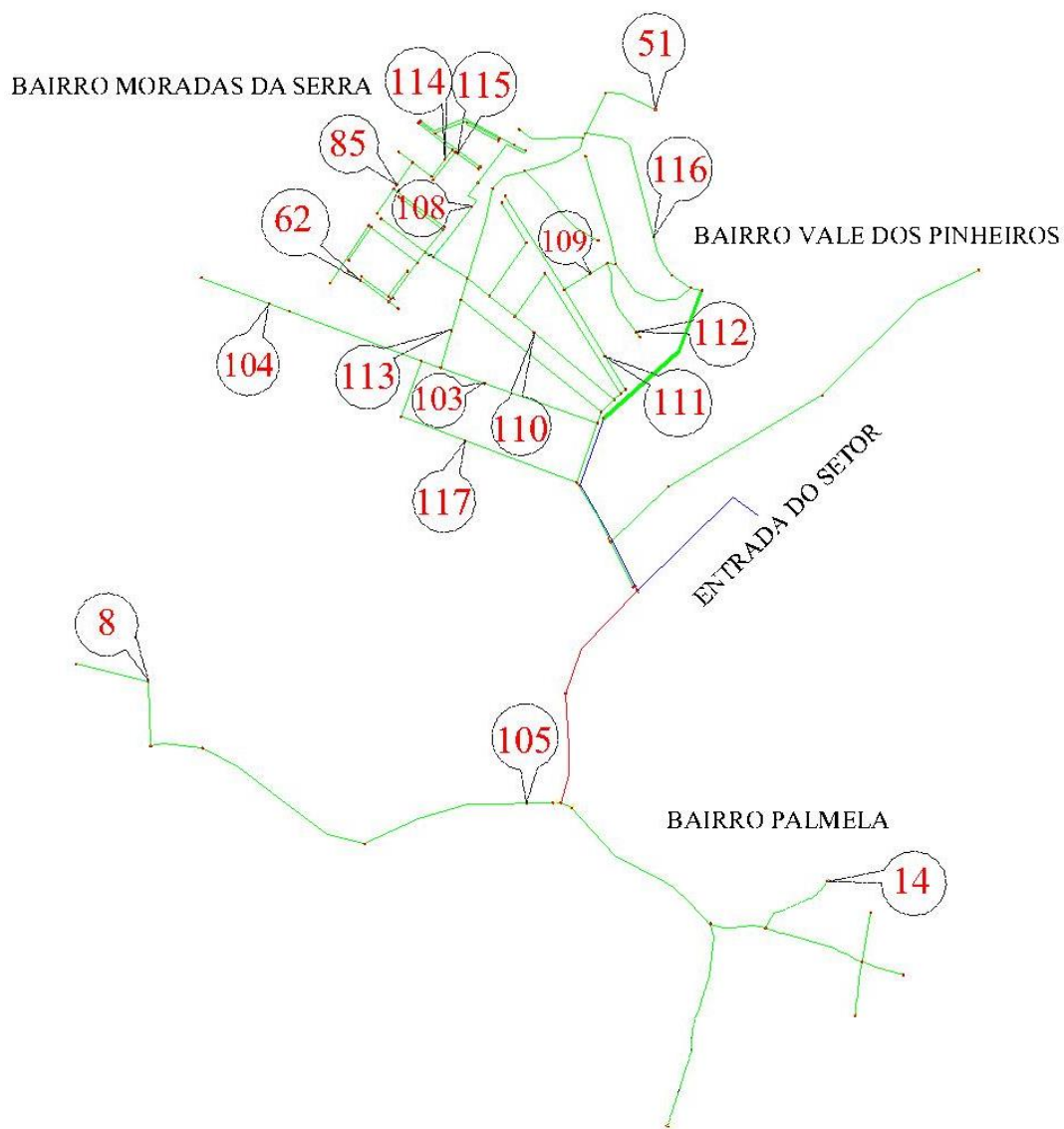


Figura 25 - Pontos de monitoramento selecionados preliminarmente.

Para a campanha de 7 dias (descrita no ítem 4.2.3.2) durante a coleta de dados os pontos de monitoramento 8, 104 e 110 apresentaram problemas (ex.: falha de equipamento, torneira que apresentou defeito ou morador que desliga a torneira). Assim, 15 dos 18 pontos selecionados preliminarmente forneceram dados de pressão para esta campanha, sendo descritos na figura 26.

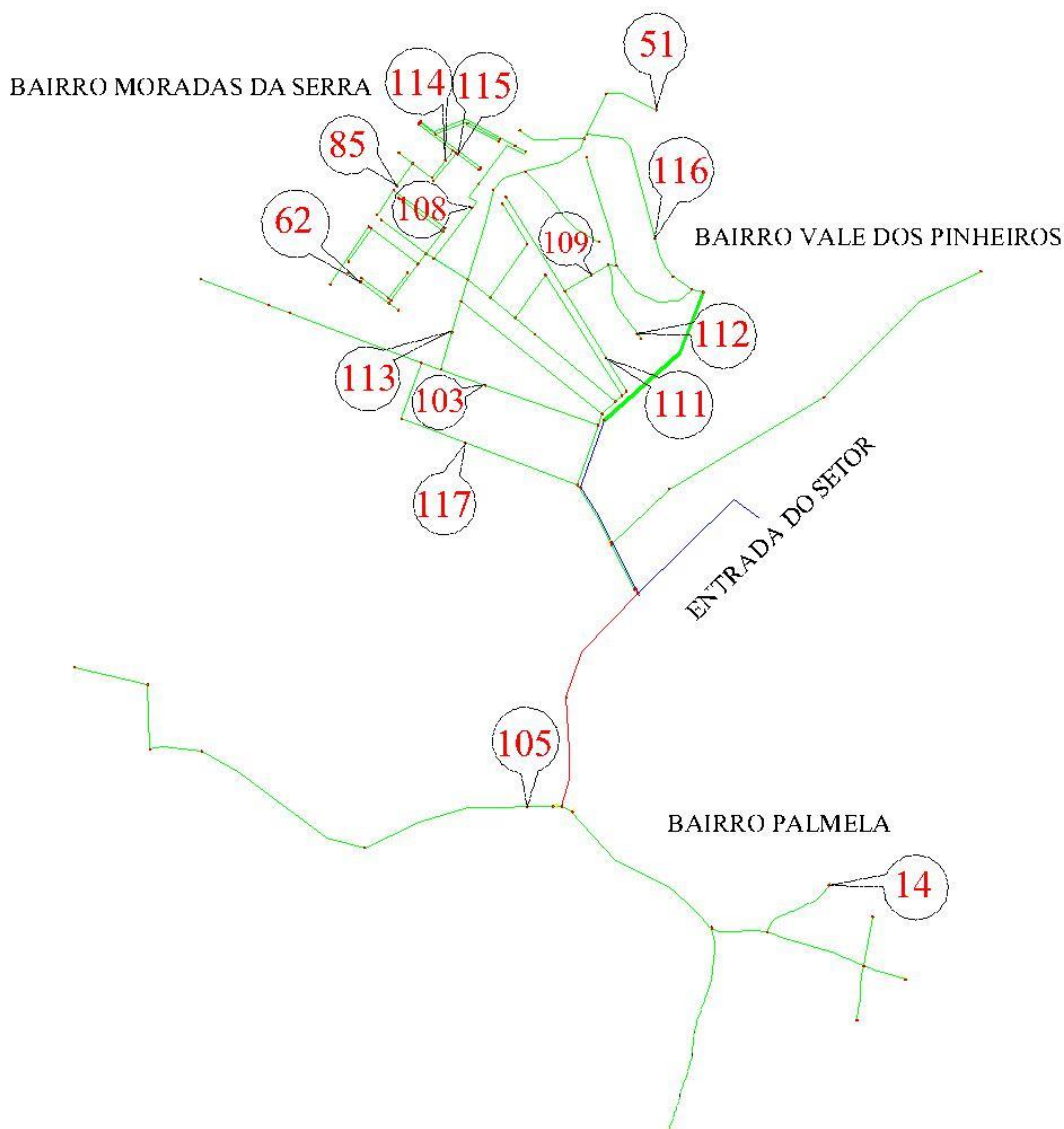


Figura 26 - Pontos de monitoramento da Campanha de 7 dias.

Durante a campanha da madrugada (descrita no ítem 4.2.3.7), é possível a obtenção de 10 pontos de monitoramento, a fim de determinar os coeficientes de vazamento C1 e N1, devido a problemas com outros pontos (ex.: falha de equipamento, torneira que apresenta defeito ou morador que desliga a torneira). O valor de pontos é inferior ao da campanha de 7 dias; porém, não representa perda de qualidade nos resultados, visto que durante a madrugada o sistema é mais estável, sendo que já se previa estes imprevistos e por isso loggers extras foram instalados por segurança.

Os pontos de monitoramento para esta campanha estão representados na figura 27.

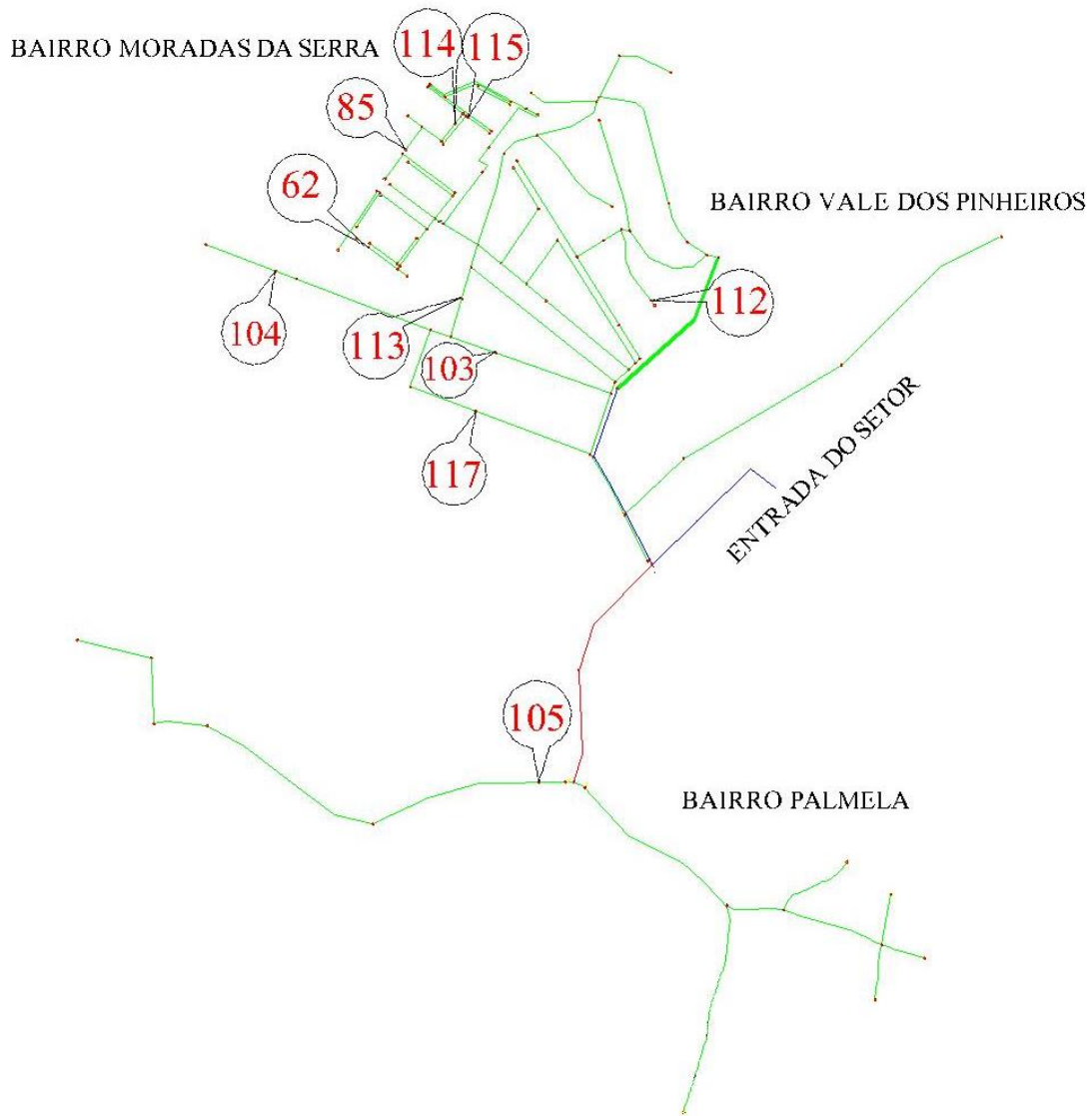


Figura 27 - Pontos de monitoramento campanha madrugada.

4.2.3.2. Campanha de 7 dias

A segunda campanha ocorreu entre os dias 20 e 28 de setembro de 2014 e tem como objetivo, a coleta de dados de pressão e vazão para os nós de monitoramento e na entrada do setor de estudo durante um período de 7 dias consecutivos, a fim de se obter os dados de entrada para calibração do modelo hidráulico.

No primeiro dia os equipamentos são instalados em todas as residências, visto que as visitas já haviam sido agendadas com cada morador.

Antes da instalação, todos os loggers são protegidos com saco plástico transparente, sendo este vedado com “enforca-gato” (figura 28). Após a instalação dos equipamentos em cada residência, este é protegido com caixa de madeira, evitando

exposição do aparelho e que este fosse danificado. A presença do professor orientador em algumas atividades de campo é importante para troca de experiências (figura 29) e maior segurança nas atividades desenvolvidas.



Figura 28 - Instalação dos loggers de pressão nas residências e proteção do aparelho.



Figura 29 - Professor orientador acompanhando em trabalho de campo.

Algumas torneiras apresentam problema (vazamentos ou danificadas), como foi o caso da torneira do ponto de monitoramento 14 (figura 30), e são trocadas. Outras, por serem de tamanhos diferentes, são adaptadas para $\frac{3}{4}$ ". Após as instalações, o registro de cada torneira foi aberto ao máximo para que a leitura do equipamento reproduzisse a pressão que estava realmente chegando naquele ponto. Durante a semana, visitas para monitoramento dos equipamentos acontecem devido às chuvas e alerta de desligamento de aparelho emitido pelo SAEE.



Figura 30 - Ponto de monitoramento do nó 14 onde foi necessária a troca de torneira para efetuar as medições.

Outro detalhe importante durante a instalação dos loggers de pressão é a boa vedação da conexão entre a mangueira do logger e a torneira (figura 31), a fim de evitar vazamentos e, conseqüentemente, erros de medição.



Figura 31 – Vedação da mangueira do logger de pressão a fim de evitar vazamentos e erro de medição.

4.2.3.3. Medições do desnível do cavalete e distâncias de referência

Na terceira campanha de campo são medidos:

- Desnível do cavalete ao nível da rua;
- A distância do cavalete ao centro da rua;
- A distância do nó à esquina mais próxima, para correção durante as simulações para a calibração.

O desnível do cavalete ao nível da rua (ΔH), em metros, é o valor utilizado para corrigir a diferença entre a carga de pressão existente no cavalete – ponto A - (medida em campo) e a pressão na tubulação da rua – ponto C - (pressão de interesse), conforme figura 32.



Figura 32 - Desnível do cavalete do ponto de instalação do logger de pressão até o nível da rua.

Para a realização destas medidas, é necessário o uso de uma trena e uma mangueira com água. A mangueira com água é utilizada a fim de nivelar o ponto base do cavalete (ponto A) com a altura no ponto perpendicular a rua (ponto B). Após este passo, é possível utilizando a trena medir a distância BC (ΔH).

A distância do cavalete ao centro da rua é a distância AB (figura 32) e a distância (d) entre o ponto de monitoramento e a esquina mais próxima (figura 33) representa um dado para conferência da localização dos nós de monitoramento no desenho da rede, proporcionando maior precisão aos dados de entrada do modelo.



Figura 33 - Distância à esquina mais próxima.

Este processo é reproduzido em todos os pontos de monitoramento e os valores obtidos a partir das medições em campo encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 – Informações de posição para os cavaletes e respectivos nós de monitoramento.

NÓ REFERENTE	Desnível (cm)	Distância cavalete ao centro da rua (m)	Distância do centro da rua à esquina mais próxima (m)
08	86	16,5	87,0
117	70	6,76	119,0
104	-37	23	193,0
62	280	21	33,0
85	31	7	19,0
114	315	10,6	16,0
110	40	6,5	48,0
109	99	7,10	78,0
108	7	7,20	53,0
105	71	6,5	124,0
51	-77	12,5	52,0
14	75	9,3	70,0
113	130	11,6	39,0
115	80	15	16,0
111	95	7,9	75,0
116	-53	7,5	156,0
112	57	7,5	Se encontra de frente com a praça circular
103	110	7,0	114,0

4.2.3.4. Visitas a escritório do SAEE – São Lourenço

São realizadas pelo menos 3 visitas ao escritório do SAEE – São Lourenço para:

- Conferência de dados sobre a rede (ex.: traçado da rede);
- Localização dos registros que foram posteriormente analisados em outra campanha de campo (ítem 4.2.3.5);

- Obtenção de dados de consumo de água nos bairros Palmela, Morada da Serra e Vale dos Pinheiros durante 7 meses, que foram utilizados no cálculo da demanda nodal (item 5.3.2); e
- Análise de ocorrência de manutenção na rede (ocorrência de vazamentos) durante a campanha de campo, o que representaria variação nos valores dos dados de pressão coletados.

4.2.3.5. Conferência dos registros

A quinta campanha de campo ocorre em outubro de 2014. Nesta campanha, juntamente a um funcionário do SAAE – São Lourenço, é realizada conferência da existência/localização dos registros ao longo da rede, a porcentagem em que cada um estava aberto e com que frequência a manutenção do SAAE costuma fechá-los para intervenções no sistema, sendo os resultados apresentados na tabela 2.

A presença dos registros está relacionada com um implento de rugosidade no trecho da rede em que se localiza, influenciando portanto, na calibração do modelo.

Tabela 2 - Caracterização dos registros da rede de abastecimento.

Número do Registro	Rua	Porcentagem de abertura (%)	Frequência de intervenções	Observações
01	Alameda das Orquídeas	100	Só se mexe em caso de manutenções (Geralmente 1x/mês)	Só fecha a rua
02	Alameda das Primaveras	100 (total 21 voltas)	Geralmente a cada 1,5 mês para manutenções esporádicas	Fecha todo o bairro Vale dos Pinheiros
03	Alameda das Primaveras	100 (total 16 voltas)	De 2 e 2 meses	Só fecha a rua
04	Alameda dos Ipês	100 (total 14,5 voltas)	Raramente	Só fecha um trecho da rua
05	Entre a Alameda dos Ipês e a Alameda das Camélias	100 (total 5,5 voltas)	Geralmente 1x/mês	Entrada do bairro Morada da Serra (Fecha todo o bairro)

Tabela 3 - Caracterização dos registros da rede de abastecimento.

Número do Registro	Rua	Porcentagem de abertura (%)	Frequência de intervenções	Observações
06	Rodovia São Lourenço	89 % (total 22,5 voltas)	De dois em dois meses e meio	Fecha o bairro Palmela

Os registros que fecham todo setor: Vale dos Pinheiros, Morada da Serra e Palmela localizam-se entre as ruas Érico Veríssimo e Monteiro Lobato, não descritos na tabela 2 por serem externos ao desenho da rede. Eles estão presente no bairro Solar dos Lagos.

Estes registros (figura 34) foram utilizados no trabalho de campo feito de madrugada (item 4.2.3.6) para criação de patamares de pressão e posterior cálculo dos coeficientes de vazamento inerente C1 e N1.



Figura 34 - Registros que fecham todo setor dos bairros Vale dos Pinheiros, Morada da Serra e Palmela

A tabela 3 e a figura 35 mostram a localização dos registros em relação ao trecho da rede em que se encontram.

Tabela 4 - Distribuição dos registros ao longo da RAA (Rede de Abastecimento de Água).

Registro	Localização referente aos nós e trecho da rede
1	Entre os nós 47 e 89 - Trecho 64
2	Entre os nós 43 e 44 - Trecho 59
3	Entre os nós 48 e 116 - Trecho 66
4	Entre os nós 29 e 56 - Trecho 39
5	Entre os nós 29 e 30 - Trecho 38
6	Entre os nós 2 e 3 – Trecho 4

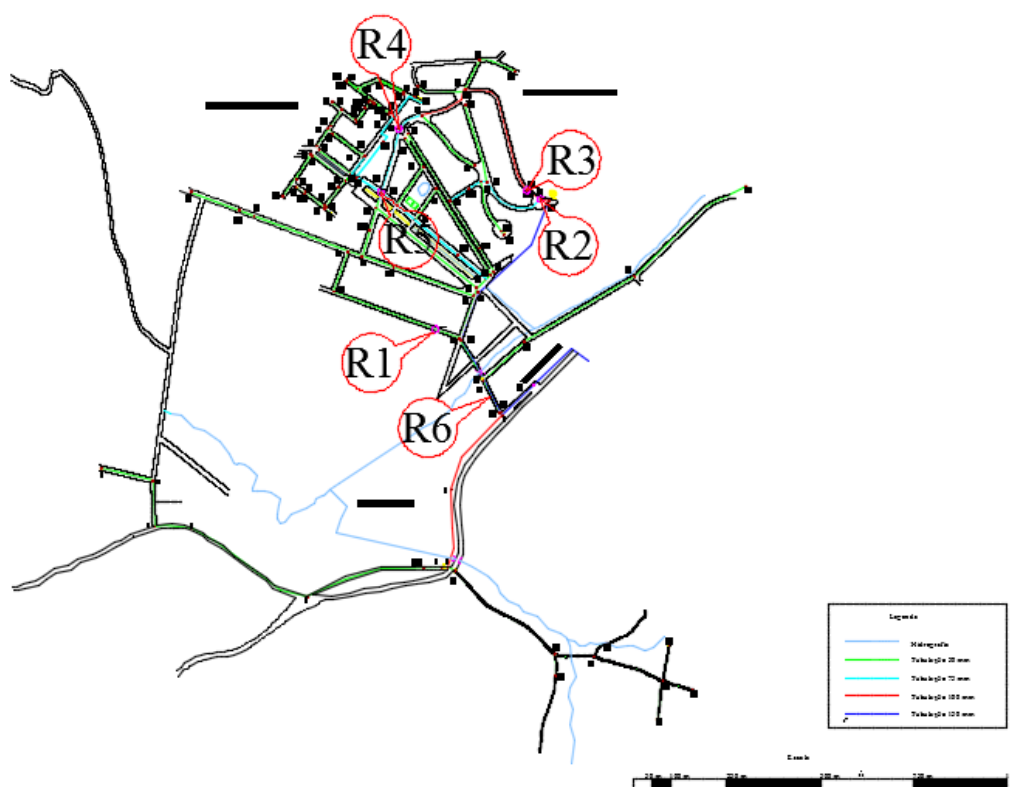


Figura 35 - Localização dos registros ao longo da rede.

A figura 36 mostra dois exemplos de pontos de registros visitados em campo, sendo que a figura 36(a) apresenta a localização do registro 4 e a figura 36 (b) o funcionário do SAAE – São Lourenço verificando o nível de abertura do registro 5.



Figura 36 - Exemplos de registros onde são averiguados seu nível de abertura.

4.2.3.6. Campanha de madrugada obtenção C1 e N1

A sexta campanha foi realizada nos dias 27 e 28 de abril de 2014 para a determinação dos coeficientes de vazamentos. No primeiro dia foram instalados os loggers de pressão nas residências e feitas conferências quanto ao funcionamento dos registros que fecham todo setor de estudo. Também foi instalado o medidor de vazão no PV. Então, a fim de se detectar influência dos vazamentos e determinar posteriormente, o coeficiente, foram realizadas medições de vazão e pressão na madrugada do segundo dia de campanha, em que gradualmente foram fechados os registros a fim de obter patamares nos valores de pressão. O passo a passo é apresentado na tabela 4.

Tabela 5 - Passo a passo para realização da campanha da determinação de vazamento da rede de abastecimento.

N° de voltas abertas totalmente	25	30		
Horário	N° voltas fechadas no registro grande	N° voltas fechadas no registro pequeno	Pressão (mca)	Vazão (L/s)
02:36h	5	5	88,1	2,5
02:52h	5	5	88,1	2,15
03:02h	4	4	88,1	2,15
03:12h	3	3	88,2	2,15
03:22h	3	5	88,2	2,15
03:34h	2	2	88,2	2,15
03:40h	1	3	88,2	2,15
03:43h	2	*****	88,2	2,15
03:50h	*****	1	88,2	2,15
03:52h	*****	1	88,2	2,15
03:55h	*****	*****	86	1,5
04:03h	*****	1/4	84,5	1,8
04:05h	*****	*****	83	1,5
04:12h	*****	*****	81,5	1,5
04:13h	*****	1/4	80,5	1,5
04:23h	*****	Menos de 1/4	76,5	1,5
04:33h	*****	*****	67,5	1
04:35h	*****	*****	60	0,7
04:38h	*****	Menos 1/4	58,3	0,7
04:40h	*****	Menos 1/7	55,5	0,7
04:44h	*****	Tudo	53,5	0,5
04:46h	Abertura do registro	Abertura do registro	53,5	0,4

A figura 37 mostra o medidor de vazão ultrassônico, instalado no Poço de visitas (Figura 38) para medição da vazão que entra no setor de estudo.



Figura 37 - Medidor de vazão ultrassônico.



Figura 38 - Funcionário do SAAE – São Lourenço acompanhando instalação de equipamento medidor de vazão no Poço de visitas – entrada do setor de estudo.

4.2.4. Zonas de pressão

São definidas na rede de estudo três zonas de pressão com base nas altitudes dos pontos da rede, ambas as áreas possuem tubulação de PVC. Assim, três zonas de pressão consideradas nos processos iterativos são descritas na figura 39, sendo:

- Zona de pressão 1 (área vermelha) – referente à região com maiores altitudes e, portanto, menores pressões;
- Zona de pressão 2 (área amarela) – região com altitudes intermediárias e pressões médias; e
- Zona de pressão 3 (área azul) – região com altitudes menores e maiores valores de pressão.

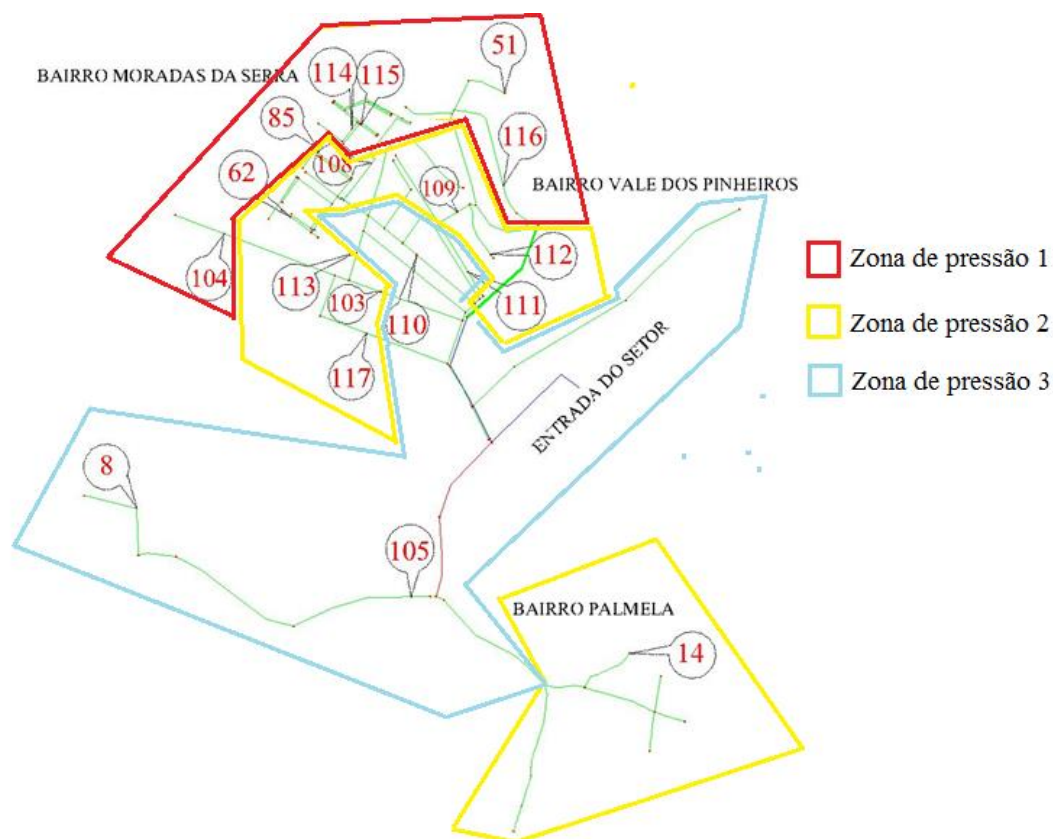


Figura 39 - Zonas de pressão.

4.3. Terceira fase

Na terceira fase são realizados três tipos de simulações a partir da análise e adaptação da rotina computacional proposta por Silva, B. (2003) para a rede de abastecimento em estudo.

Sabendo que um número ou sequência aleatória são elementos básicos necessários na simulação de quase todos os sistemas discretos, é aplicado 5 sequências aleatórias para cada rotina, a fim de testar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Assim, as três rotinas de simulações realizadas são:

ROTINA 1: Consiste na aplicação do modelo básico proposto por Silva, B. (2003), tendo este sido adaptado à rede em estudo. Esta rotina é a referência para comparação das melhorias obtidas para as rotinas 2 e 3, sendo composta apenas de um passo. Nela o modelo ajusta rugosidade baseado em ajuste de pressão e vazão medida e calculada, sendo os coeficientes de vazamento (C1 e N1) fixos.

A rotina computacional proposta por Silva, B. (2003) utiliza processo inverso, aplicando nos códigos do algoritmo uma função objetivo que usa o método da minimização das diferenças. A função objetivo (FO) aplicada possui a pressão como principal parâmetro e está descrita na equação 1. A fórmula universal foi utilizada para o cálculo das perdas por atrito.

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

Sendo:

P – carga de pressão (m);

Q – vazão (L/s);

N – conjunto de pontos de observação de valores de pressão;

M - conjunto de pontos de observação de valores de vazão;

C – Quantidade de padrões de consumo;

wH, wQ – pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão;

sim – valores simulados

obs - observados.

Para a calibração da rugosidade foi utilizada a equação de Darcy-Weisbach (equação 2), proposta em 1845.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Onde:

h_f = perda de carga ao longo do comprimento do tubo (mca)

f = fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)

L = comprimento do tubo (m)

V = velocidade do líquido no interior do tubo (m/s)

D = diâmetro interno do tubo (m)

g = aceleração da gravidade local (m/s²)

A rotina implementada pelo modelo de calibração de Silva, B. (2003) é descrita no fluxograma da figura 40. Usando a técnica de algoritmos genéticos, pesquisa-se uma solução que ajuste o valor da rugosidade de cada trecho da rede de distribuição. Para isso, primeiro é feita a leitura dos arquivos de entrada que caracteriza as principais informações da rede (nós, cotas, trechos, diâmetros das tubulações, comprimentos, pressões e vazões medidas, dentre outros).

Após esta leitura, gera-se populações iniciais de soluções que são avaliadas por meio de uma rotina de avaliação para a função objetivo. Na terceira etapa, são aplicados os operadores de recombinação e mutação.

De acordo com o processo utilizado, o de elitismo, para cada geração, as melhores soluções dentre o conjunto total de soluções que serão utilizadas para a próxima geração e assim sucessivamente até que se complete o número de gerações estabelecidas no algoritmo.

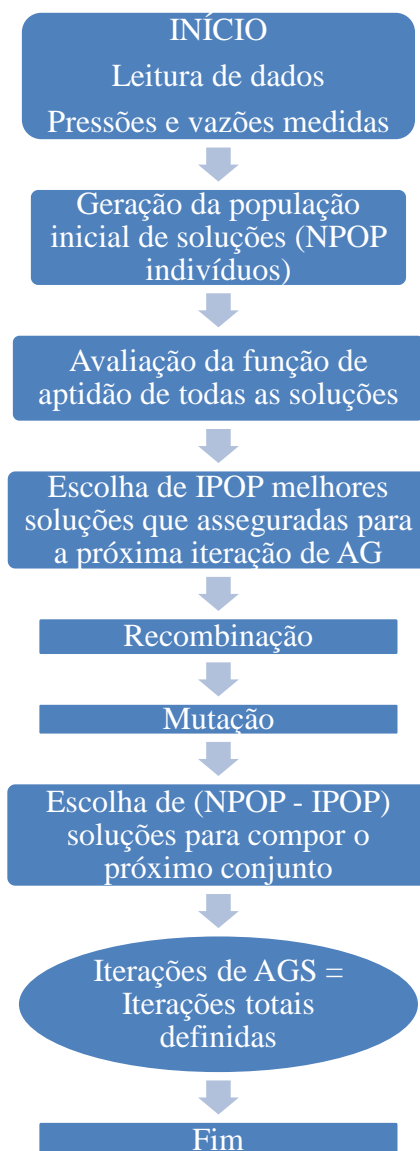


Figura 40 - Fluxograma representando a rotina computacional utilizada.
Fonte: Ribeiro (2014)

ROTINA 2: Esta rotina é composta por 4 passos básicos. O primeiro passo é idêntico à rotina 1, sendo os valores de entrada de rugosidade considerados constantes (0,06) e os valores de demanda são obtidos a partir de cálculos baseados em dados reais. Os dois passos seguintes fazem parte de um processo iterativo para obter o ajuste das constantes de vazamento (C1 e N1) por zonas de pressão.

No passo 2 é aplicado o modelo de Caliman (2002) que calcula C1 e N1, os ajustando com base nas pressões dos patamares de pressão e vazão. O terceiro passo é composto pela aplicação do modelo de Silva, B. (2003) em que se ajusta à rugosidade baseado no ajuste de pressão e vazão medida e calculada. Neste passo, C1 e N1 são

calibrados por zonas de pressão. No quarto passo aplica-se novamente Caliman (2002) – passo 2. A rotina acaba quando os valores obtidos para C1 e N1 tornam-se constantes. São realizados 5 vezes este processo a fim de obter resultados para diferentes análises combinatórias.

A figura 41 traz o fluxograma dos passos da rotina 2.

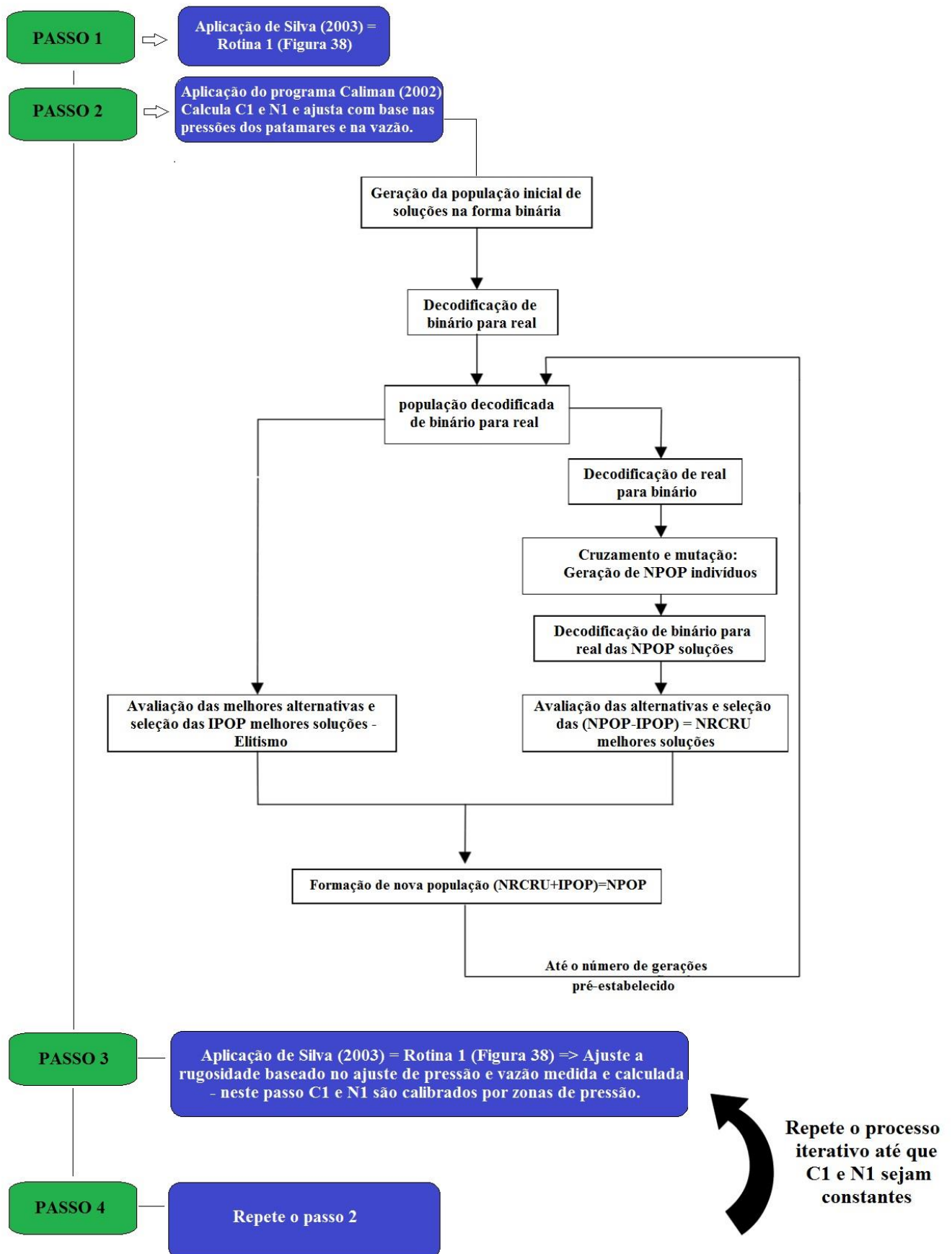


Figura 41 - Fluxograma dos passos da Rotina 2.

ROTINA 3: A diferença essencial da rotina 3 (figura 42) em relação à rotina 2 se encontra no passo 1, onde aplica-se o modelo Silva, B. (2003) adaptado por Goulart (2015) para gerar rugosidade e demanda aleatória. Os demais passos permanecem idênticos a rotina 2.

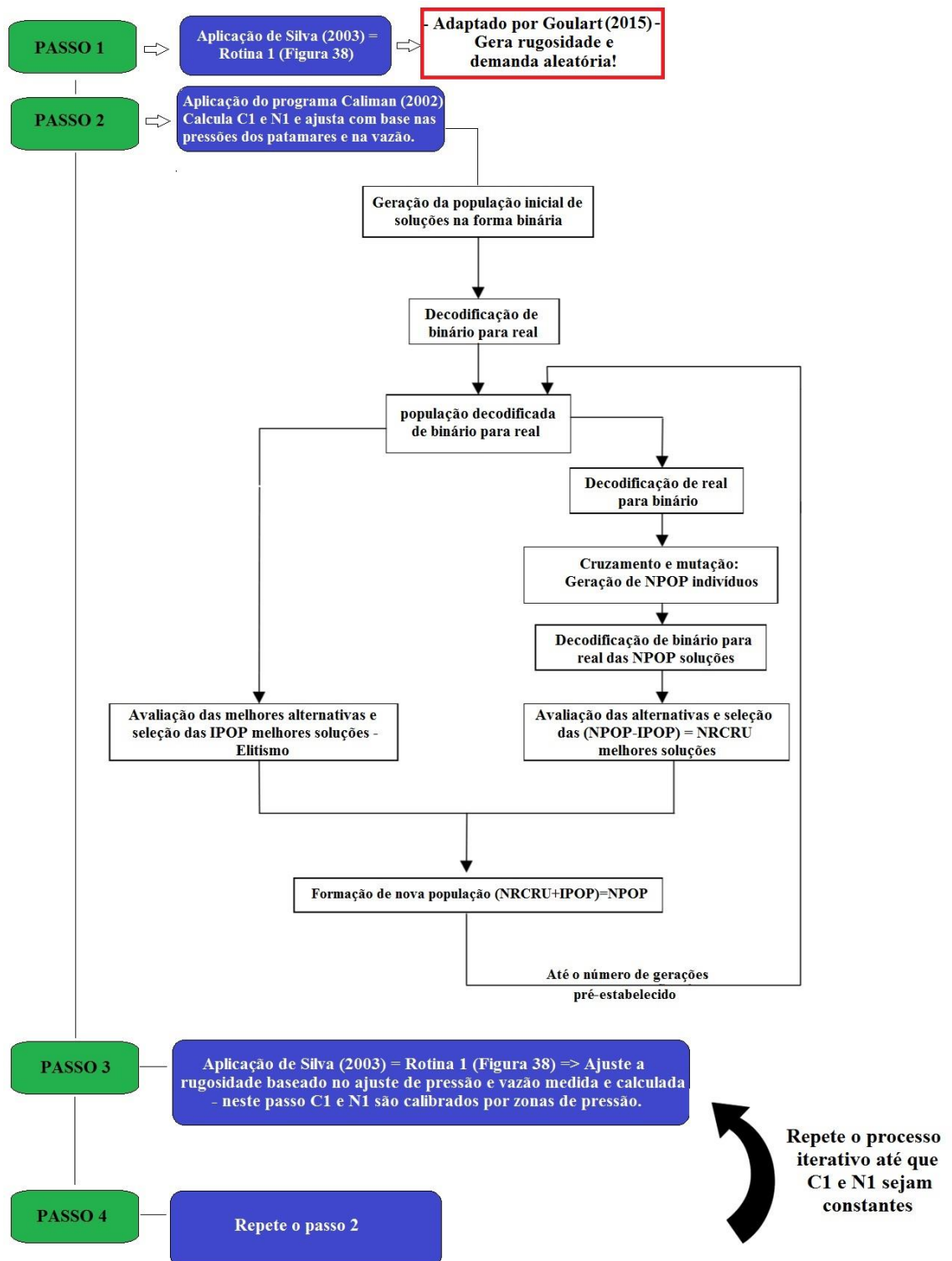


Figura 42 - Organograma dos passos de simulação da Rotina 3.

4.3.1. Determinação do consumo nodal

O correto cálculo do consumo nodal é importante para se obter bons valores de calibração da rugosidade da rede, visto que seu valor está relacionado diretamente ao valor da pressão no nó. Para sua determinação foram obtidos por meio de informações fornecidas pelo SAAE São Lourenço, os consumos residenciais para os três bairros do setor de estudo no período de 7 meses. Então, calculou-se a média para 7 meses no período de junho a dezembro de 2014.

Por meio do uso de dados do consumo médio (em L/s) para cada rua dos bairros, relaciona-se estes valores aos trechos existentes para cada rua e ao seu comprimentos. Para a divisão do valor de consumo total da rua para cada trecho é realizado cálculo de proporção a partir do comprimento da rua, visto que este valor está relacionado ao número de consumidores presentes nesta extensão. Adota-se este método, por não se conhecer com precisão a localização de cada residência para calcular o consumo por número de ligações. Esta aproximação, portanto, apresenta-se como uma fonte de erros.

Como precisa-se do valor de consumo no nó e não no trecho, é realizada outra proporção para redistribuição dos valores dos trechos para os nós, de acordo com o número de alimentações cada nó recebe. Para o exemplo da figura 43, o consumo nodal no segundo nó é calculado por meio do uso da equação 3.

$$C_{N2} = \frac{1}{2}.C_{T12} + \frac{1}{2}.C_{T23} + \frac{1}{2}.C_{T24} \quad (3)$$

Sendo:

C_{N2} = consumo no nó 2

C_{T12} = consumo no trecho 1-2

C_{T23} = consumo no trecho 2-3

C_{T24} = consumo no trecho 2-4

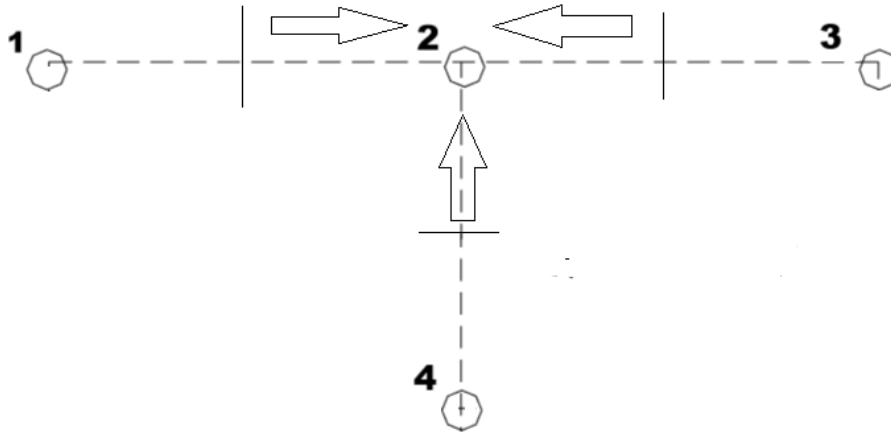


Figura 43 - Esquema cálculo consumo nodal por proporção consumo no trecho.

4.3.2. Cálculo dos coeficientes de vazamento

Existem dois tipos de vazamentos: os vazamentos “grosseiros” e os “inerentes”.

Os vazamentos grosseiros referem-se aos causados por rupturas na tubulação, sendo relacionados com falhas mecânicas que comumente são identificadas e informadas pelos próprios moradores aos órgãos que realizam o concerto. Neste trabalho, para o período referente as campanhas de campo, foram feitas pesquisas com o escritório do SAAE São Lourenço, a fim de investigar a ocorrência destes vazamentos durante as medições.

Já os vazamentos inerentes são pequenos vazamentos que se distribuem ao longo da rede de distribuição, surgindo devido as falhas nas junções. Para a identificação e consideração deste tipo de vazamento no estudo, o modelo hidráulico os incorpora por meio da equação 4 (JOWITT e XU,1990) apud Silva (2003):

$$L = c_1 \cdot l \cdot P^{N1} \quad (4)$$

Onde:

L= vazamento em L/s;

l= comprimento do trecho da rede, em m; e

P = carga de pressão média no trecho considerado, em mH₂O.

Os parâmetros de vazamento C1 e N1, variáveis de decisão do problema que correspondem aos parâmetros do modelo pressão x vazamento, foram obtidos a partir de testes noturnos de vazamentos na área de estudo.

Para a determinação da curva Pressão x Vazamento realiza-se campanha de campo para obtenção de dados de pressão e vazão durante a madrugada (descrito no ítem 4.2.3.6) por ser um período em que o consumo se aproxima de zero, estando relacionado com existência de vazamento.

Os parâmetros de vazamento do modelo são determinados baseado em Silva, B. (2003) apud Caliman (2002), por meio dos dados obtidos pela campanha noturna, sendo expressos pela função de aptidão ou critério segundo o qual a aptidão de cada solução é avaliada. Esta função é determinada pela minimização dos desvios entre os valores calculados pelo modelo de avaliação hidráulica e os correspondentes observados em campo, conforme a equação 5:

$$\text{Mín.}_{C1, N1} \sum_{j=1}^{n_{po}} \left[\sum_{j=1}^{n_n} W_h \frac{|P_{ijOBS} - P_{ijSIM}|^2}{(P_{OBS})^2} + \sum_{k=1}^{n_c} W_q \frac{|Q_{ikOBS} - Q_{ikSIM}|^2}{(Q_{OBS})^2} \right] \quad (5)$$

Onde:

- P_{ijSIM} e P_{ijOBS} - representam os valores de pressão simulada e observada, respectivamente, para o nó j e padrão de observação i;
- Q_{ikSIM} e Q_{ikOBS} - representam os valores de vazão simulada e observada, respectivamente, para o conduto k e padrão de observação i;
- n_n - representa o conjunto de nós de monitoramento dos valores de pressão;
- n_c - representa o conjunto de condutos de monitoramento dos valores de vazão;
- P - é a média dos valores de pressão observados;
- Q - é a média dos valores de vazão observados,
- n_{po} - número de padrões de observação;
- C1 e N1 - variáveis de decisão do problema, que correspondem aos parâmetros do modelo pressão x vazamento;
- W_h e W_q - pesos atribuídos à importância relativa de minimização dos desvios entre os valores calculados e observados de carga hidráulica e vazão, respectivamente.

Os passos 2 e 4 das simulações das rotinas 2 e 3 que calculam os valores dos coeficientes de vazamento C1 e N1 desenvolvido por Caliman (2002) são descritos nas figuras 41 e 42.

4.3.3. Porcentagem de ajuste

A fim de proporcionar melhor análise da diferença entre os resultados de calibração de pressão e vazão para as três rotinas realizadas, considera-se como porcentagem de ajuste, a fórmula da equação 6.

$$PA = \left(\frac{VS}{VR} \right) * 100 \quad (6)$$

Sendo:

- PA = Porcentagem de ajuste;
- VS = Valor simulado;
- VR = Valor real.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados experimentais obtidos nas campanhas de campo

5.1.1. Variação da pressão ao longo do tempo

A seguir são apresentados o formato de variação da pressão ao longo do tempo obtidos durante o dia 25 da campanha de 7 dias realizada de 20 a 27 de setembro de 2014 e também, para os sete dias de medição. Os dados deste dia específico são analisados separadamente por se tratar do dia selecionado entre os 7 dias de medidas como referência, a fim de realizar a calibração.

Para auxiliar a análise dos dados de pressão são apresentadas na tabela 5 os valores das cotas altimétricas para cada ponto de monitoramento.

Tabela 6 - Altitudes de cada ponto de monitoramento de pressão.

Nó de monitoramento	Altitude (m)
14	880,25
105	877,00
51	921,63
111	870,87
109	885,24
116	921,72
112	897,89
103	886,99
117	905,43
113	876,72
62	894,01
85	896,7
108	895,92
115	917,44
114	921,36

Os nós 14 e 105 pertencem ao bairro Palmela, sendo o ponto de monitoramento do nó 14 o nó mais distante da entrada do setor estudado.

Pode-se observar nos valores de pressão do dia 25 de setembro do nó 14 (figura 44) que ocorrem dois pontos de decréscimos de pressão mais expressivos, às 13:45 e 19:15h, estes decréscimos podem ser explicados pelo maior consumo de água nestes horários.

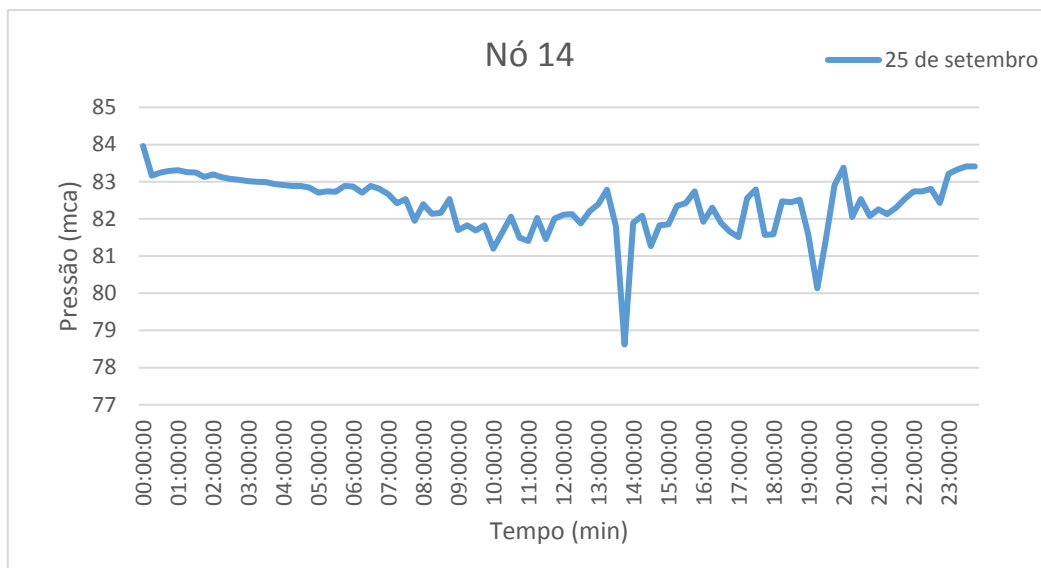


Figura 44 - Registro de pressão no nó 14.

Ao analisar a variação da pressão para os sete dias de medição (figura 45), constata-se que a diferença entre o maior valor de pressão (92,16 mca no dia 24/09) e (72,23 mca no dia 22/09) é de 19,93 mca. Esta variação é menor em relação as variações dos demais nós. A pressão é bastante regular, visto que se trata de um bairro de baixo relevo, variando em média, 81,5 mca. As alterações estão relacionadas portanto com variações na rede.

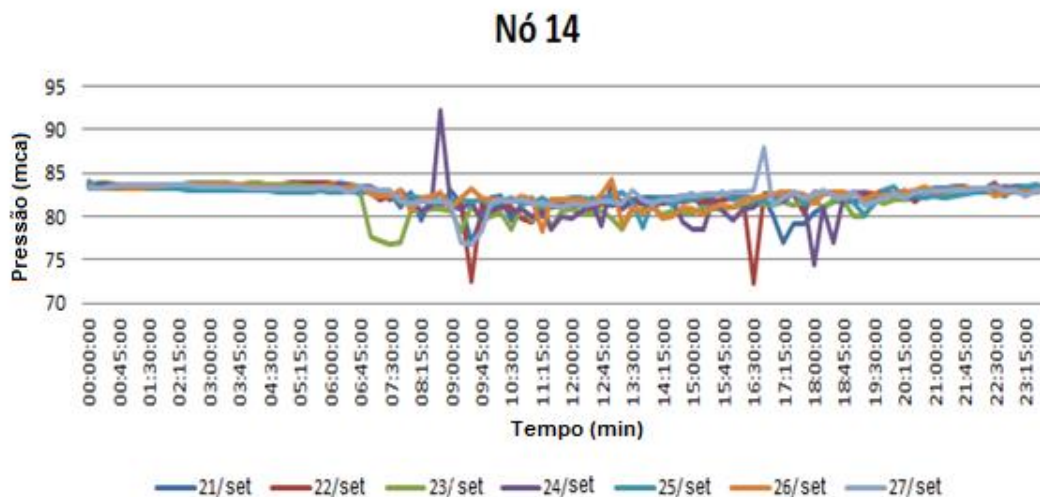


Figura 45 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 14.

No nó 105 (figura 46), o mínimo de pressão apresenta o valor de 49,04 mca às 9:45h. Ao analisar as medições para 7 dias (figura 47), este decréscimo não se repete para os demais dias de medição, o que representa um aumento pontual do consumo (não

relacionado à hábitos diários) ou alguma operação diferenciada na concessionária de água (fechamento de válvula).

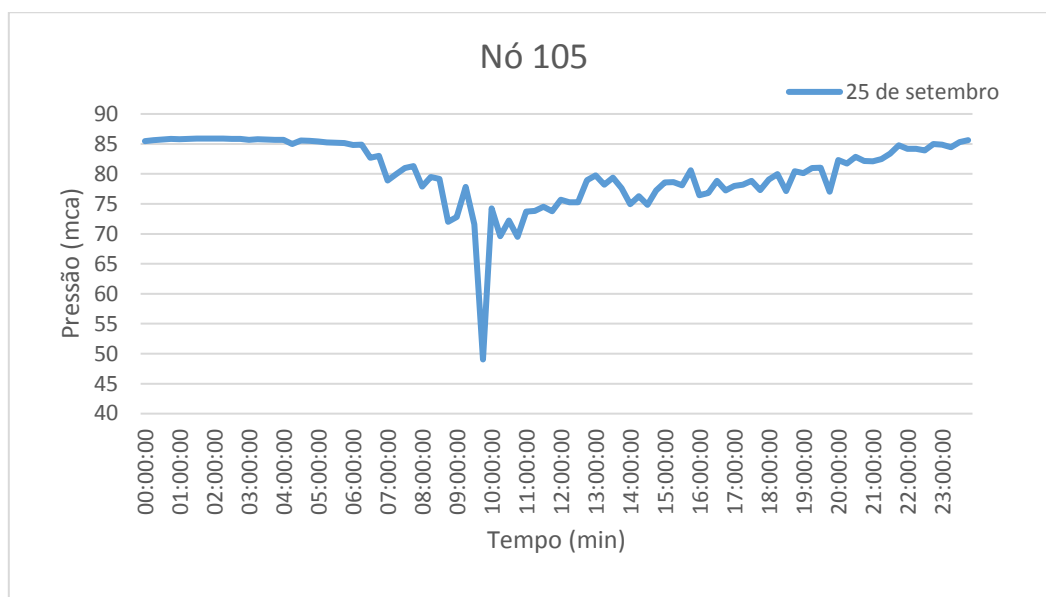


Figura 46 - Registro de pressão no nó 105.

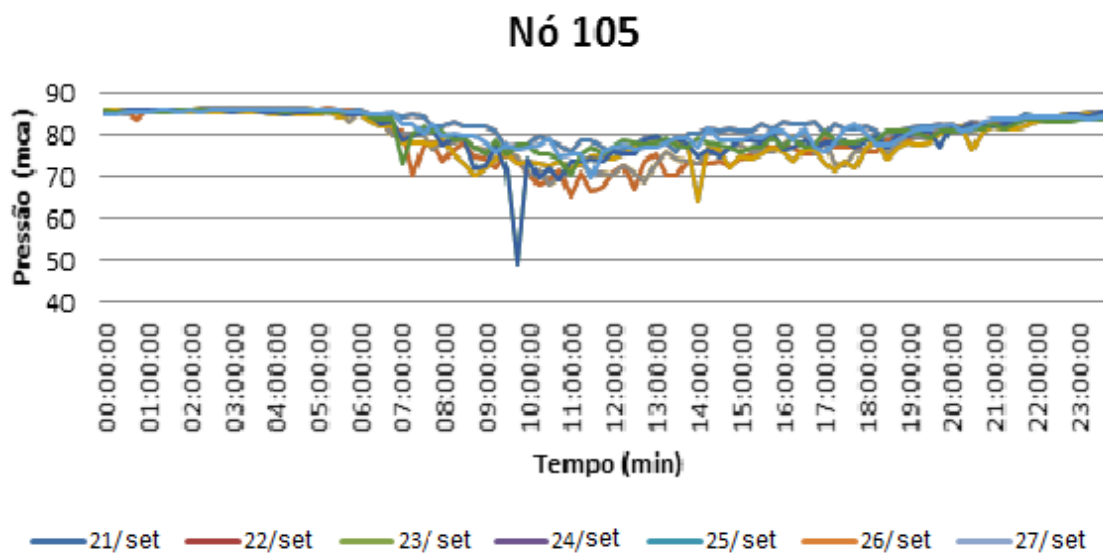


Figura 47 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 105.

Os nós 51, 103, 111, 112, 113, 109, 116 e 117 pertencem ao bairro Vale dos Pinheiros.

O nó 51 (figura 48) apresenta falha nas coletas de dados no período das 13:00 às 00:00 hrs, sendo que esta falha não prejudica os dados de entrada do modelo de calibração

pois é realizado preenchimento com a média de pressão dos outros 6 dias de campanha de campo. Esta falha possivelmente é relacionada com fechamento de registro local.

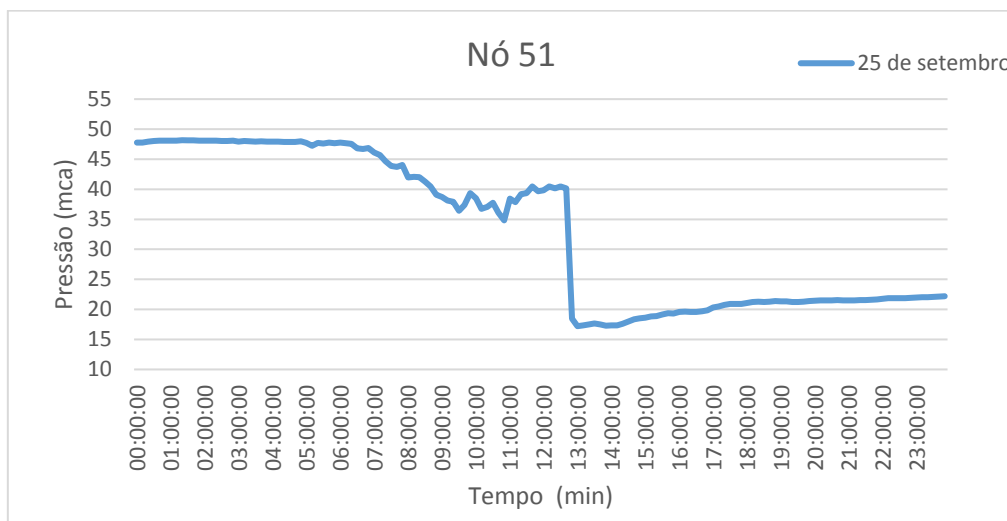


Figura 48 - Registro de pressão no nó 51.

Por se tratar de um dos três pontos de monitoramento da rede de distribuição de água com maior altitude (tabela 5), os valores de pressão são mais baixos, como pode ser analisado na figura 49, com média de 43 mca. Nos dias 25 e 26 ocorre um comportamento de queda abrupta do valor da pressão que não se adequa ao padrão de pressão dos demais dias de medida, relacionado com fechamento de registro para manutenção .

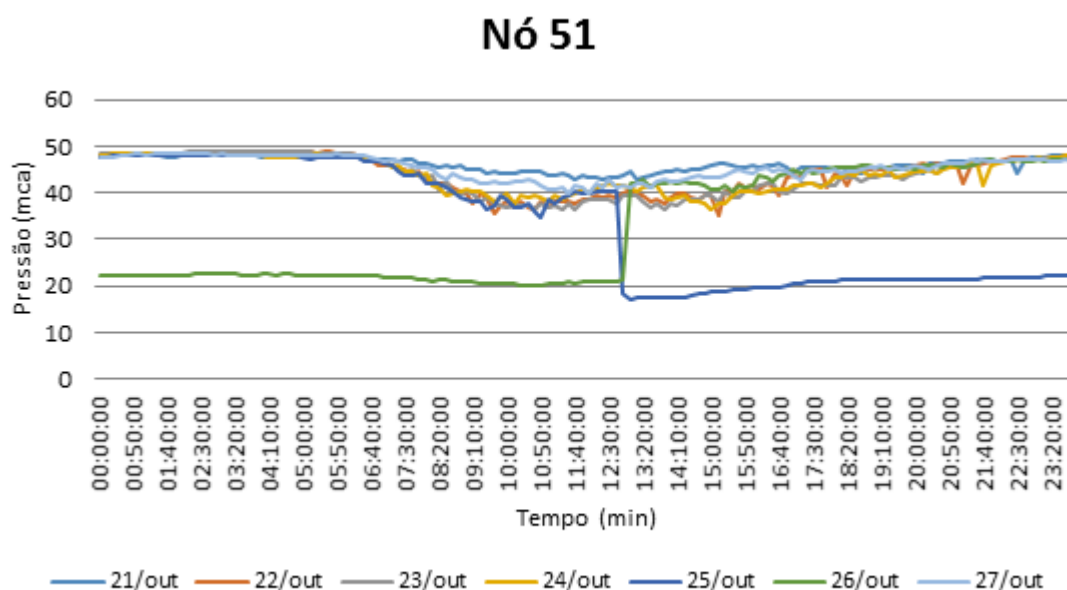


Figura 49 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 51.

O nó 111 (figura 50) localiza-se na parte baixa do bairro Vale dos Pinheiros, e constitui-se no nó de monitoramento com menor altitude, possuindo portanto, elevados valores de pressão. Seu ponto de maior consumo (menor pressão) ocorre às 10:50h.

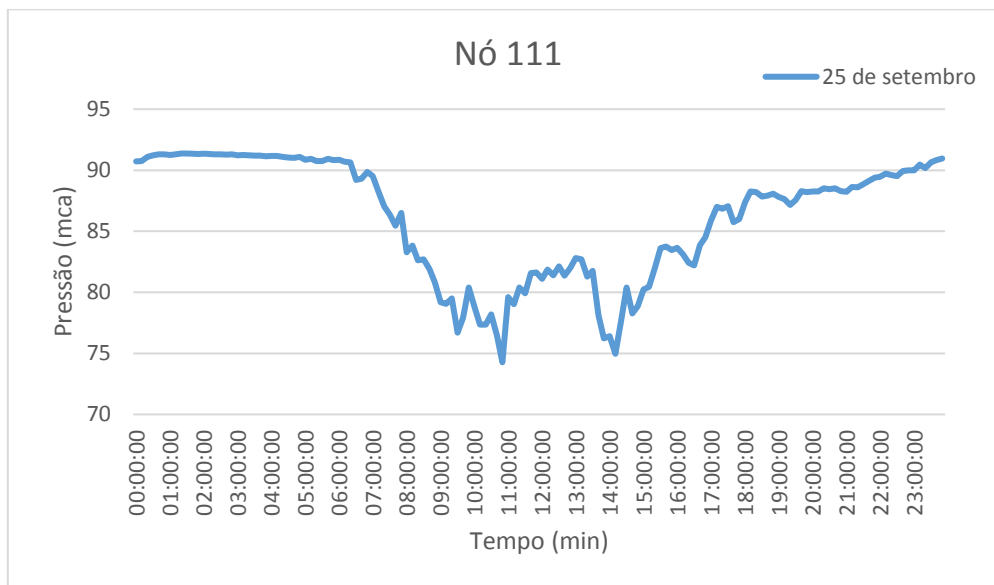


Figura 50 - Registro de pressão no nó 111.

Durante os 7 dias de medição de pressão no nó 111 (figura 51), o dia 21 foi o que apresentou menor variação de pressão, representando um dia com menor consumo de água.

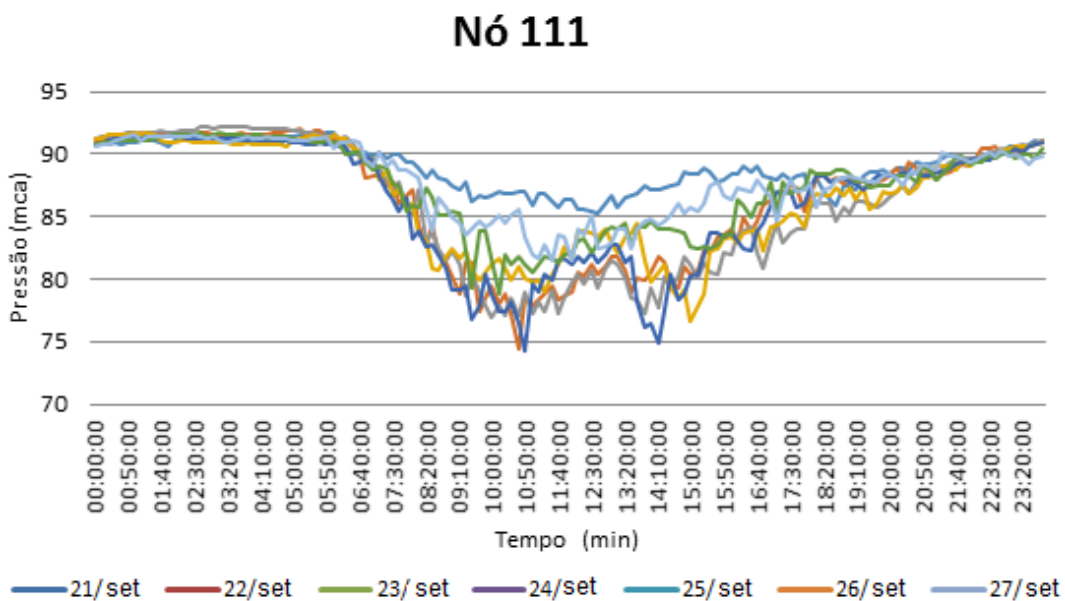


Figura 51 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 111.

O nó 109 (figuras 52 e 53) apresenta como comportamento a se destacar a queda do valor de pressão intensa uma vez no dia, exceto no dia 23 em que ocorre o decréscimo duas vezes. Estas variações provavelmente estão relacionadas com intervenções locais.

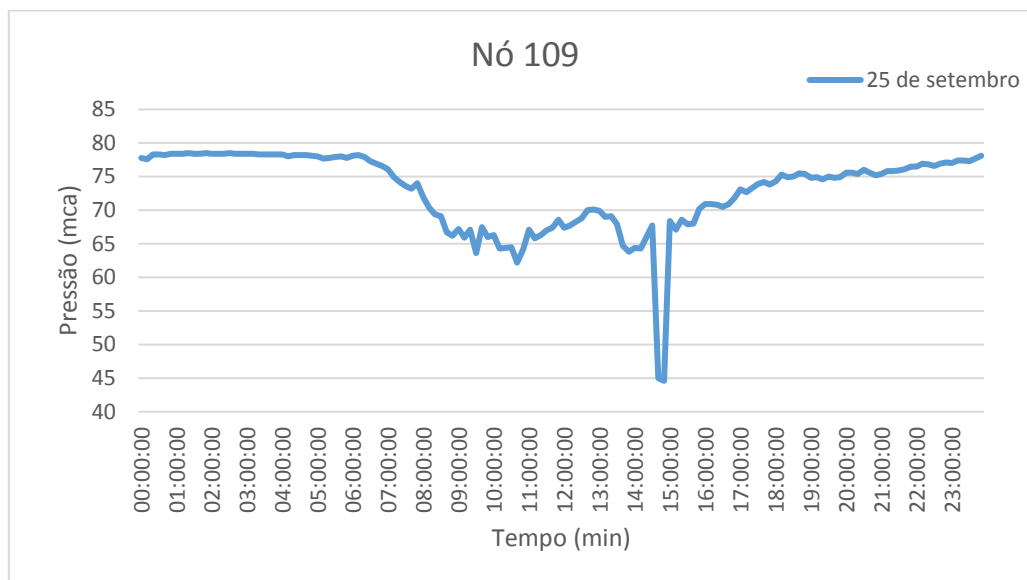


Figura 52 - Registro de pressão no nó 109.

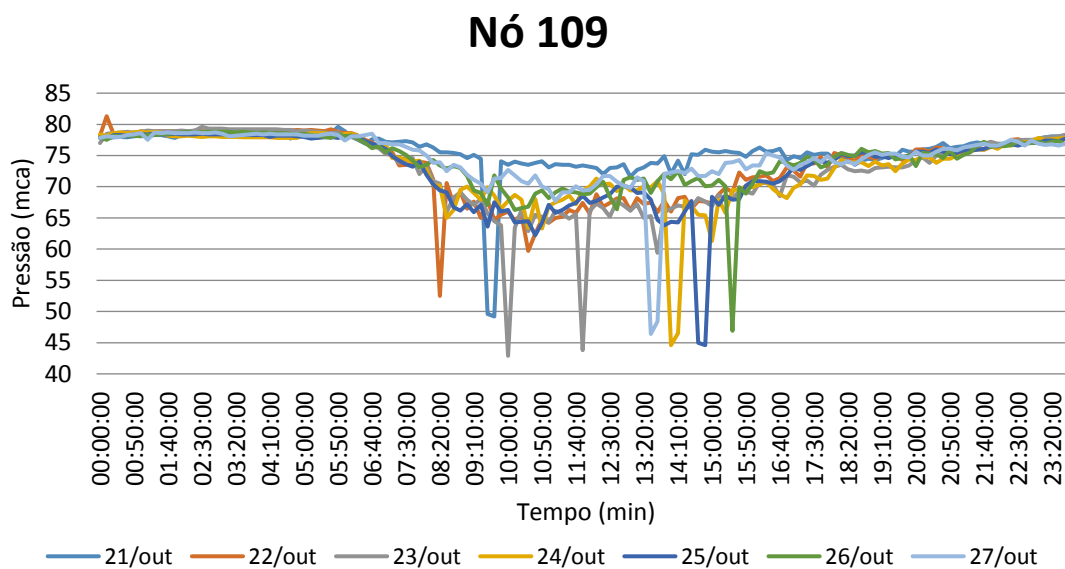


Figura 53 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 109.

O nó 116 possui no dia 25 de setembro (figura 54) uma queda do valor de pressão que se prolonga por um período de aproximadamente, 3 horas. Este fato não se repete nos

demais dias de medição (figura 55). Duas hipóteses podem explicar a queda nos valores de pressão no período: (1) enchimento de uma piscina por exemplo e (2) algum tipo de vazamento interno que, após 3 horas foi reparado.

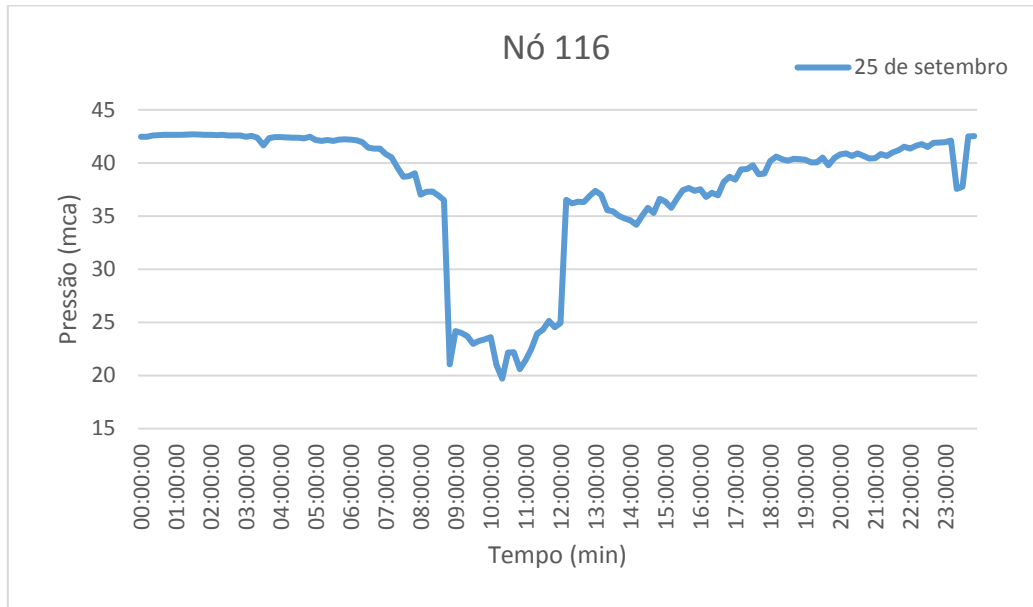


Figura 54 - Registro de pressão no nó 116.

O nó 116 também refere-se ao ponto de monitoramento com maior altitude (tabela 5), o que justifica os menores valores de pressão.

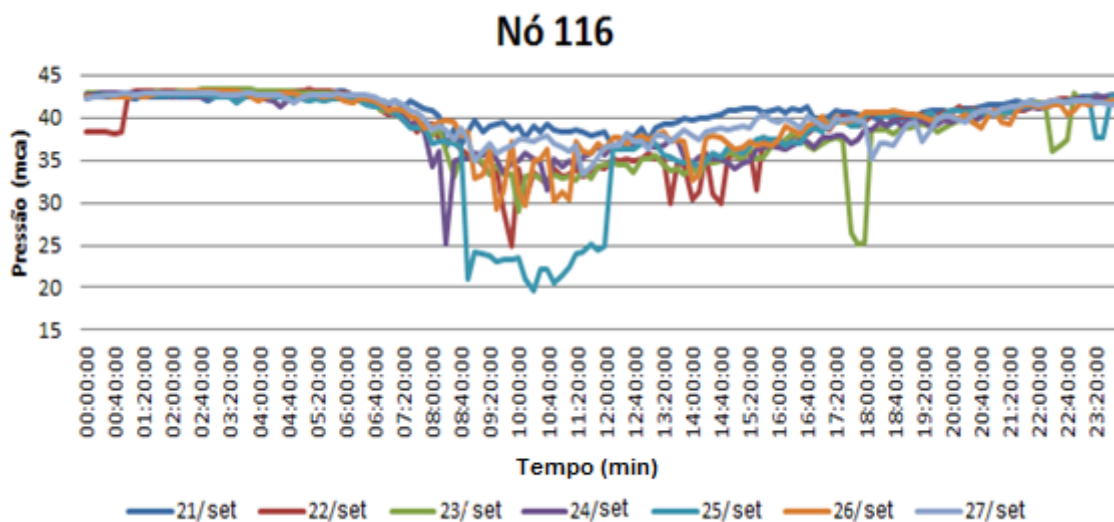


Figura 55 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 116.

O nó 112 encontra-se em uma região de altitude média (897,89m) em comparação com os demais nós de monitoramento. As quedas pontuais de pressão que ocorrem para o dia 25 de setembro (figura 56) repete-se parcialmente nos dias 22 e 25 (figura 57). Como o nó de monitoramento refere-se a uma pousada, provavelmente relaciona-se aos dias em que receberam maior número de hóspedes.

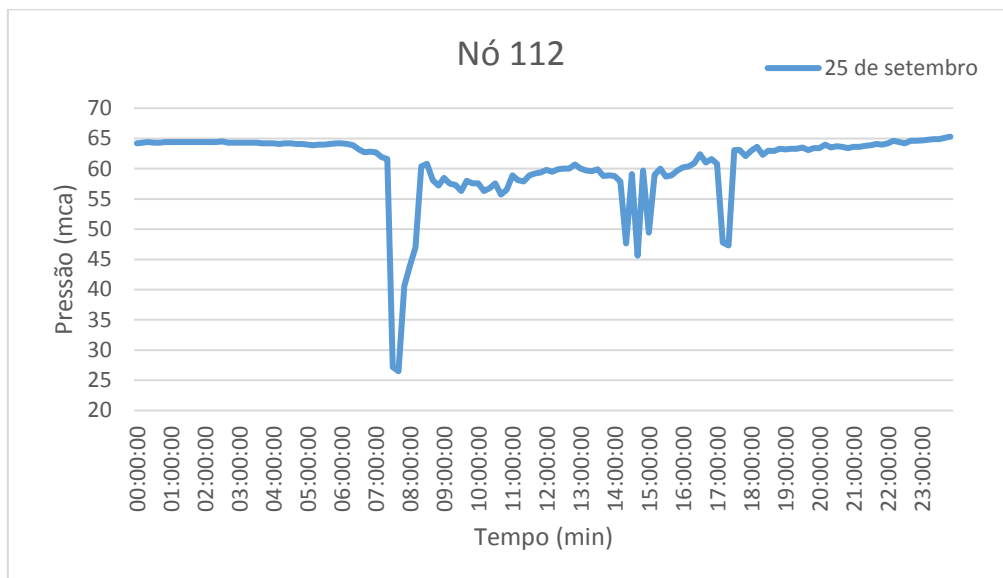


Figura 56 - Registro de pressão no nó 112.

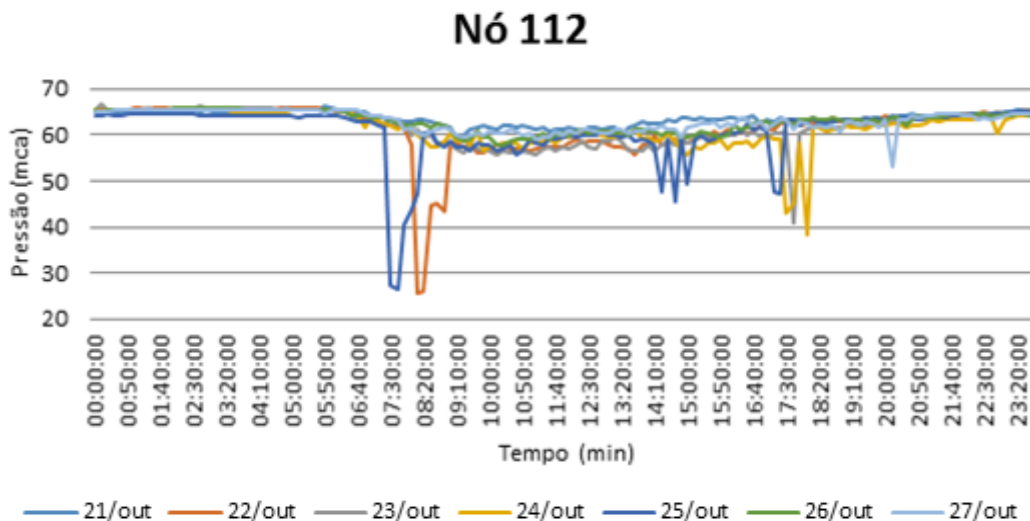


Figura 57 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 112.

O nó 103 (figura 58) possui variação dos valores de pressão bastante regular, com quedas de pressão nos horários de maior consumo (tabela 6). A maior queda de pressão ao analisar os 7 dias de medição (figura 59) ocorre no dia 22 de setembro, às 14:20h.

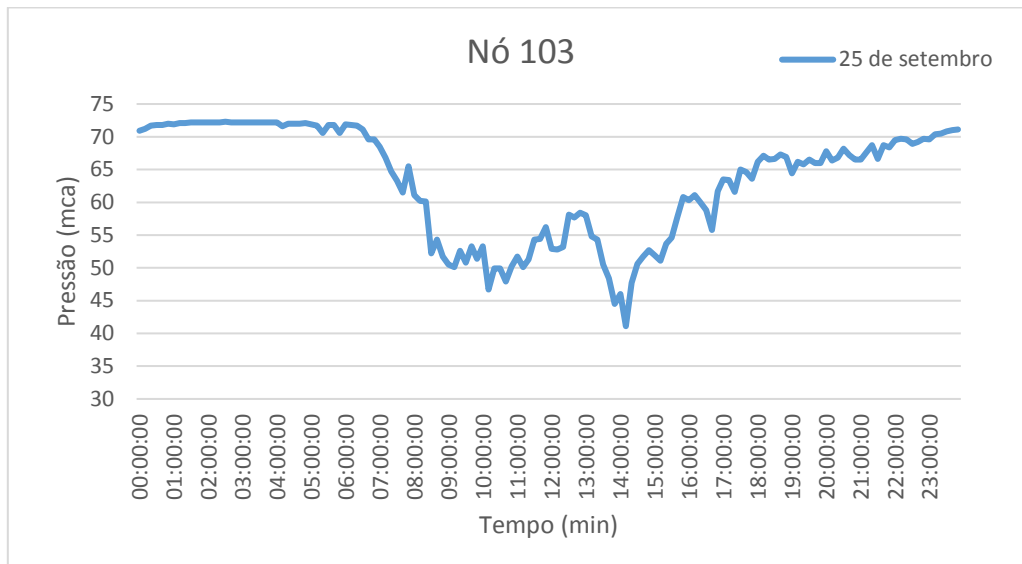


Figura 58 - Registro de pressão no nó 103.

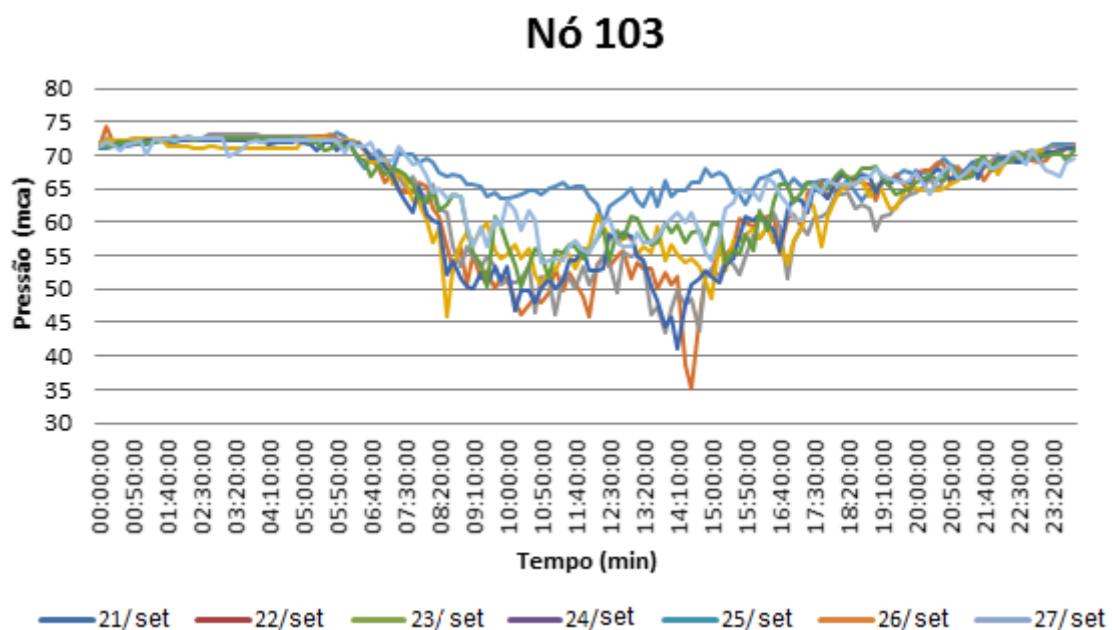


Figura 59 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 103.

O nó 117 (figura 60) apresenta comportamento similar ao nó 103 (figura 58).

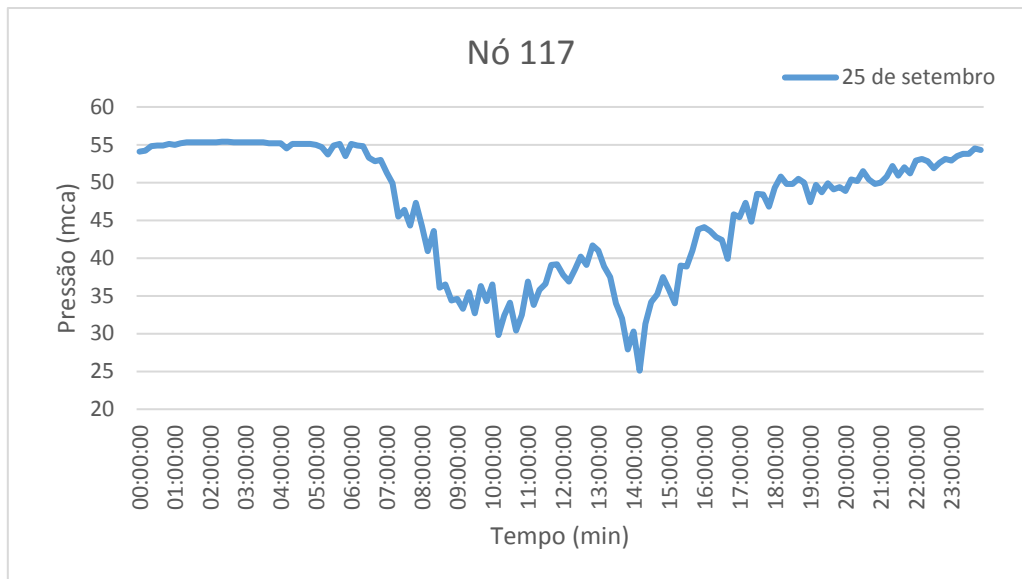


Figura 60 - Registro de pressão no nó 117.

Como ocorre também com outros nós, o valor da pressão medida no dia 21 de setembro (figura 61) para o nó 117 apresenta média superior que os demais dias, o que pode ser explicado pelo fato de se referir a um dia de domingo, ocorrendo, portanto, menor consumo de água na data.

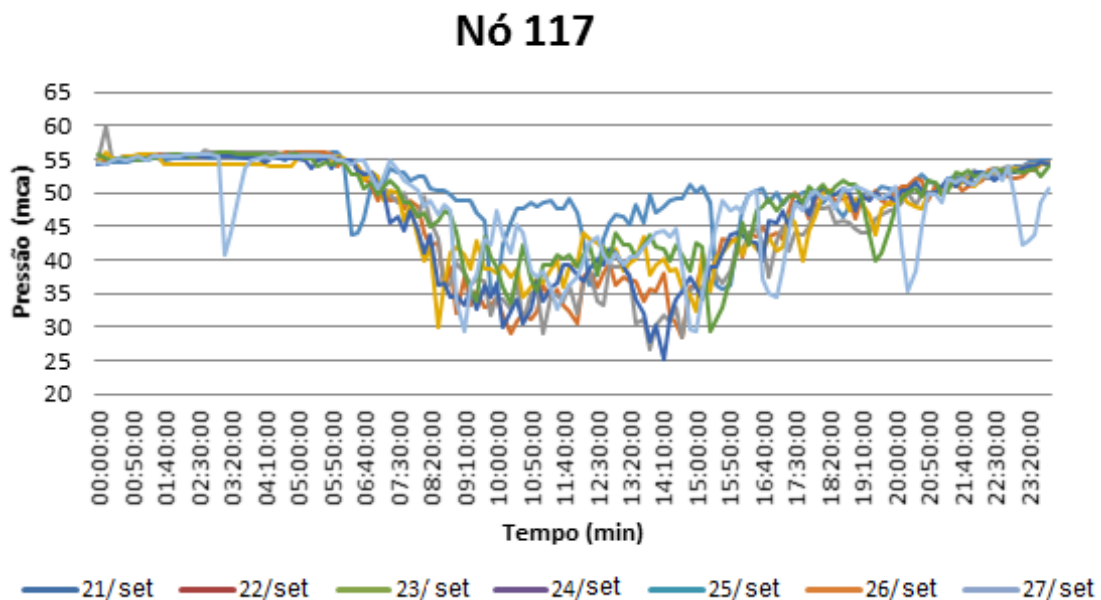


Figura 61 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 117.

No nó 113 (figura 62) ocorre uma queda de pressão pontual às 11:10h no dia 25 de setembro, que pode estar relacionada a algum tipo de aumento de consumo não habitual neste dia, já que nos outros dias (figura 63) não se repete.

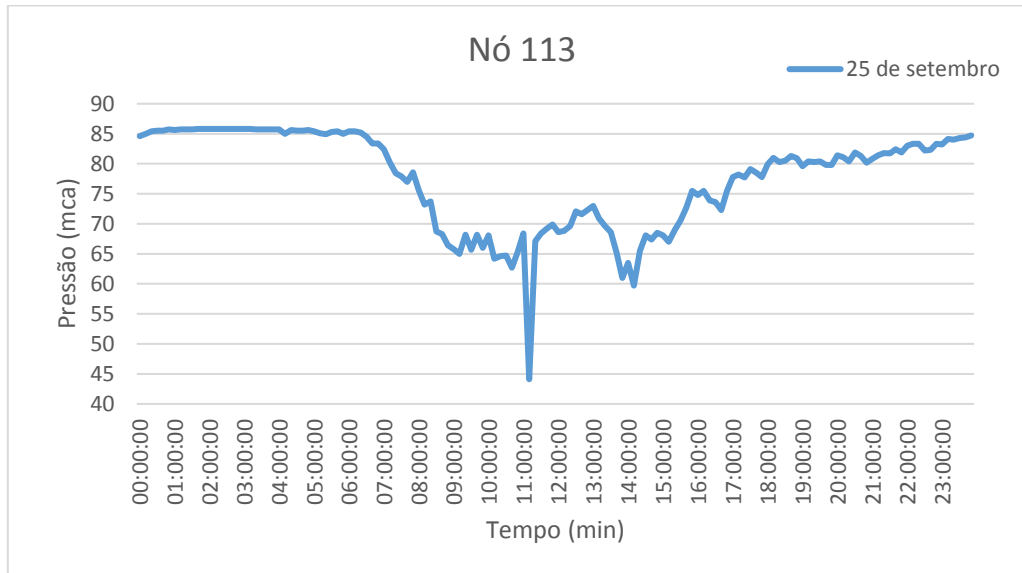


Figura 62 - Registro de pressão no nó 113.

A figura 63 demonstra que uma queda de pressão ainda maior que a que ocorre no dia 25 para o dia 24 de setembro, relacionada provavelmente, à alguma intervenção local.

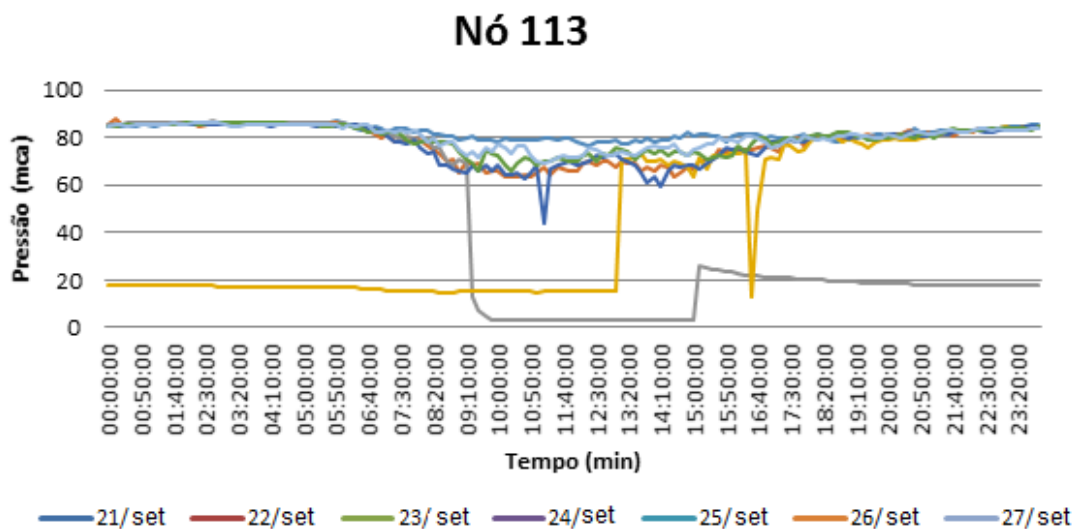


Figura 63 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 113.

Os nós 62, 85, 108, 114 e 115 pertencem ao bairro Morada da Serra.

No nó 62 (figura 64), ocorre o menor valor de pressão (maior consumo) às 13:50h. Apesar de em menor intensidade, este declínio da pressão também ocorre às 9:00h e às 20:50h.

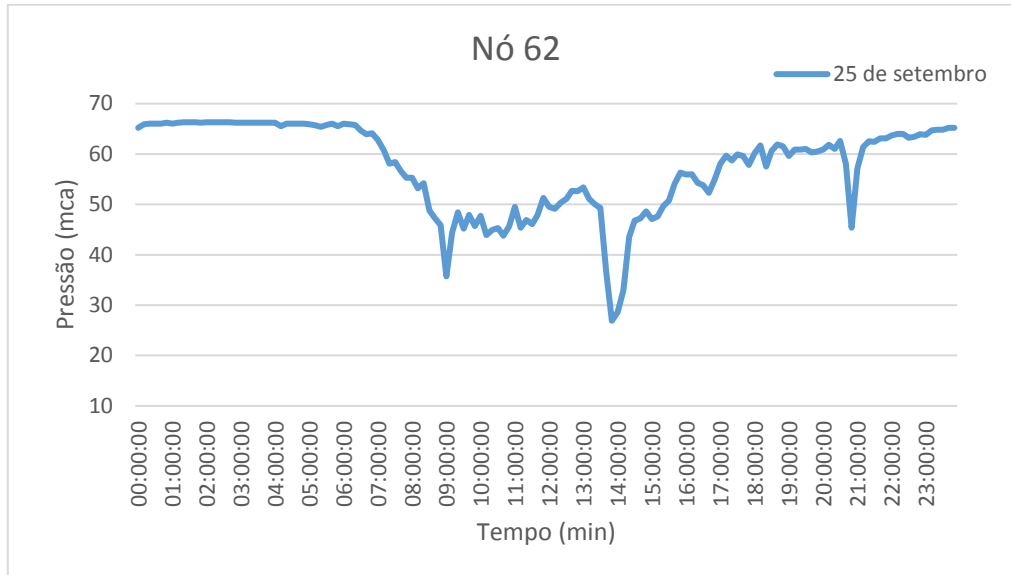


Figura 64 - Registro de pressão no nó 62.

O padrão de queda no valor da pressão que pode ser observado no dia 25 de setembro se repete, de forma geral, para os demais dias de medição (figura 65), estando portanto relacionado com hábitos de horários de maior consumo durante o dia.

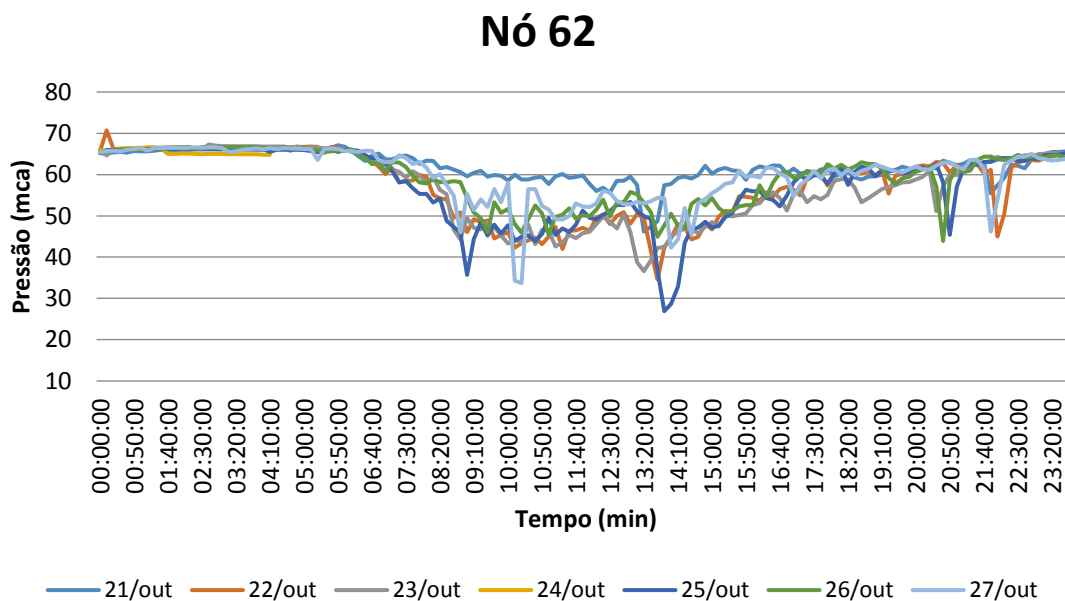


Figura 65 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 62.

O nó 85 (figura 66) e 108 (figura 68) apresenta variação dos valores de pressão similar aos nós 117 (figura 60) e 103 (figura 58).

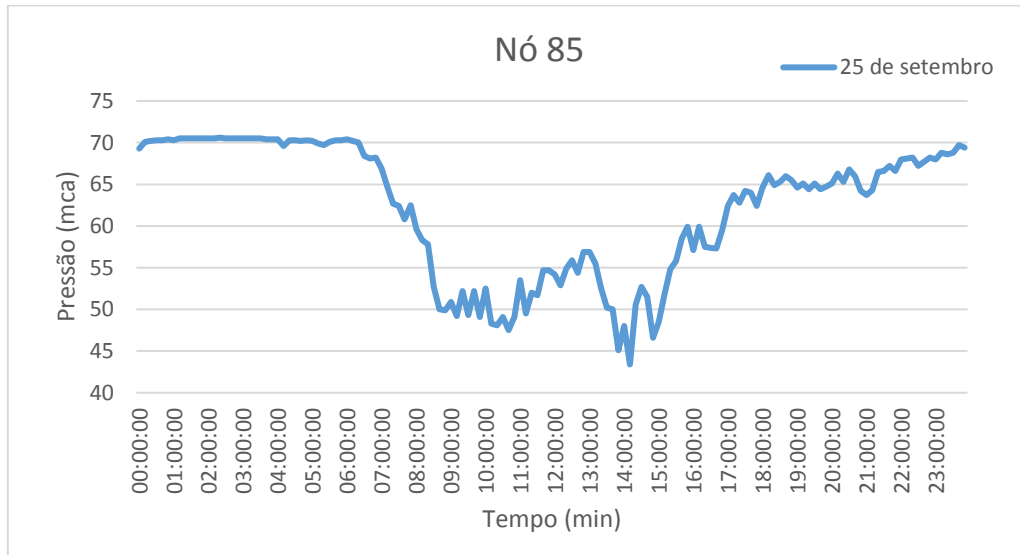


Figura 66 - Registro de pressão no nó 85.

O padrão de maiores valores de pressão (menor consumo) no dia 21 de setembro, um domingo, repete-se também para os nós 85 (figura 67) e 108 (figura 69).

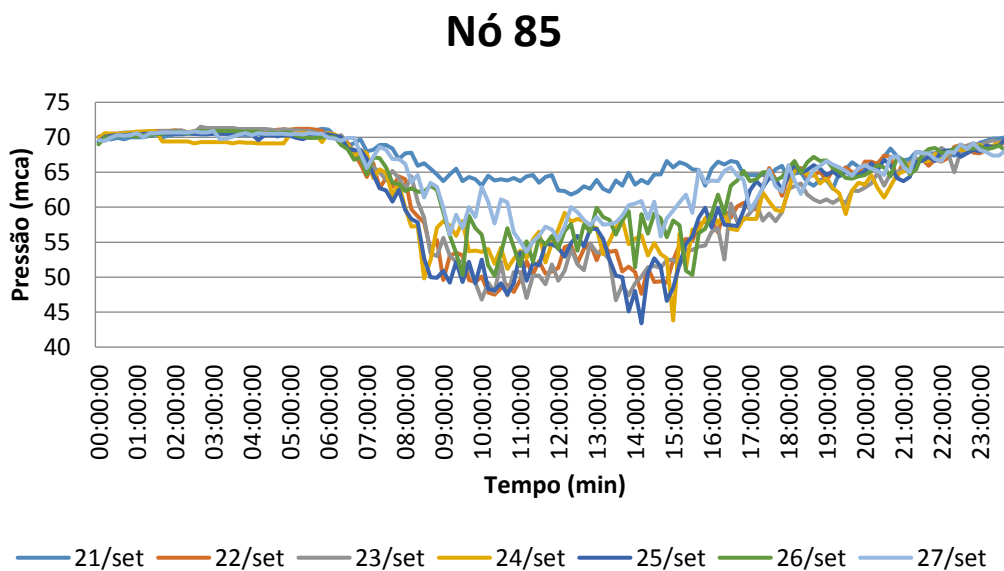


Figura 67 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 85.

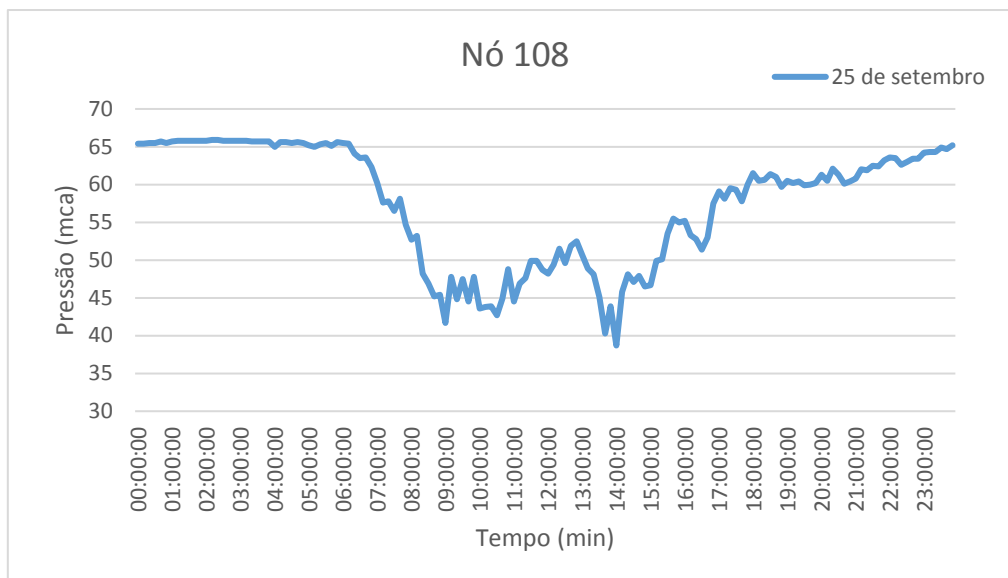


Figura 68 - Registro de pressão no nó 108.

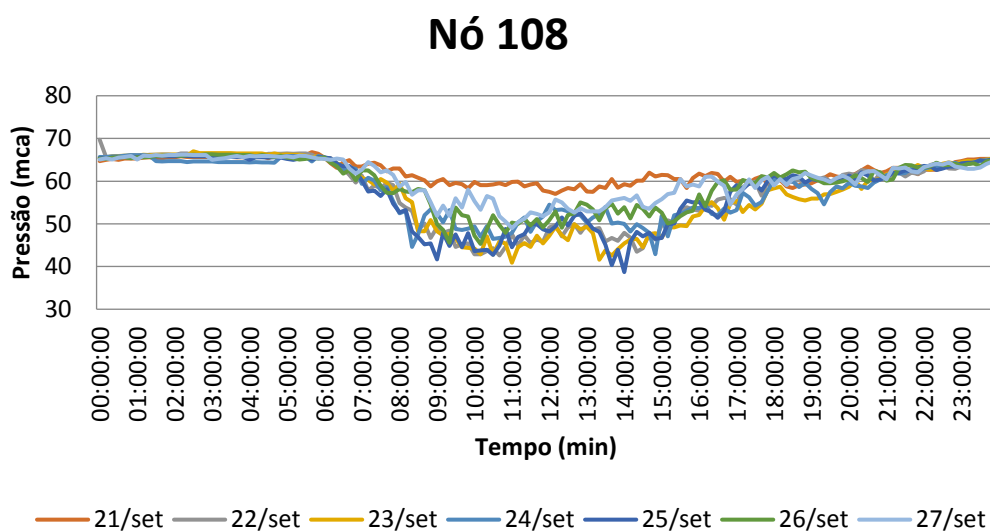


Figura 69 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 108.

Os nós 115 e 114 pertencem à região da rede de que possui um *bôoster* que é desligado durante a madrugada. Este decréscimo de energia pode ser observado nas figuras 70 e 72.

Para o nó 115 (figura 70), observa-se comportamento similar ao do nó 114 (figura 72) para o dia 25 de setembro.

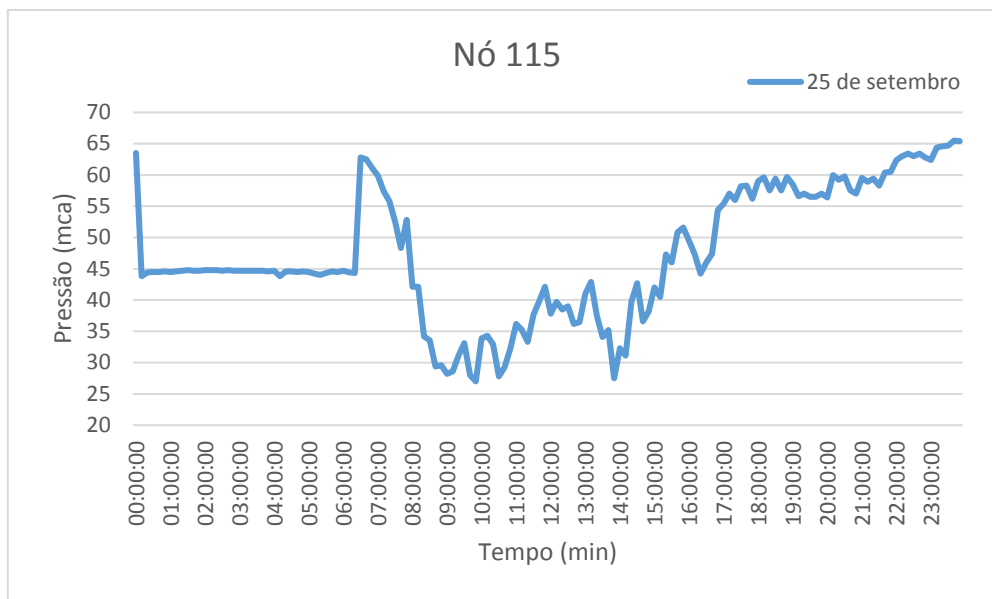


Figura 70 - Registro de pressão no nó 115.

O decréscimo de pressão que ocorre no dia 24 de setembro às 19:40h (figura 71) se repete para o nó 114 (figura 73), significando alguma intervenção de manutenção local, visto que estes dois nós são próximos. Ao verificar as intervenções junto ao SAAE, não aparece no histórico de intervenções. Cria-se a hipótese de que ocorreu intervenções não notificadas.

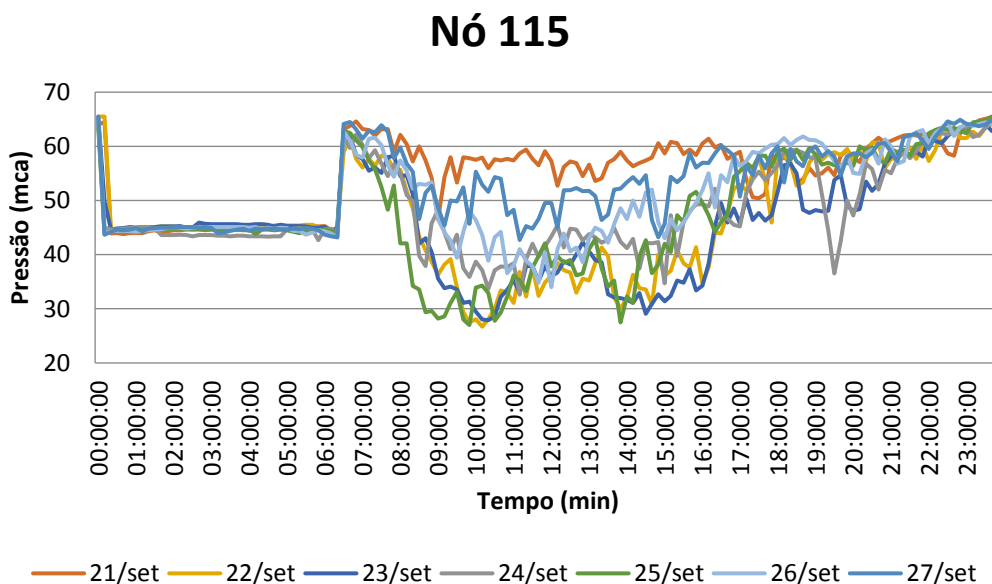


Figura 71 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 115.

O nó 114 (figura 72) é o terceiro ponto com maior altitude entre os pontos de monitoramento, o que justifica o padrão de pressão inferiores e a necessidade do bôoster.

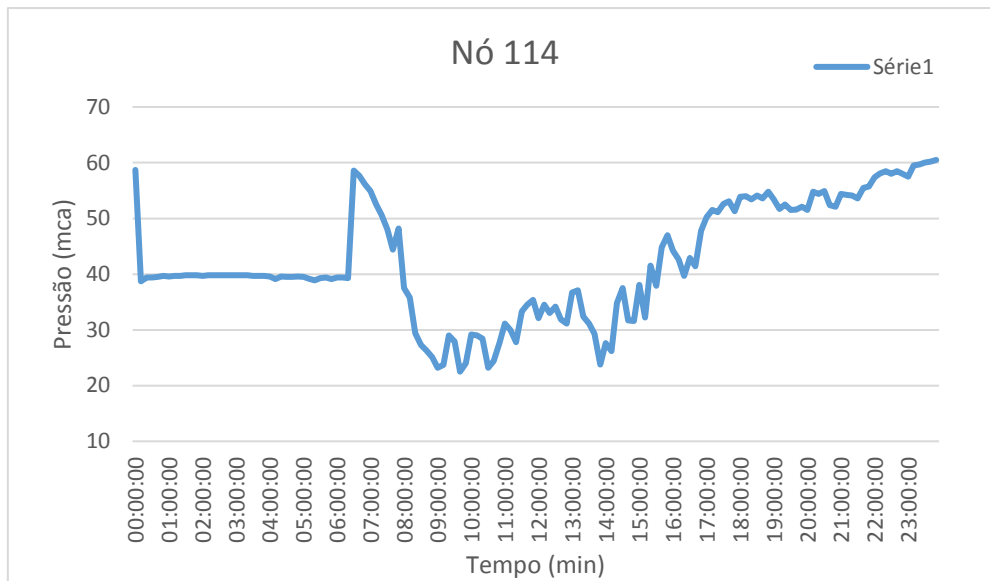


Figura 72 - Registro de pressão no nó 114.

Duas quedas dos valores de pressão se destacam nas medições de 7 dias do nó 114 (figura 73), ocorrendo às 14:50h do dia 27 e às 17:30h do dia 21 de setembro. Provavelmente, são relacionadas com padrão irregular de consumo (pois não ocorre nos demais dias) e não com alguma manutenção na rede de abastecimento, já que não ocorre para o nó 115 (figura 71) que se localiza próximo a este nó.

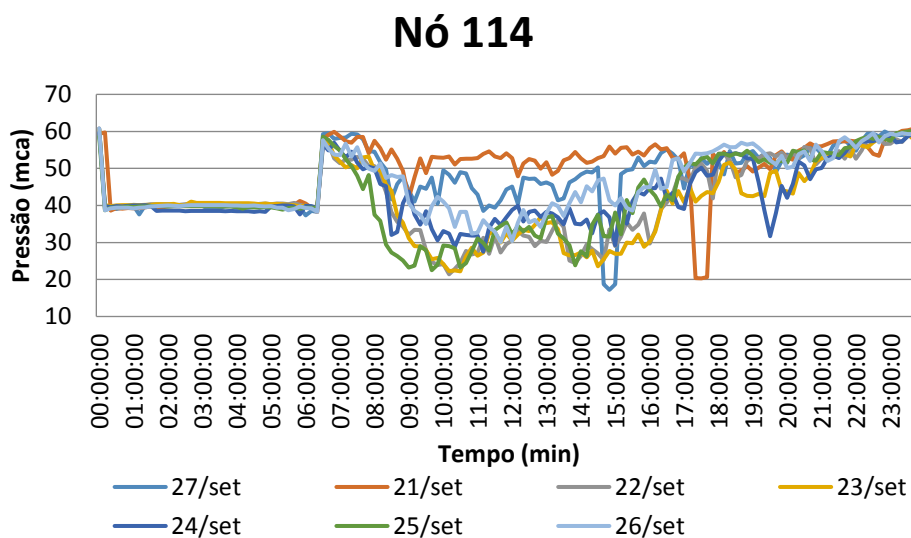


Figura 73 - Registro de pressão em 7 dias de medição consecutivos no nó 114.

As simulações consideram 3 padrões de consumo: máximo, médio e mínimo (tabela 6), que são inversamente proporcionais à pressão. A determinação destes horários foi obtida a partir da análise da variação da pressão ao longo do tempo (figuras 44 a 73).

Tabela 7 - Horários equivalentes a cada padrão de consumo.

Padrão	Horário	Consumo	Pressão
1	10:30h	Máximo	Mínima
2	08:00h	Médio	Média
3	02:30h	Mínimo	Máxima

5.1.2. Variação da vazão ao longo do tempo

A figura 74 apresenta a variação dos valores da vazão de entrada no setor de estudo medida durante 7 dias. O padrão de variação da vazão ao longo do tempo segue o mesmo comportamento para a maior parte dos dias, destacando que no dia 21 de setembro, um domingo, a média do valor de vazão é inferior, visto que ocorre menor consumo. No sábado (dia 27) observa-se valores médios de vazão, sendo os maiores valores referentes ao dia 25 de setembro.

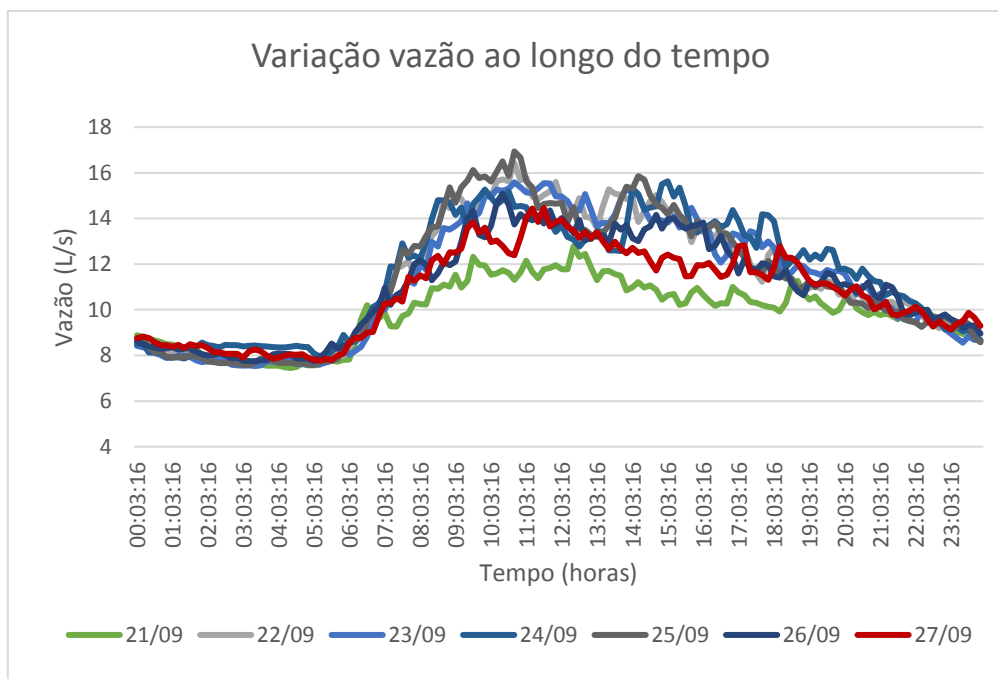


Figura 74 - Variação da vazão ao longo de 7 dias de medição.

5.1.3. Consumo nodal

A partir de informações fornecidas pelo SAAE – São Lourenço – MG, são calculadas as médias de consumo para cada rua dos bairros do setor de estudo, obtendo assim, a média de 7 meses para cada bairro.

A tabela 7 apresenta a média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Morada da Serra, sendo a média final calculada para o bairro de 0,842 L/s.

Tabela 8 - Média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Morada da Serra.

Rua \ Meses	Jun/14	Jul/14	Ago/14	set/14	out/14	nov/14	dez/14	Média 7 meses (L/s)
Alameda morena	0,062	0,049	0,049	0,081	0,116	0,064	0,073	0,071
Alameda da mantiqueira	0,171	0,283	0,282	0,328	0,306	0,315	0,316	0,286
Alameda da canastra	0,040	0,032	0,032	0,059	0,03	0,031	0,034	0,038
Alameda boa esperança	0,087	0,074	0,075	0,084	0,067	0,077	0,069	0,076
Alameda das araras	0,170	0,155	0,155	0,192	0,162	0,169	0,149	0,164
Alameda ibitipoca	0,071	0,071	0,071	0,112	0,086	0,095	0,137	0,092
Alameda do cipó	0,108	0,098	0,098	0,114	0,072	0,073	0,082	0,092
Alameda do papagaio	0,006	0,008	0,007	0,010	0,015	0,010	0,009	0,009
Rua projetada	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Total (L/s)	0,729	0,783	0,782	0,994	0,875	0,847	0,882	0,842

A tabela 8 apresenta a média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Vale dos Pinheiros, sendo a média final calculada para o bairro de 2,071 L/s.

Tabela 9 - Média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Vale dos Pinheiros.

Meses Rua	Jun/14	Jul/14	Ago/14	Set/14	Out/14	Nov/14	Dez/14	Média 7 meses (L/s)
Alameda dos pinheiros	0,124	0,125	0,156	0,167	0,146	0,127	0,133	0,140
Alameda das rosas	0,057	0,059	0,074	0,069	0,057	0,057	0,059	0,062
Alameda das Margaridas	0,342	0,282	0,280	0,340	0,307	0,331	0,318	0,314
Alameda dos Ipes	0,151	0,137	0,132	0,265	0,191	0,165	0,188	0,176
Alameda das Azaleas	0,135	0,120	0,116	0,161	0,119	0,148	0,129	0,133
Alameda das Primaveras	0,241	0,207	0,207	0,266	0,240	0,243	0,286	0,242
Alameda das Petúnias	0,006	0,00	0,005	0,006	0,006	0,004	0,004	0,006
Alameda das Violetas	0,062	0,04	0,052	0,121	0,055	0,057	0,073	0,067
Alameda das Camélias	0,254	0,120	0,125	0,155	0,150	0,126	0,162	0,156
Alameda das Tulipas	0,015	0,013	0,012	0,015	0,019	0,019	0,039	0,019
Alameda Lótus	0,035	0,023	0,032	0,032	0,029	0,027	0,026	0,029
Alameda das Hortências	0,007	0,005	0,371	0,015	0,008	0,008	0,004	0,060
Alameda dos Lírios	0,011	0,010	0,010	0,014	0,013	0,015	0,013	0,013
Alameda das Orquídeas	0,233	0,265	0,168	0,205	0,190	0,176	0,206	0,206
Av. comendador Costa	0,212	0,193	0,187	0,236	0,234	0,274	0,180	0,216
Alameda das Alamandas	0,211	0,193	0,192	0,242	0,206	0,267	0,296	0,229
TOTAL (L/s)	2,103	1,814	2,123	2,315	1,975	2,0459	2,120	2,071

A tabela 9 apresenta a média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Palmela, sendo a média final calculada para o bairro de 1,165 L/s.

Tabela 10 - Média do consumo de 7 meses para as ruas do bairro Palmela.

Meses Rua	Jun/14	Jul/14	Ago/14	Set/14	Out/14	Nov/14	Dez/14	Média 7 meses (L/s)
Jardim Nirvana	0,328	0,328	0,324	0,382	0,355	0,319	0,022	0,294
Vicente Guerra	0,145	0,116	0,140	0,136	0,144	0,149	0,129	0,137
Otávio Luiz Pereira	0,023	0,019	0,022	0,027	0,022	0,020	0,022	0,022
Estrada Pedra Preta	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,001	0,002
Sebastião Ribeiro da Silveira	0,219	0,193	0,194	0,212	0,201	0,257	0,355	0,233
Rod br 460	0,383	0,288	0,332	0,744	0,376	0,376	0,339	0,406
Rua da bomba	0,028	0,021	0,024	0,025	0,017	0,029	0,026	0,025
Sítio da Limeira	0,008	0,007	0,006	0,007	0,005	0,003	0,001	0,005
Rua Projetada	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Hélio Junqueira da Silva	0,048	0,037	0,039	0,032	0,027	0,035	0,034	0,036
TOTAL (L/s)	1,191	1,016	1,086	1,572	1,154	1,199	0,935	1,165

Por meio da média de consumo obtido para cada bairro (tabelas 7 a 9), é calculado o consumo médio total do setor de estudo (tabela 10), que equivale a 3,852 L/s.

Tabela 11 - Consumo médio dos bairros [L/s]

Bairros	Jun/14	Jul/14	Ago/14	Set/14	Out/14	Nov/14	Dez/14	Média (L/s)
Palmela	1,191	1,016	1,086	1,573	1,154	1,199	0,935	1,165
Morada da Serra	0,723	0,775	0,774	0,985	0,861	0,837	0,874	0,833
Vale dos Pinheiros	1,891	1,620	1,936	2,079	1,740	1,772	1,939	1,854
Consumo total do setor de estudo (L/s)	3,805	3,412	3,797	4,637	3,755	3,807	3,749	3,852

5.1.4. Patamares de pressão e vazão – campanha de madrugada

A tabela 11 apresenta os valores médios de pressão para cada um dos quatro patamares obtidos graficamente na campanha realizada de madrugada para a determinação dos coeficientes de vazamento.

Tabela 12 - Valor médio da pressão nos quatro patamares formados.

NÓ	LOGGER	VALOR MÉDIO PRESSÃO NO PATAMAR (mca)							
		1	Horário	2	Horário	3	Horário	4	Horário
87	01 (PV)	88,00	03:39- 03:51h	84,34	03:55 - 04:03h	80,79	04:07 - 04:13h	59,41	04:31 - 04:35h
112	02	65,27	03:39- 03:51h	61,63	03:55 - 04:03h	58,03	04:07 - 04:14h	37,08	04:31 - 04:34h
104	5	58,15	03:39- 03:52h	54,72	03:54 - 04:03h	51,21	04:06 - 04:14h	30,86	04:30 - 04:33h
105	6	84,21	03:39- 03:52h	80,68	03:55 - 04:03h	77,17	04:07 - 04:14h	56,52	04:31 - 04:34h
21	7	57,76	03:39- 03:52h	54,34	03:54 - 04:03h	50,65	04:06 - 04:15h	30,17	04:31 - 04:34h
113	8	86,42	03:39- 03:52h	82,99	03:54 - 04:03h	79,52	04:06 - 04:14h	58,9	04:30 - 04:33h
103	11	73,47	03:39- 03:52h	69,9	03:54 - 04:04h	66,52	04:07 - 04:14h	46,1	04:31 - 04:33h
85	13	70,42	03:39- 03:52h	66,98	03:55 - 04:03h	63,48	04:06 - 04:14h	43,1	04:31 - 04:33h
62	16	66,4	03:39- 03:52h	62,8	03:54 - 04:04h	59,48	04:06 - 04:14h	38,97	04:30 - 04:33h
115	19	45,22	03:39- 03:52h	41,79	03:54 - 04:03h	38,27	04:06 - 04:14h	20	04:31 - 04:35h
114	20	38,97	03:39- 03:52h	35,55	03:54 - 04:03h	32,17	04:05 - 04:14h	14,07	04:33 - 04:36h
	Vazão (L/s)	2,09	03:44- 03:52h	1,84	03:55 - 04:03h	1,73	04:06 - 04:14h	0,82	04:28 - 04:31h

Os valores de pressão obtidos dos quatro patamares formados para cada ponto de monitoramento são utilizados como dados de entrada dos passos 2 e 4 das rotinas 2 e 3 (rever figuras 41 e 42).

Três das doze curvas de pressão obtidas são apresentadas a seguir. Das doze curvas de pressão, onze apresentam comportamentos similares aos das figuras 75 e 76, com formação de 4 patamares de pressão. As demais curvas de pressão estão contidas no Anexo D.

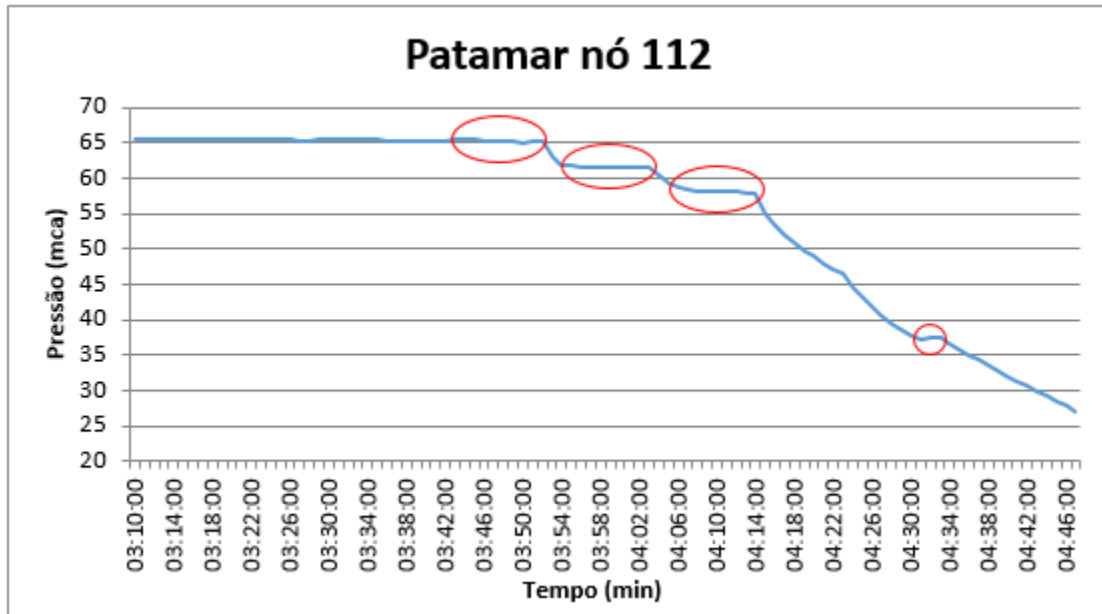


Figura 75 – Variação da pressão para as medições de madrugada para formação dos patamares do nó 112.

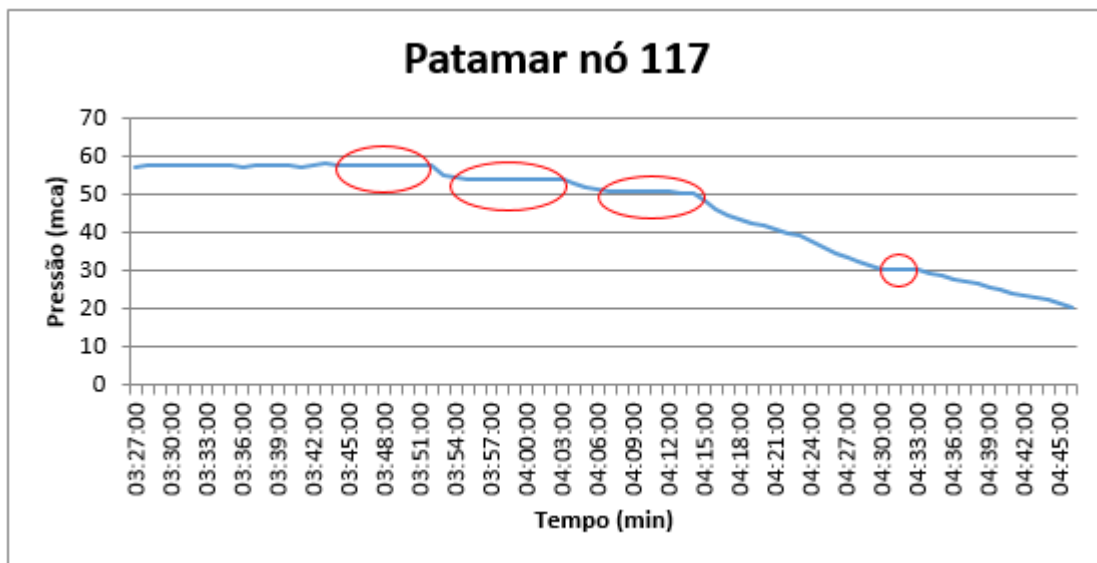


Figura 76 – Variação da pressão para as medições de madrugada para formação dos patamares do nó 117.

A curva de pressão que apresenta comportamento diferente é a do nó de monitoramento 14. Este nó está presente no ponto mais distante de monitoramento (rever figura 26), tendo, portanto, a possibilidade de dissipação de energia ao longo da rede e não formação dos patamares. Porém, a influência da manobra dos registros é registrada por meio de oscilações de valores de pressão demonstradas na figura 77.

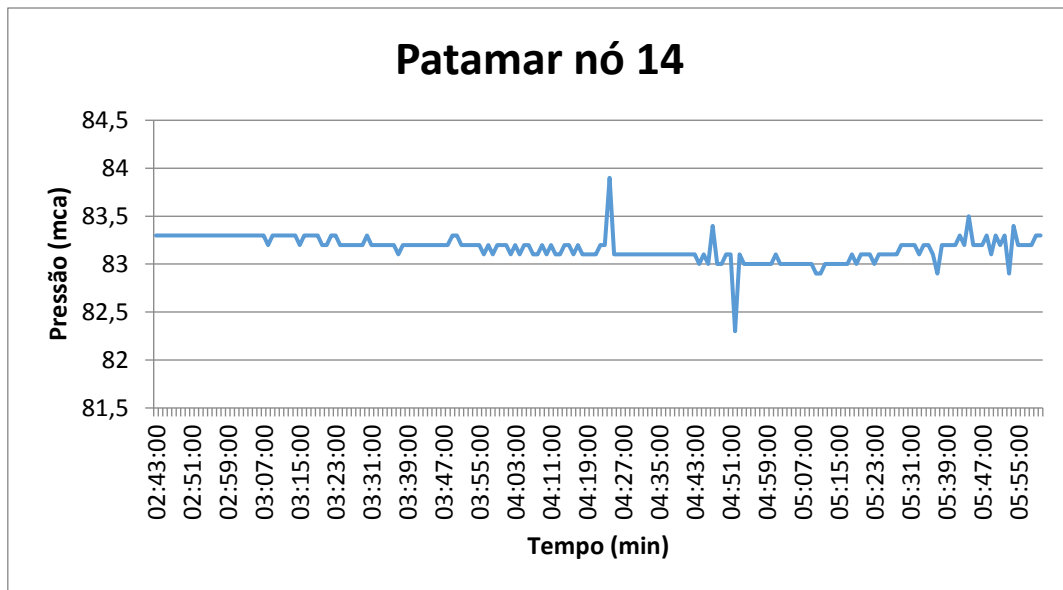


Figura 77 – Variação da pressão para as medições de madrugada para formação dos patamares do nó 14.

A figura 78 contém o formato das variações dos valores da vazão durante a madrugada. A formação dos patamares não é tão comportado quanto para os patamares de valores de pressão devido ao fato do valor de vazão neste período ser baixa, assim os patamares tem pouca diferença entre os valores médios de pressão. Porém, existe formação e equivale ao período em que se forma os patamares de pressão.

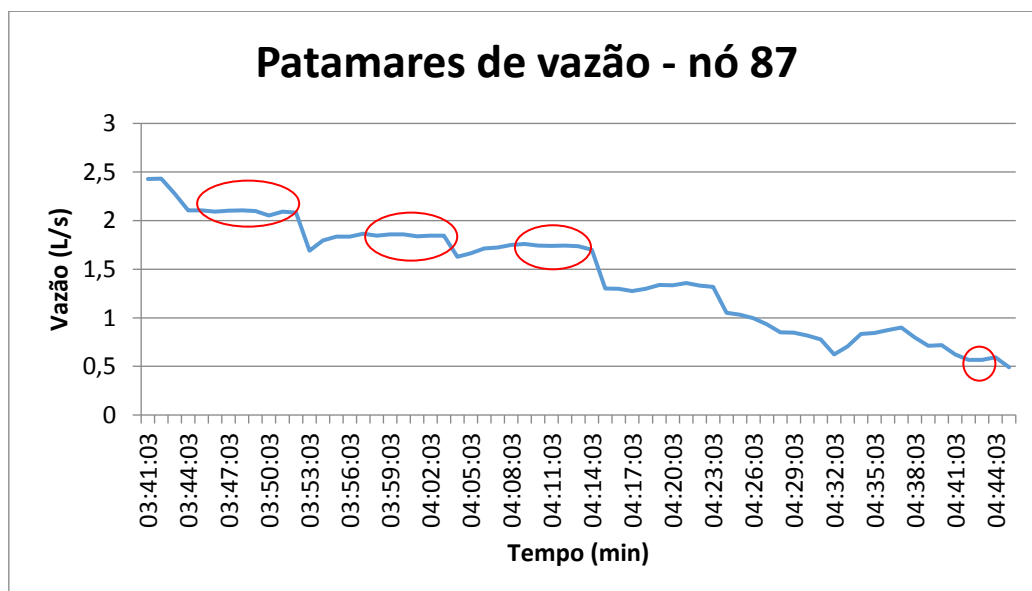


Figura 78 - Curva com a variação da vazão sucessivos fechamentos da válvula de controle.

5.2. Resultados computacionais

5.2.1. Coeficientes de vazamento C1 e N1

5.2.1.1. Rotina 2

As tabelas 12 a 16 apresentam a evolução dos valores dos coeficientes obtidos pela relação pressão e vazamento C1 e N1 durante o processo iterativo para cada sequência aleatória da rotina 2.

Tabela 13 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 1 – Rotina 2.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	16,390	0,9384	0,5137	1,9413	0,7815	5,7419	0,7170
2	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382
3	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382

Tabela 14 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 2 – Rotina 2.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382
2	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382

Tabela 15 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 3 – Rotina 2.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382
2	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382

Tabela 16 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 4 – Rotina 2.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382
2	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382

Tabela 17 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 5 – Rotina 2.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382
2	0,8735	1,8446	0,5156	6,0762	0,5098	7,0440	0,8382

Assim, a partir da sequência de simulações realizadas para a Rotina 2, como resultados finais dos coeficientes de vazamento C1 e N1 ao final do processo iterativo, foram obtidos os valores apresentados nas figuras 79 a 81.

Pode-se observar que os valores finais de convergência de C1 e N1 para cada combinação aleatória não apresentam variação para a Rotina 2, o que demonstra a estabilidade nos cálculos do programa.

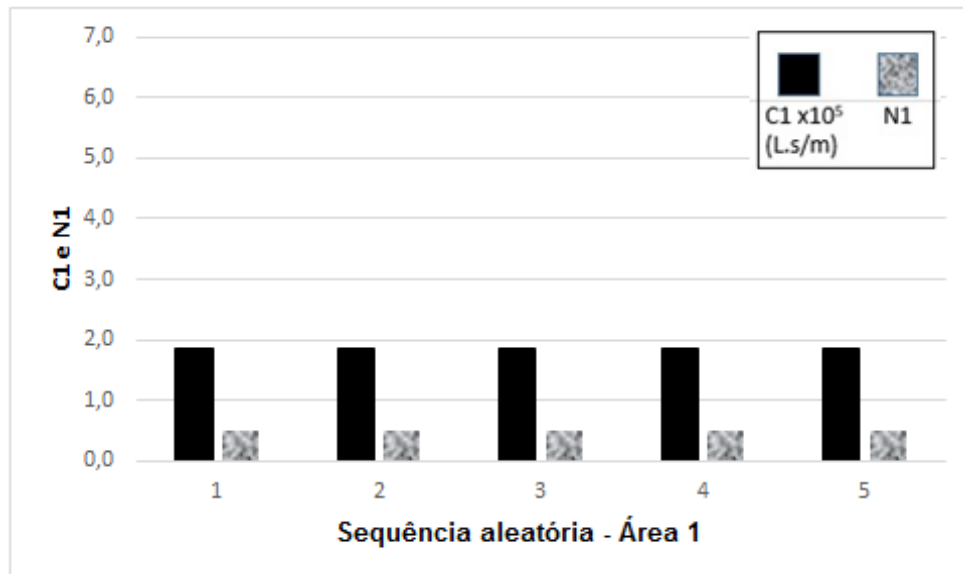


Figura 79 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 2 - Área 1

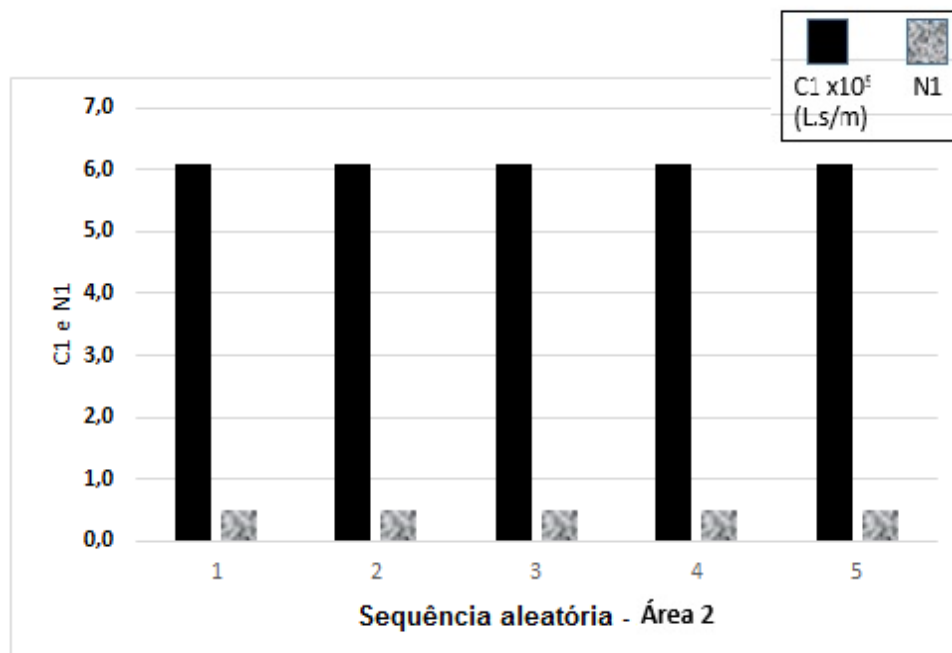


Figura 80 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 2 - Área 2

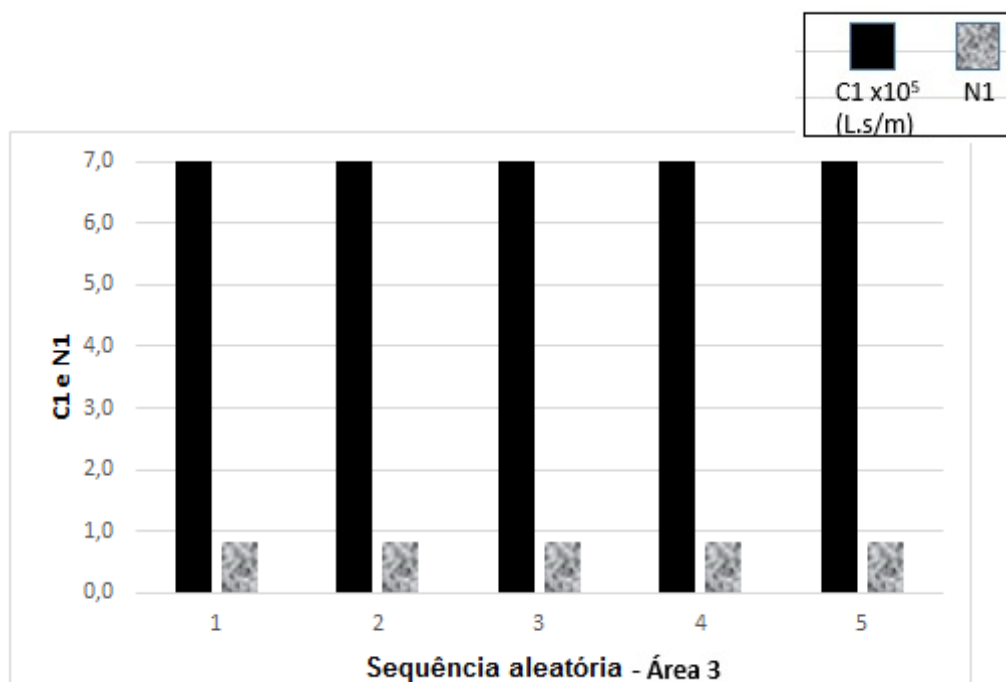


Figura 81 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 2 - Área 3

5.2.1.2. Rotina 3

A evolução dos valores dos coeficientes obtidos pela relação pressão e vazamento C1 e N1 ao longo do processo iterativo para cada sequência aleatória da rotina 3 é apresentada nas tabelas 17 a 21.

Tabela 18 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 1 – Rotina 3.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	30,207	1,4399	0,4804	1,2815	0,6505	1,3255	1,0982
2	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863
3	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863

Tabela 19 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 2 – Rotina 3.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	30,207	1,4399	0,4804	1,2815	0,6505	1,3255	1,0982
2	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863
3	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863

Tabela 20 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 3 – Rotina 3.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	30,207	1,4399	0,4804	1,2815	0,6505	1,3255	1,0982
2	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863
3	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863

Tabela 21 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 4 – Rotina 3.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	30,207	1,4399	0,4804	1,2815	0,6505	1,3255	1,0982
2	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863
3	0,686	2,2520	0,4961	1,7478	0,9809	4,5191	0,4863

Tabela 22 - Evolução de C1 e N1 ao longo do processo iterativo – Sequência aleatória 5 – Rotina 3.

Processo iterativo	FO	Área 1		Área 2		Área 3	
		C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1	C1 x10 ⁵ (L.s/m)	N1
1	29,761	1,0440	0,5137	5,1789	0,7209	4,3871	0,5137
2	30,276	1,4399	0,4804	1,2815	0,6505	1,3255	1,0982
3	30,292	1,4399	0,4804	1,2815	0,6505	1,3255	1,0982

A mesma metodologia foi aplicada para a análise dos resultados dos coeficientes de vazamento C1 e N1 para a Rotina 3, sendo os valores apresentados nas figuras 82 a 84.

Na rotina 3, os valores finais de convergência de C1 e N1 para as cinco sequências aleatórias foram os mesmos. Como critério de parada repetiu-se os passos da rotina 3 até que C1 e N1 ficasse constante em relação aos últimos resultados. A última sequência aleatória (Tabela 20) convergiu para um valor diferente das demais.

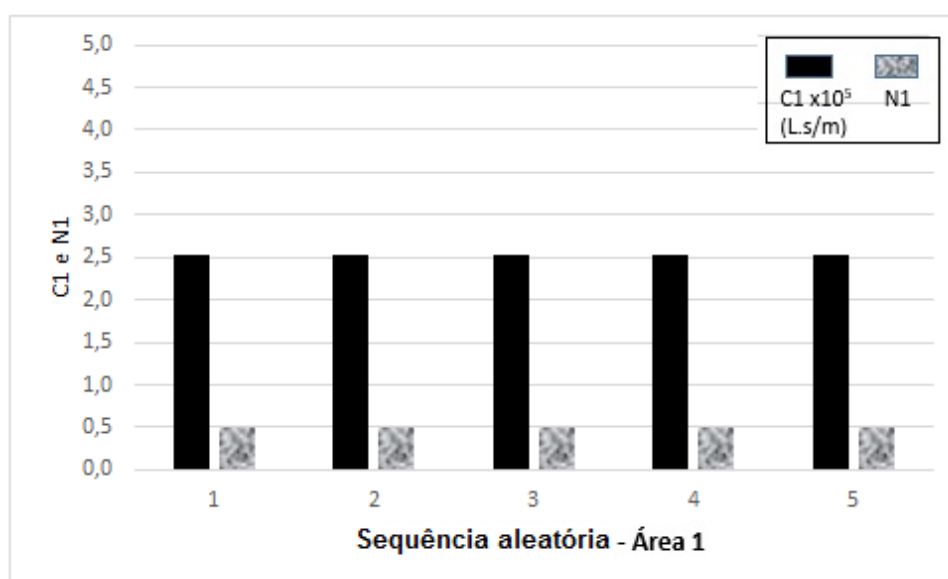


Figura 82 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 3 - Área 1.

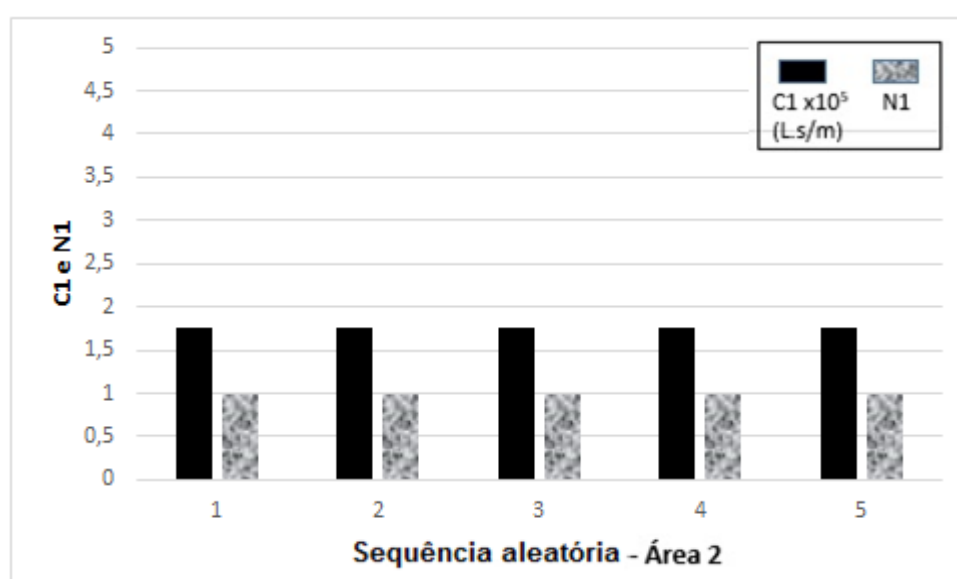


Figura 83 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias - Rotina 3 - Área 2

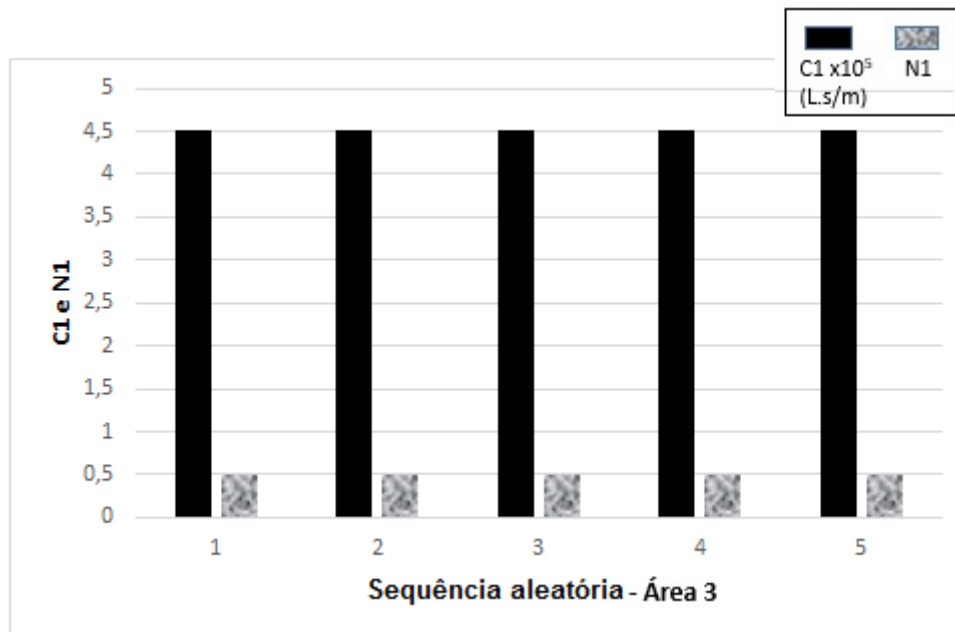


Figura 84 - Valores de C1 e N1 finais para todas as sequências aleatórias – Rotina 3 - Área 3.

5.2.2. Ajuste das vazões

5.2.3.1. Resultados obtidos para a Rotina 1 – Programa Silva, B. (2003)

O melhor ajuste ocorre para o padrão 3 de consumo é demonstrado pelos resultados da figura 85. Isto ocorre porque a rotina 1 ajusta melhor em período de padrão estático (madrugada), em que quase não existe variação de vazão devido ao consumo baixo (atividades durante a madrugada eventuais) ou praticamente inexistentes (existe pequeno valor relacionado a vazamentos).

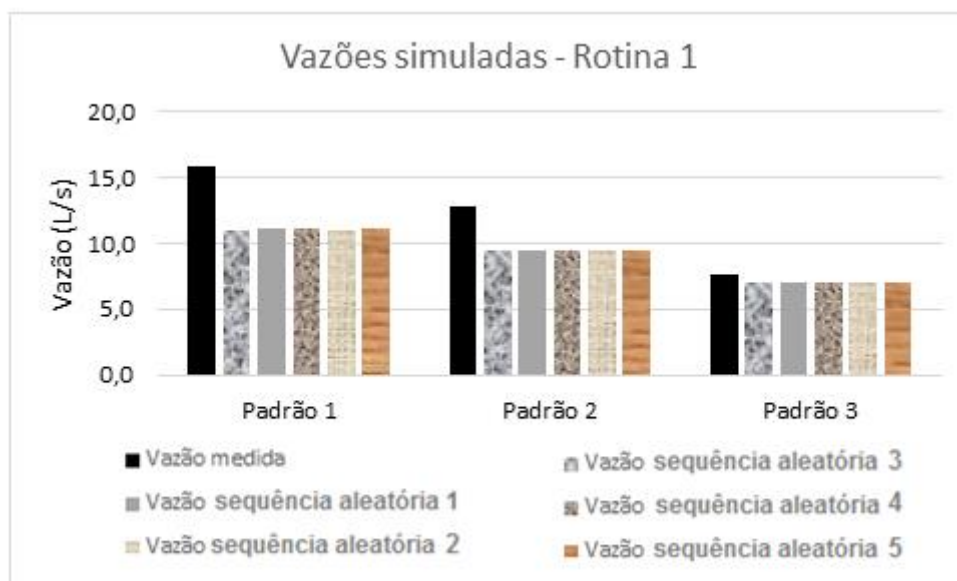


Figura 85 - Comparação entre os valores de ajuste de vazão para as cinco combinações aleatórias em cada padrão de consumo - Rotina 1

Na tabela 22 confirma-se este melhor ajuste para o padrão 3 de consumo, com melhor ajuste na sequência aleatória 2 (92,46%). No padrão 1 o melhor ajuste ocorre para a sequência aleatória 3 (70,03%) e no padrão 2 ocorre para a quinta sequência aleatória (74,25%). Assim, não consta-se uma sequência aleatória específica que forneça melhores resultados.

Tabela 23 - Porcentagem de calibração da vazão simulada para cada semente em relação à vazão medida (real) para a rotina 1 - Programa de Silva, B. (2003).

Padrões de consumo	Vazão medida (L/s)	Porcentagem de ajuste da vazão simulada para cada sequência aleatória (%)				
		1	2	3	4	5
1	15,87	69,50	69,82	70,03	69,49	69,96
2	12,77	73,68	74,22	74,13	73,65	74,25
3	7,66	91,09	92,46	91,32	90,74	92,05

5.2.3.2. Comparação dos resultados de vazão obtidos para o programa Silva, B. (2003) nas rotinas 2 e 3.

As vazões tiveram melhorias no ajuste para o programa Silva, B. (2003) tanto na rotina 2 (figura 86) quanto na rotina 3 (figura 87) em relação à rotina 1 (figura 85). Pode-se concluir que a rotina 2 fornece melhor ajuste para o padrão 1.

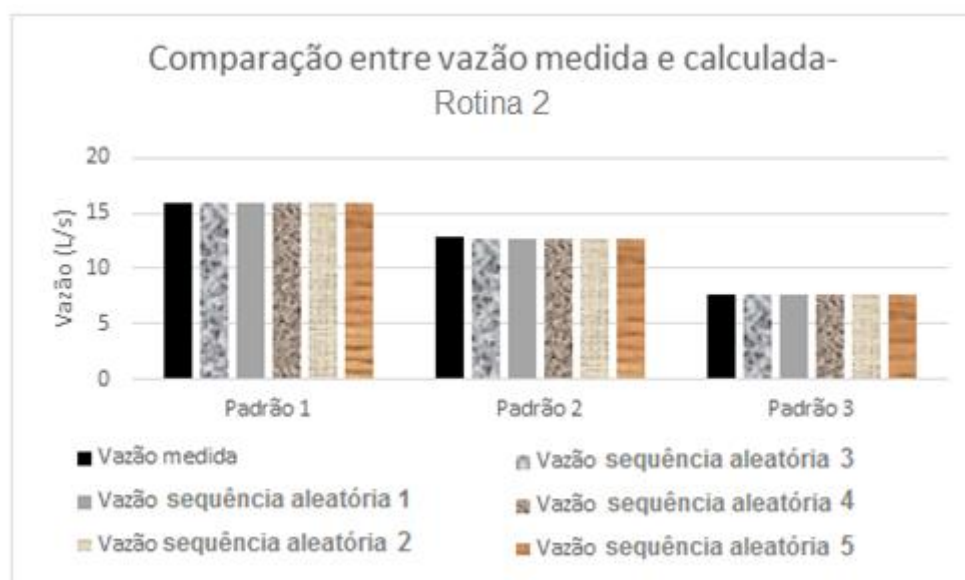


Figura 86 - Comparação entre os valores de ajuste de vazão para as cinco sementes em cada padrão de consumo - Rotina 2 do Programa Silva, B. (2003).

A tabela 23 apresenta a porcentagem de calibração da vazão – PCV (equação 7) para cada combinação aleatória da rotina 2 – Silva, B. (2003).

$$PCV = \frac{\text{Vazão simulada}}{\text{vazão real}} * 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Tabela 24 - Porcentagem de calibração da vazão simulada para cada semente em relação à vazão medida (real) para a Rotina 2 do programa de Silva, B. (2003).

Padrões de consumo	Vazão medida (L/s)	Porcentagem de ajuste da vazão simulada para cada sequência aleatória (%)				
		1	2	3	4	5
1	15,87	99,94	99,94	99,94	99,94	99,94
2	12,77	99,93	99,93	99,93	99,93	99,93
3	7,66	99,86	99,86	99,86	99,86	99,86

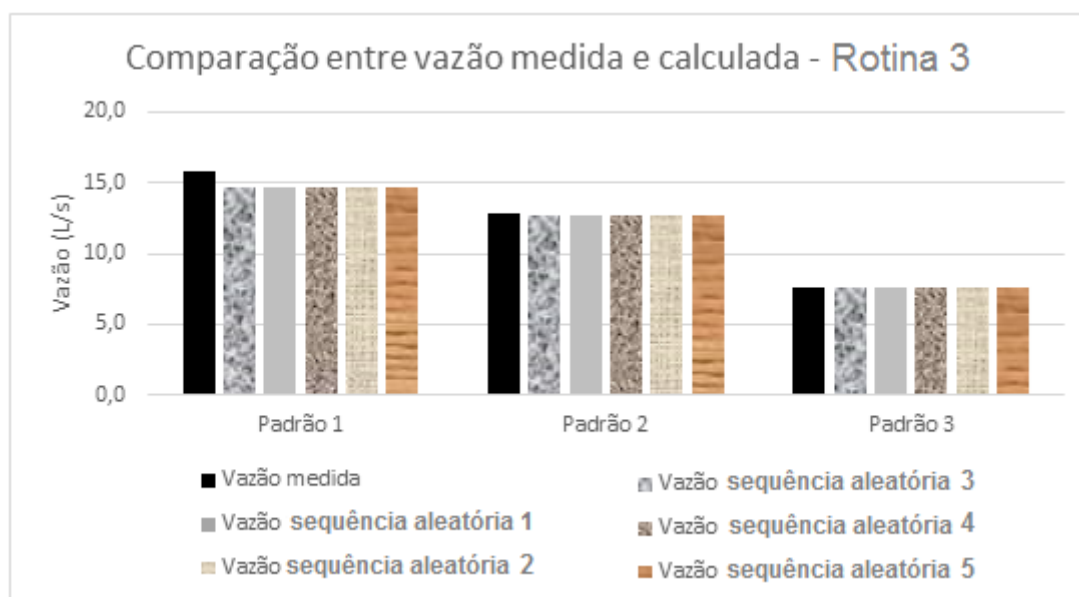


Figura 87 - Comparação entre os valores de ajuste de vazão para as cinco seqüências aleatórias em cada padrão de consumo - Rotina 3 do Programa Silva, B. (2003).

A tabela 24 apresenta a porcentagem de calibração da vazão para cada combinação aleatória da Rotina 3 – Silva, B. (2003).

Tabela 25 - Porcentagem de calibração da vazão simulada para cada seqüência aleatória em relação à vazão medida (real) para a Rotina 3 - Programa de Silva, B. (2003).

Padrões de consumo	Vazão medida (L/s)	Porcentagem de ajuste da vazão simulada para cada seqüência aleatória (%)				
		1	2	3	4	5
1	15,87	92,44	92,44	92,44	92,44	92,44
2	12,77	99,75	99,75	99,75	99,75	99,75
3	7,66	99,71	99,71	99,71	99,71	99,71

5.2.2.3. Conclusões referentes ao ajuste da vazão

Ao comparar a porcentagem de ajuste entre a vazão simulada e a vazão real (equação 7) obtidas por Silva, B. (2003) para a rotina 1 (C1 e N1 fixos) com os valores da porcentagem de ajuste para as vazões simuladas nas rotinas 2 e 3 (onde programa ajusta C1 e N1 por zonas de pressão), pode-se observar por meio das figuras 88 a 90 que, conforme esperado, os resultados para rotinas 2 e 3 apresentam significativa melhora em relação a Rotina 1.

No padrão 1 de consumo (figura 88), os resultados de ajuste de vazão obtiveram melhoria em relação a rotina 1 de até 30,45% para a rotina 2 e 22,95% para a rotina 3.

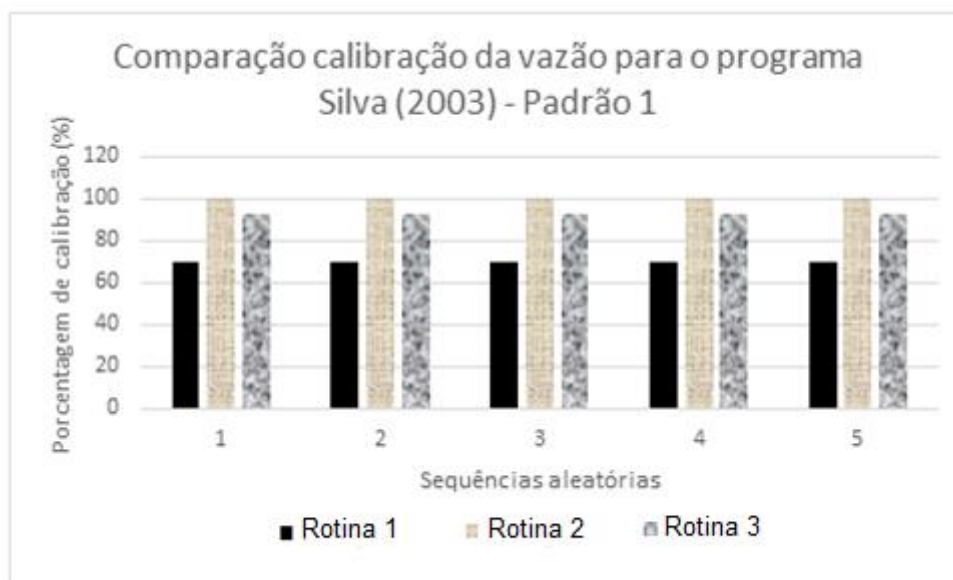


Figura 88 - Porcentagem de calibração da vazão para o programa Silva, B. (2003) nas 3 rotinas para o padrão 1 de consumo.

Para o padrão 2 de consumo (figura 89), os resultados de ajuste de vazão obtiveram melhoria em relação a rotina 1 de até 26,28% para o rotina 2 e 26,10% para a rotina 3.

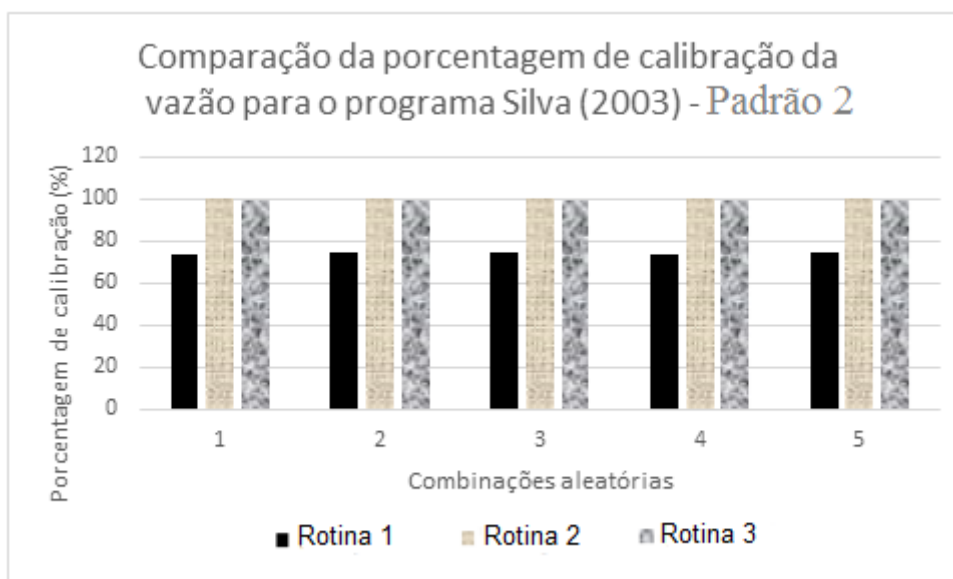


Figura 89 - Porcentagem de calibração da vazão para o programa Silva, B. (2003) nas 3 rotinas para o padrão 2 de consumo.

E no padrão 3 de consumo (figura 90), os resultados de ajuste de vazão obtiveram melhoria em relação a rotina 1 de até 9,12% para a rotina 2 e 8,97% para a rotina 3.

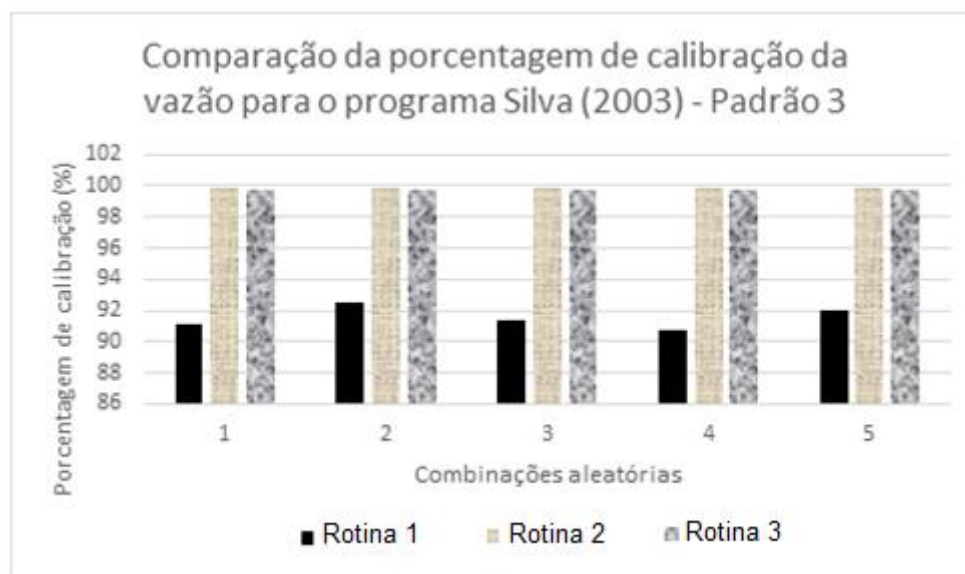


Figura 90 - Porcentagem de calibração da vazão para o programa Silva, B. (2003) nas 3 rotinas para o padrão 3 de consumo.

Assim, nota-se que além de terem ocorrido melhorias na calibração da vazão por meio do uso do programa Silva, B. (2003) em relação à rotina 1, esta aproximação em relação ao valor real de vazão   maior para o padrão 1 de consumo na rotina 2 e no padrão 2 de consumo na rotina 3.

Comparando as rotinas 2 e 3, ainda pode-se observar que a rotina 2 fornece resultado de ajuste de vazão melhores que a rotina 3. Uma hipótese que pode explicar esta diferenç a   que no passo 1 da simulação da rotina 2, a demanda de água é calculada com base em dados reais e, na rotina 3, a demanda é gerada aleatoriamente.

5.2.4. Escolha do número de gerações

O número de gerações escolhido para as simulações nas três rotinas foi de 200 gerações. A figura 91 mostra uma curva t pica de evolução da função de aptidão ao longo das iterações de AG obtida por Silva, B. (2003). Conforme pode-se observar, a partir das 200 gerações a evolução da função de aptidão   pequena em relação as primeiras 200 gerações.

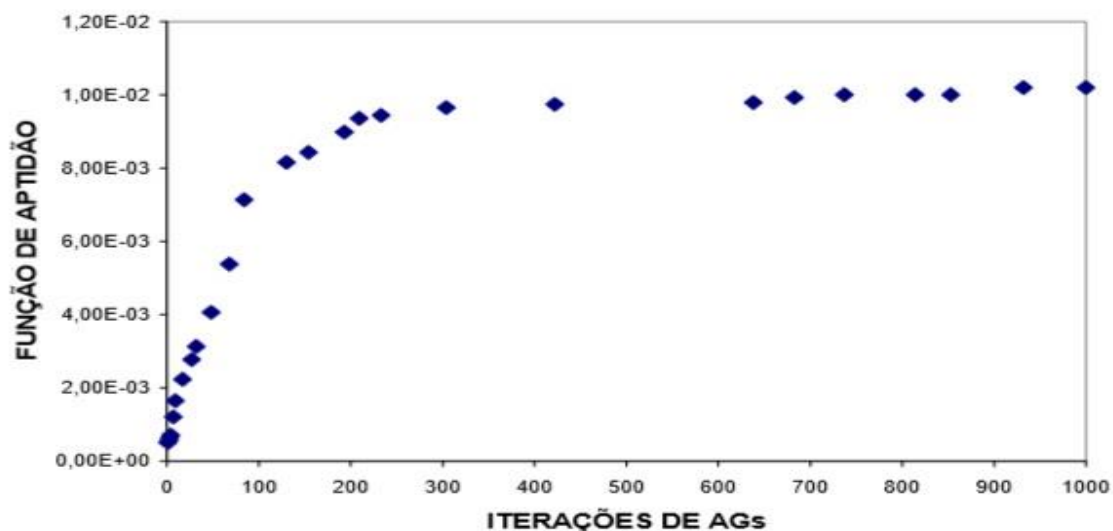


Figura 91 - Formato geral da evolução da função de aptidão ao longo do processo iterativo.
Fonte: Silva, B. (2003)

A fim de comprovar que a diferença entre os resultados obtidos para 200 gerações e 500 gerações não é tão significativa, foi realizada uma simulação com 500 gerações e os resultados são apresentados a seguir.

No padrão 1 (tabela 27), a diferença entre os ajustes variam entre 0,01% a 0,69%.

Tabela 26 - Comparação entre os resultados de ajuste dos valores de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 1.

PADRÃO 1					
NÓ	Pressão			Ajuste (%)	
	Real	200G	500G	200G	500G
114	23,2	17,4	17,56	75,00	75,69
105	72,2	78,35	78,37	92,15	92,13
14	82,06	71,03	71,08	86,56	86,62
51	37,76	32,11	32,09	85,04	84,98
111	78,2	78,79	78,78	99,25	99,26
109	64,5	67,76	67,75	95,19	95,20
116	34,68	33,41	33,4	96,34	96,31
112	57,6	55,66	55,65	96,63	96,61
103	49,9	58,3	58,03	85,59	85,99
117	34,1	39,65	39,88	86,00	85,51
113	64,7	68,46	68,23	94,51	94,83
62	45,3	50,56	50,5	89,60	89,70
85	49,1	44,88	45,04	91,41	91,73
108	42,7	51,09	51,06	83,58	83,63
115	27,8	23,66	23,82	85,11	85,68

A figura 92 traz a comparação entre os resultados de ajuste para 200 e 500 gerações no padrão 1 de consumo.

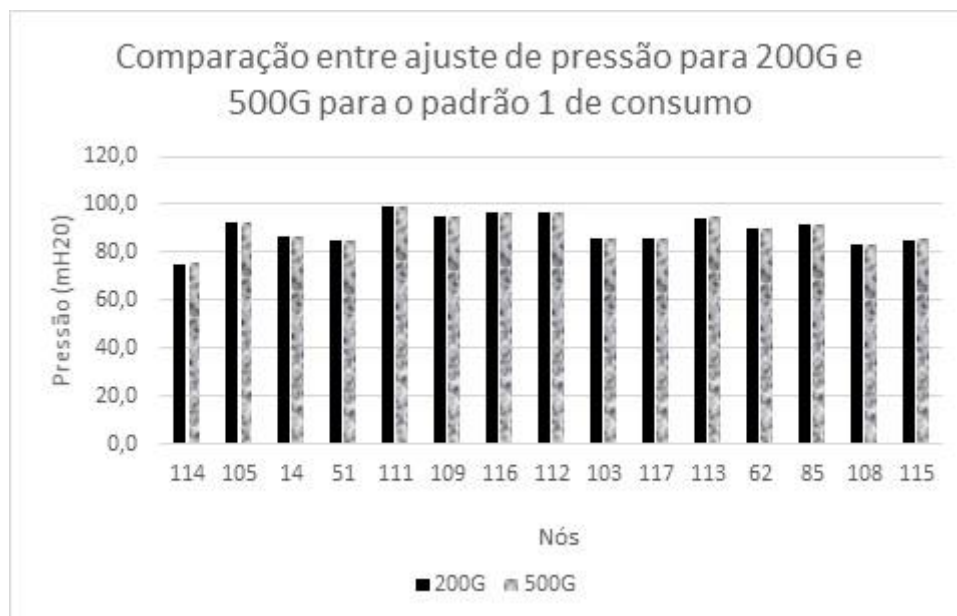


Figura 92 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 1

No padrão 2 (tabela 28), a diferença entre os ajustes variam entre 0,01% a 0,31%.

Tabela 27 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 2.

PADRÃO 2					
NÓ	PRESSÃO			% Ajuste	
	REAL	200G	500G	200G	500G
114	37,5	24,78	24,86	66,08	66,29
105	77,86	81,61	81,63	95,40	95,38
14	82,4	75,78	75,83	91,97	92,03
51	41,94	36,36	36,33	86,70	86,62
111	83,27	83,83	83,81	99,33	99,36
109	71,9	71,68	71,67	99,69	99,68
116	37,02	37,12	37,11	99,73	99,76
112	61	59,54	59,53	97,61	97,59
103	61,1	64,69	64,51	94,45	94,71
117	44,2	46,25	46,4	95,57	95,26
113	75,6	74,81	74,66	98,96	98,76
62	55,3	56,53	56,46	97,82	97,95
85	59,6	52,27	52,35	87,70	87,84
108	52,7	57,12	57,07	92,26	92,34
115	42,1	31,04	31,13	73,73	73,94

A figura 93 apresenta a comparação entre os resultados de ajuste para 200 e 500 gerações no padrão 2 de consumo.

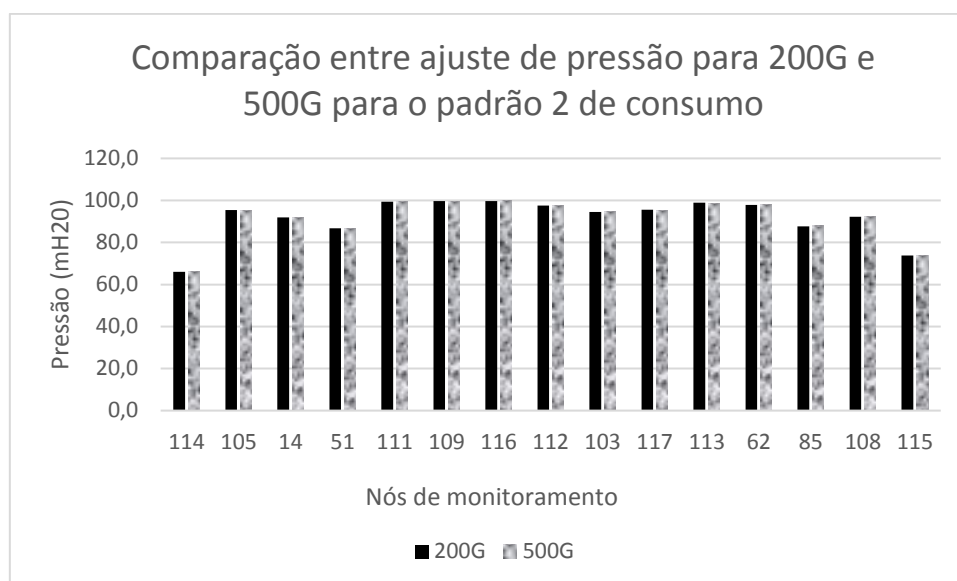


Figura 93 - Compara o entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gera es no padrão 2.

No padrão 3 (tabela 29), a diferença entre os ajustes para varia entre 0,01% a 0,13%.

Tabela 28 - Compara o entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gera es no padrão 3.

PADRÃO 3					
NÃO	PRESSÃO			% Ajuste	
	REAL	200G	500G	200G	500G
114	39,8	34,62	34,57	86,98	86,86
105	85,85	86,07	86,08	99,74	99,73
14	83,08	81,93	81,98	98,62	98,68
51	48,05	42,05	42,03	87,51	87,47
111	91,3	90,53	90,5	99,16	99,12
109	78,5	76,96	76,95	98,04	98,03
116	42,59	42,16	42,15	98,99	98,97
112	64,5	64,77	64,76	99,58	99,60
103	72,3	73,01	72,93	99,03	99,14
117	55,4	54,83	54,86	98,97	99,03
113	85,8	83,1	83,03	96,85	96,77
62	66,3	64,41	64,33	97,15	97,03
85	70,5	62,12	62,07	88,11	88,04
108	65,8	65,09	65,02	98,92	98,81
115	44,7	40,89	40,84	91,48	91,36

A figura 94 demonstra a comparação entre os resultados de ajuste para 200 e 500 gerações no padrão 3 de consumo.

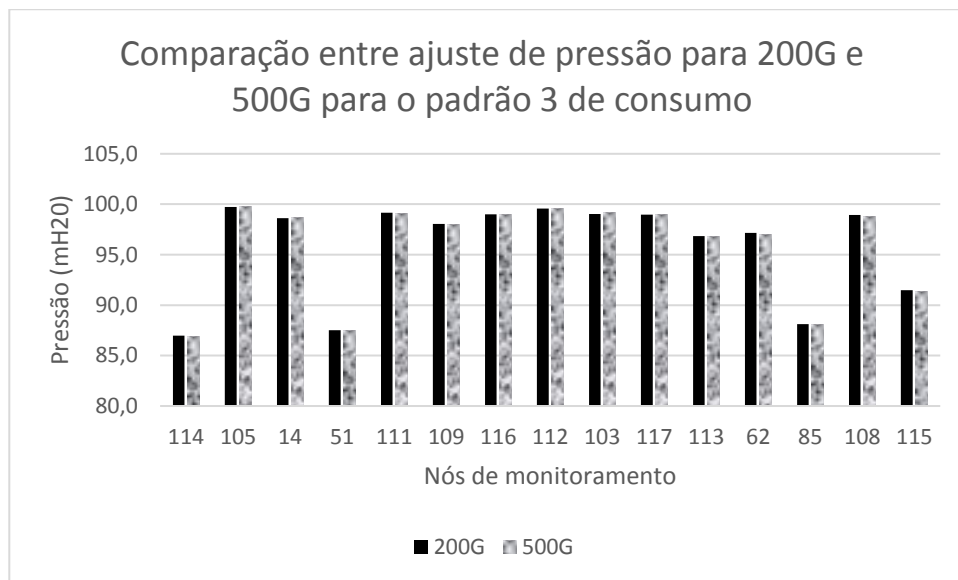


Figura 94 - Comparação entre os resultados de ajuste de pressão obtidos para 200 e 500 gerações no padrão 3.

5.2.5. Resultados para função de aptidão

Os formatos da evolução da função de aptidão ao longo do processo iterativo para as três rotinas realizadas são apresentados nas figuras 95 a 109.

- ROTINA 1: Para esta rotina ocorre variação na forma como os valores da função de aptidão variam com o processo iterativo. A sequência aleatória 1 (figura 95) convergiu para $3,06 \times 10^{-3}$ e as demais sementes convergiram para $3,2 \times 10^{-3}$. Assim, independente da evolução, quatro das cinco sequências aleatórias convergem para o mesmo valor, sendo que a primeira sequência aleatória converge para um valor muito próximo. A sequência aleatória na qual a convergência se dá de forma mais rápida é a 4 (figura 98).

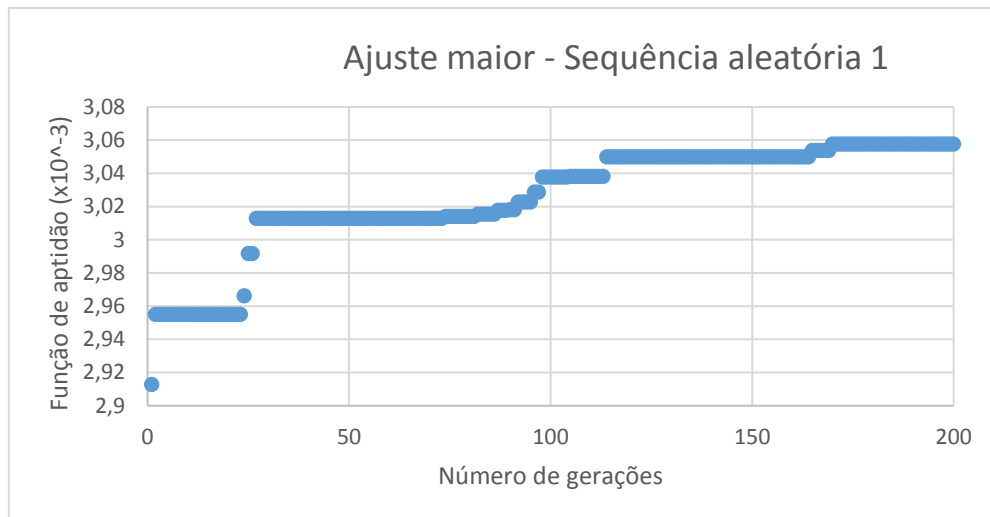


Figura 95 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 1.

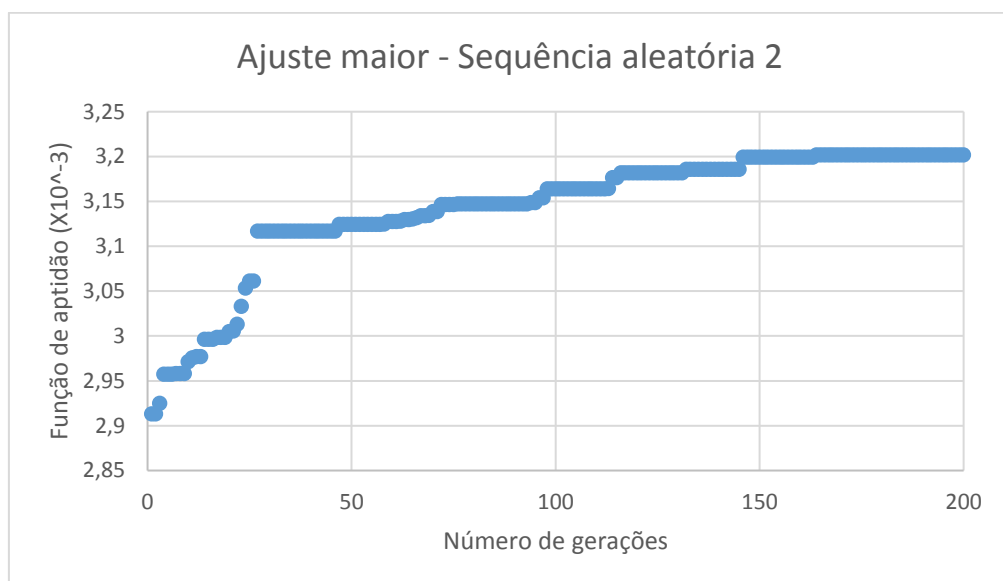


Figura 96 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 2.

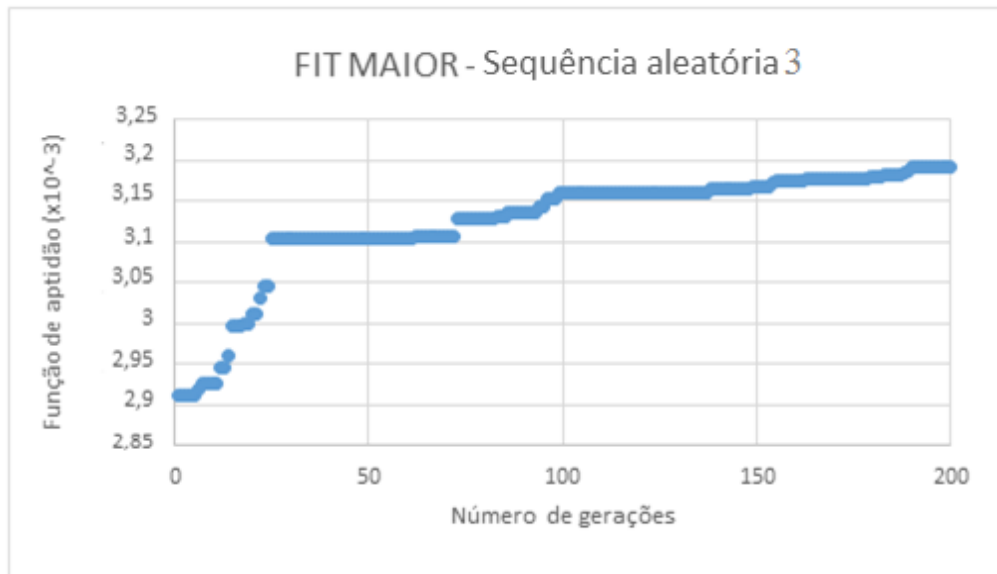


Figura 97 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 3.

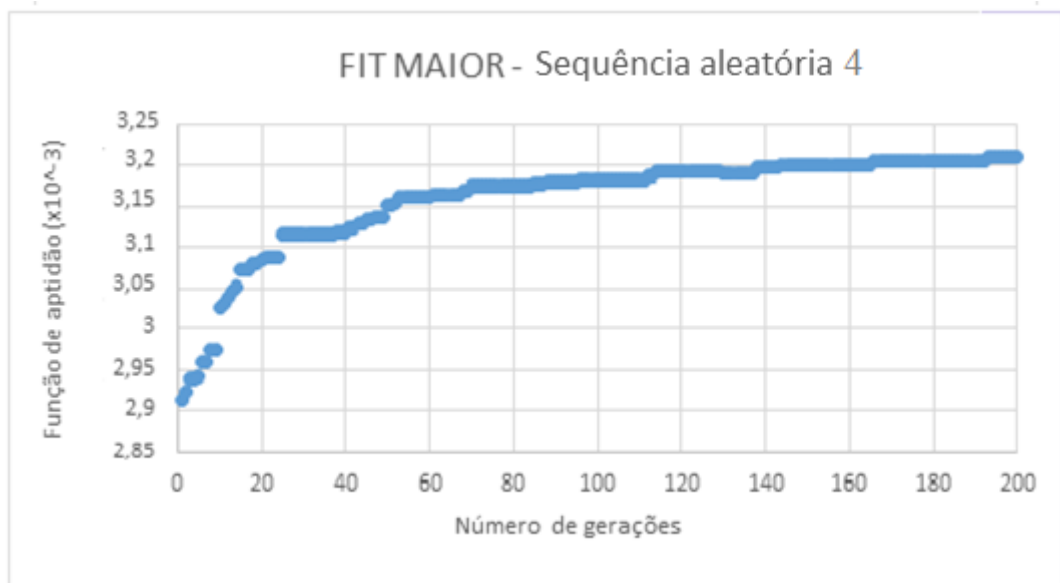


Figura 98 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 4.

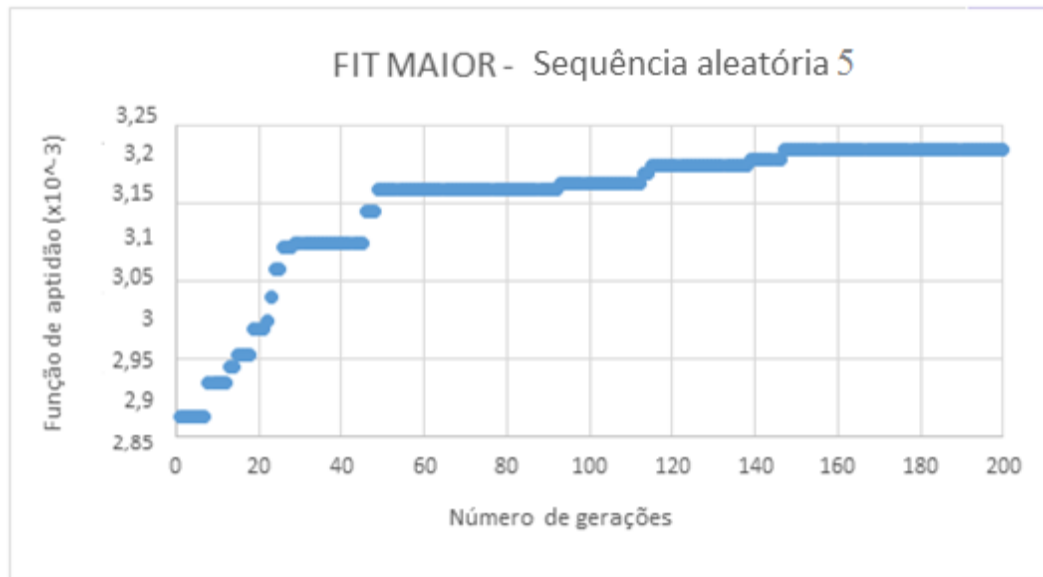


Figura 99 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 1 – Sequência aleatória 5.

- **ROTINA 2:** Observando as evoluções do Ajuste maior para a rotina 2 (figuras 100 a 104), conclui-se que independente da combinação aleatória considerada, ambas seguiram o mesmo caminho de cálculo, tendo como valor de convergência o valor de $1,6813 \times 10^{-4}$.

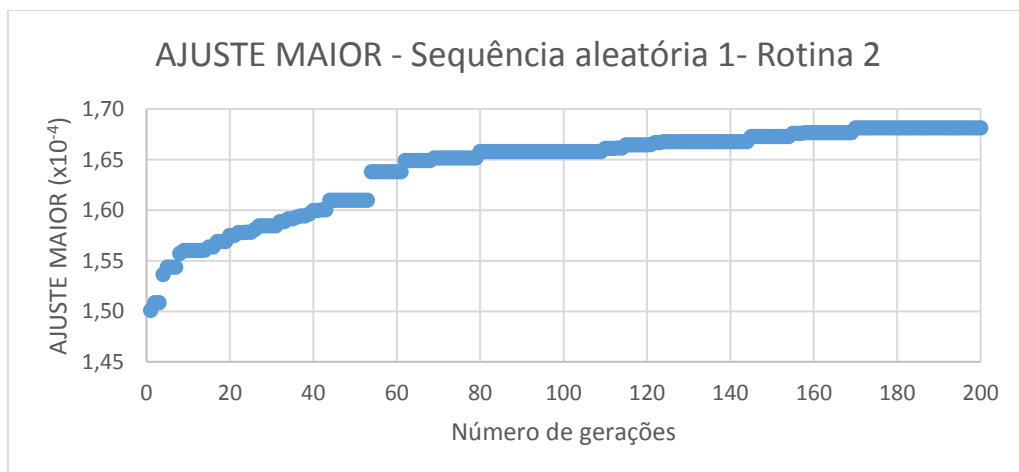


Figura 100 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 1.

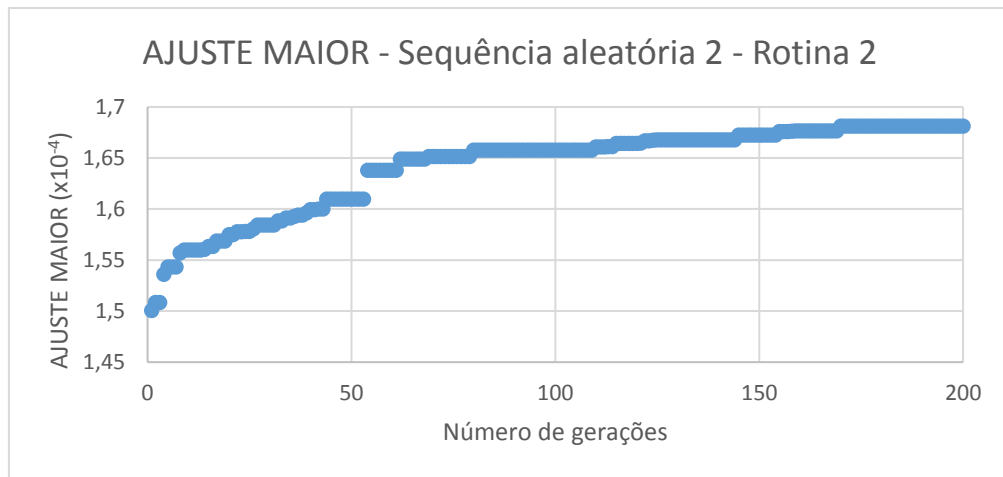


Figura 101 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 2.

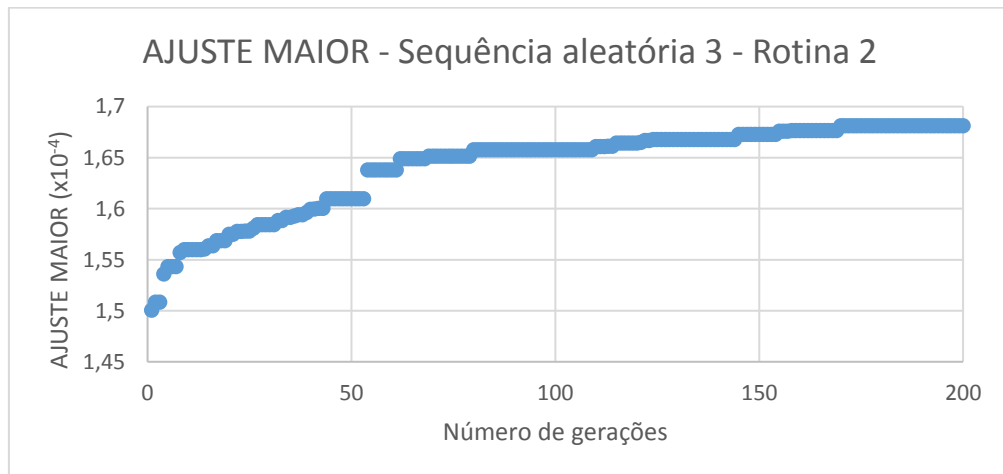


Figura 102 - - Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 3.

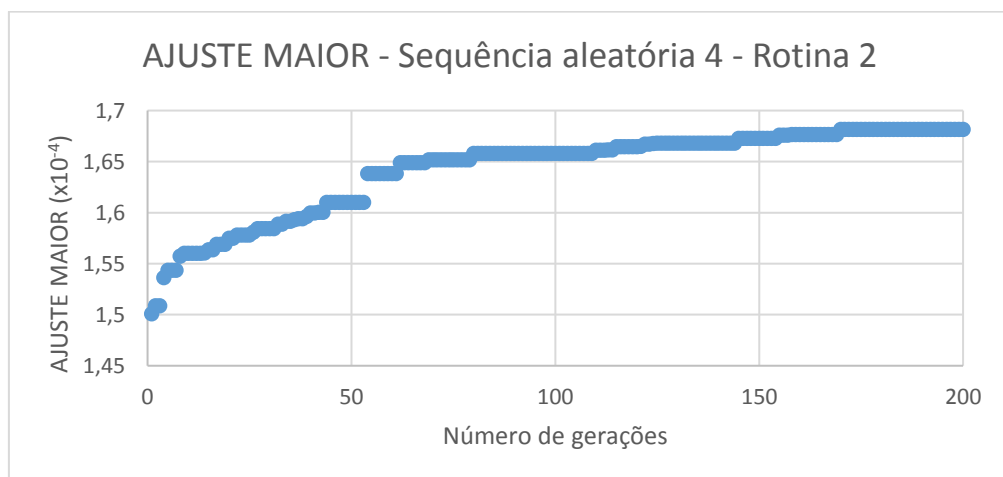


Figura 103 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 4.

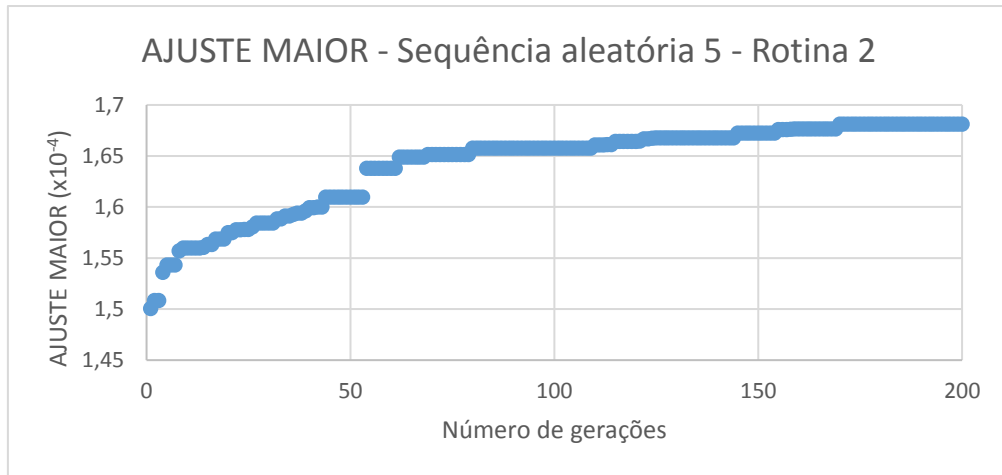


Figura 104 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 2 – Sequência aleatória 5.

- **ROTINA 3:** Observando a evolução dos Ajuste maior para a rotina 3 (figuras 105 a 109), conclui-se que independente da combinação aleatória considerada, as sequências aleatórias 1 a 4 seguiram o mesmo caminho de cálculo, tendo como maior AJUSTE MAIOR o valor de $1,0823 \times 10^{-4}$. A sequência aleatória 5 teve evolução diferente do cálculo ao longo das gerações, convergindo para $0,8782 \times 10^{-4}$.

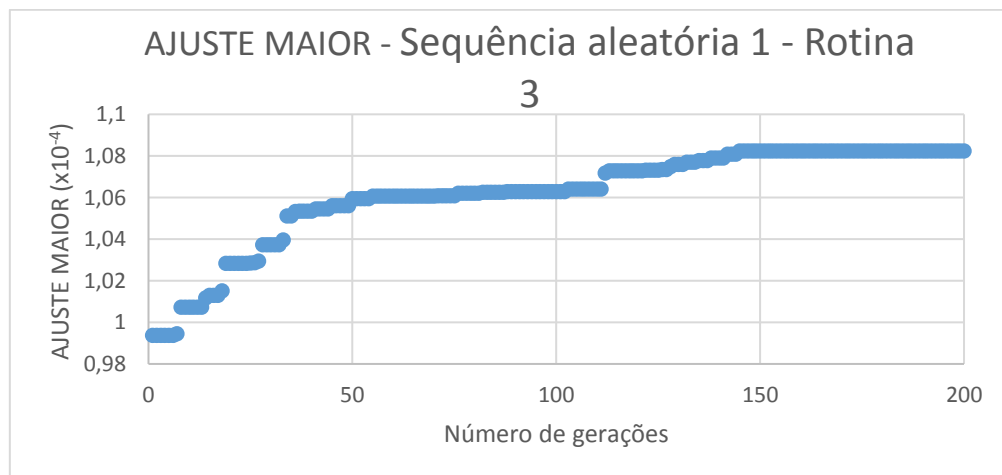


Figura 105- Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 1.

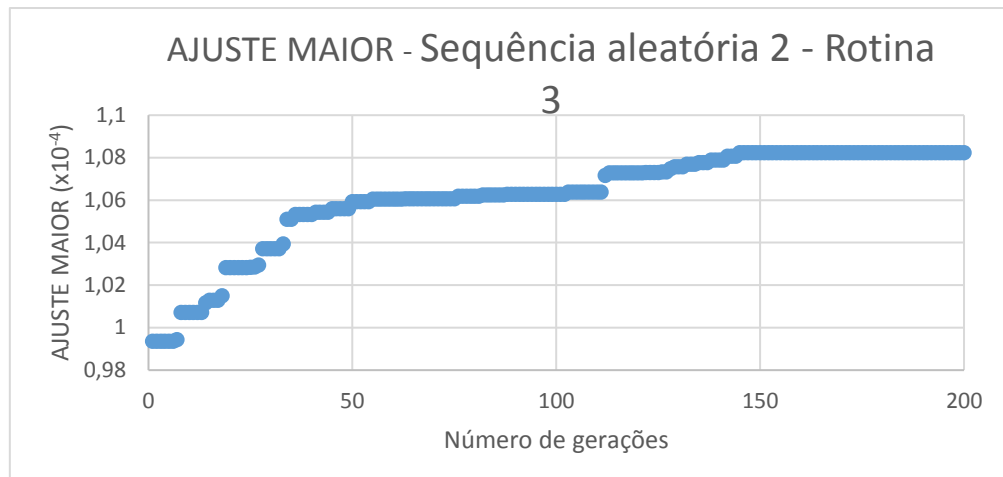


Figura 106 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 2.

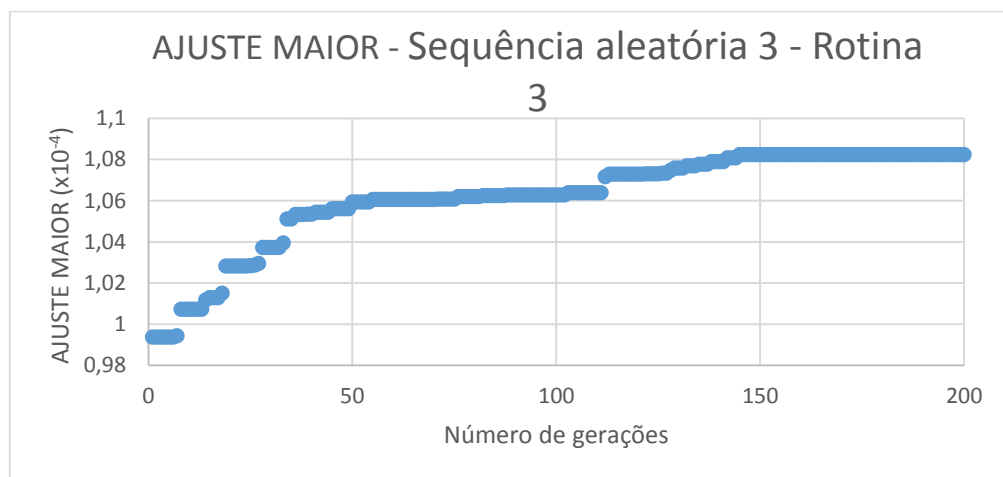


Figura 107 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 3.

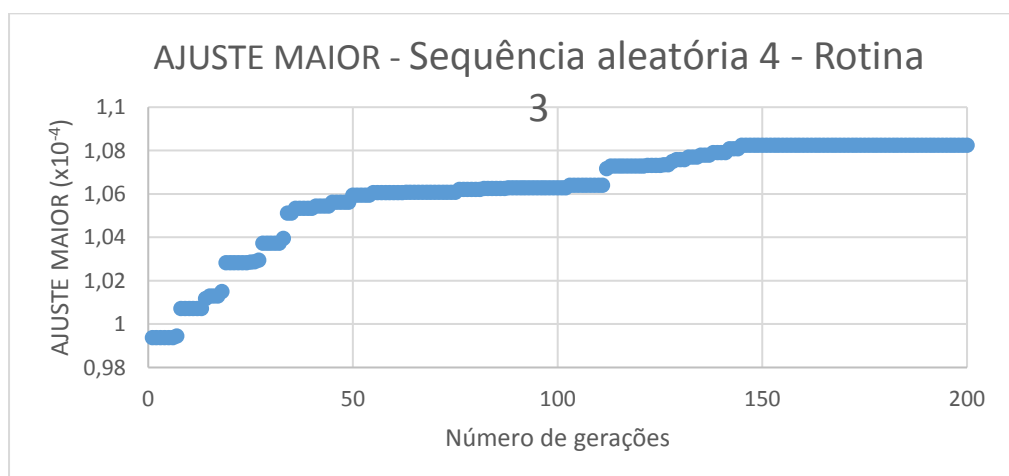


Figura 108 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 4.

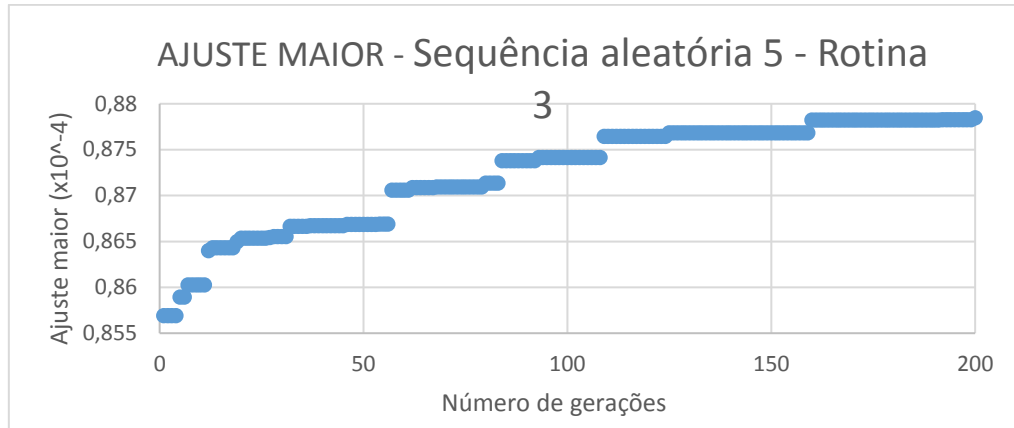


Figura 109 – Evolução do Ajuste maior da Rotina 3 – Sequência aleatória 5.

5.2.6. Pressões

A fim de analisar os resultados obtidos pela calibração dos valores da pressão, as simulações oriundas das rotinas 2 e 3 são comparados com os resultados da rotina 1. Assim, pode-se analisar se houveram melhorias nos resultados em relação à primeira rotina devido aos coeficientes de vazamento C1 e N1 que nas rotinas 2 e 3 são calibrados por zonas de pressão.

5.2.6.1. Nós em que o coeficiente de vazamento melhorou os resultados

Em análise geral, dos 15 pontos de monitoramento, 12 apresentaram melhorias na calibração para as rotinas 2 e 3 em relação à rotina 1, sendo que os nós com melhorias foram: 14, 51, 62, 85, 103, 109, 111, 112, 114, 115, 116 e 117. Para a análise mais detalhada dos resultados de pressão para cada padrão de consumo nos 12 nós, escolhe-se a sequência aleatória 1.

Na pressão simulada para o nó 14 (figura 110), os resultados para as rotinas 2 e 3 são melhores que o da rotina 1 para os três padrões de consumo. O melhor ajuste ocorre no padrão 3 de consumo, com 99,15% de ajuste para a rotina 3 e 98,61% de ajuste para a rotina 2.

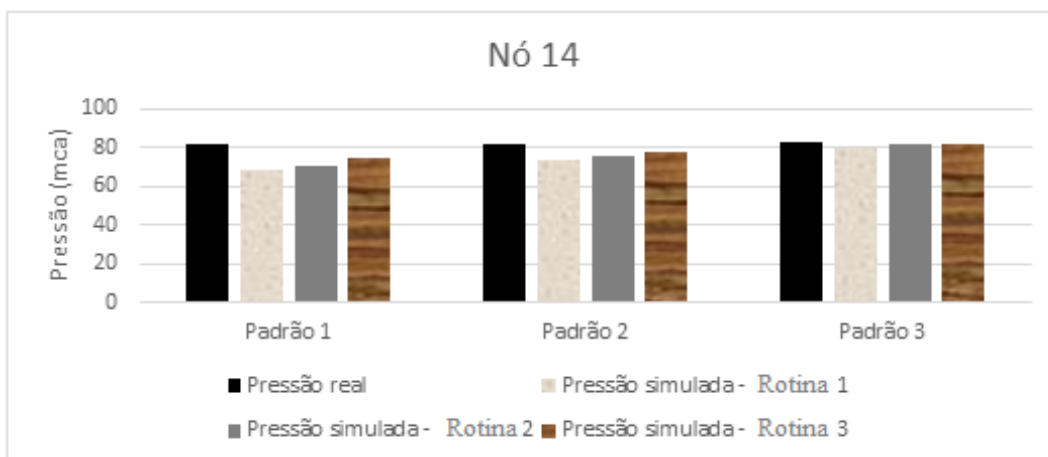


Figura 110 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 14.

Na pressão simulada para o nó 111 (figura 111), os resultados para as rotinas 2 e 3 também são melhores que o da rotina 1 para os três padrões de consumo, sendo a única exceção o padrão 2, onde o melhor resultado é para a rotina 2 (99,33%), mas a rotina 1 traz ajuste melhor (99,21%) que a rotina 3 (97,93%). No padrão 1 a rotina 2 alcança ajuste de 99,25% e para o padrão 3 o melhor ajuste ocorre na rotina 2, com 99,15% de ajuste, seguido pela rotina 3 com 98,56% e na rotina 1 alcança-se 93,35%.

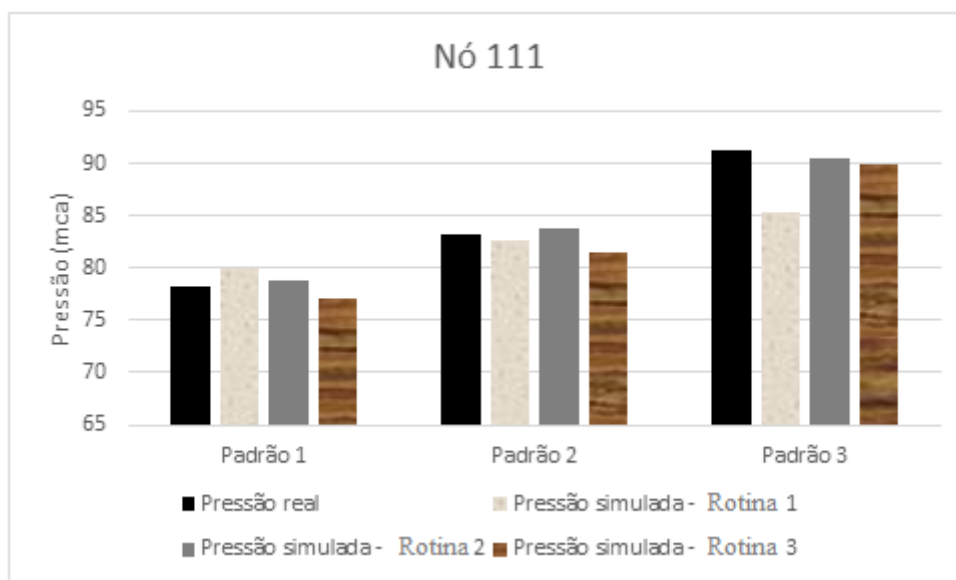


Figura 111 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 111.

No nó 103 (figura 112), os resultados para as rotinas 2 e 3 também são melhores que o da rotina 1 para os três padrões de consumo, sendo a única exceção o padrão 2,

onde o melhor resultado é para a rotina 3 (99,98%), mas a rotina 1 traz ajuste melhor (97,51%) que a rotina 2 (94,45%). No padrão 1, a rotina 3 alcança ajuste de 90,33% e para o padrão 3 o melhor ajuste também ocorre na rotina 3, com 99,72% de ajuste, seguido pela rotina 2 com 99,02% e na rotina 1 o ajuste é de 91,10%.

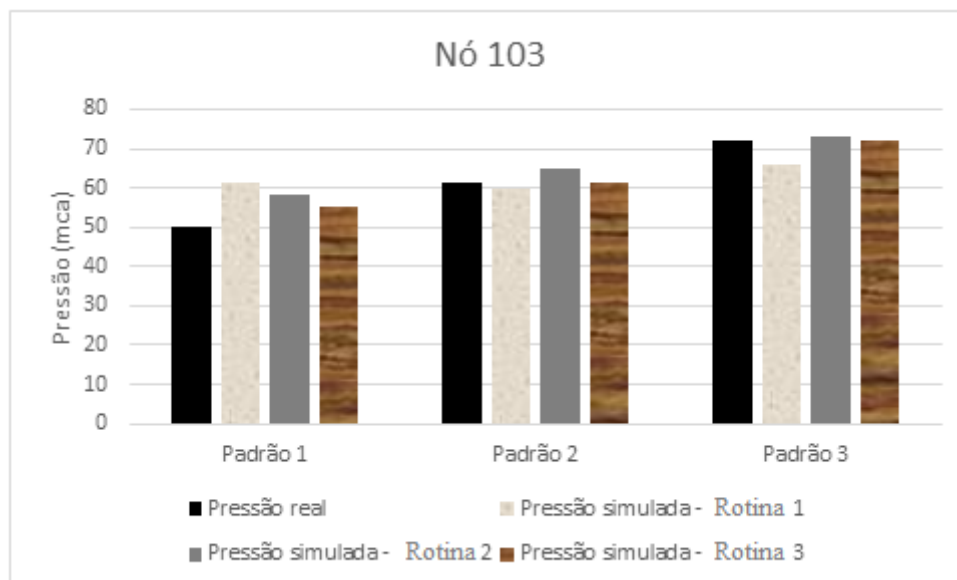


Figura 112 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 103.

Na análise do nó 109 (figura 113), as rotinas 2 e 3 apresentam melhores ajustes que a rotina 1 para os padrões de consumo 1 e 3. A excessão ocorre no padrão 2, onde a rotina 1 apresenta melhor ajuste (99,84%), seguida pela rotina 2 (99,69%) e a 3 (98,12%), porém, além de só ocorrer neste padrão, a diferença é pequena. Nos padrões 1 e 3 os melhores ajustes ocorrem na rotina 2, com 100% e 98,03%, respectivamente.

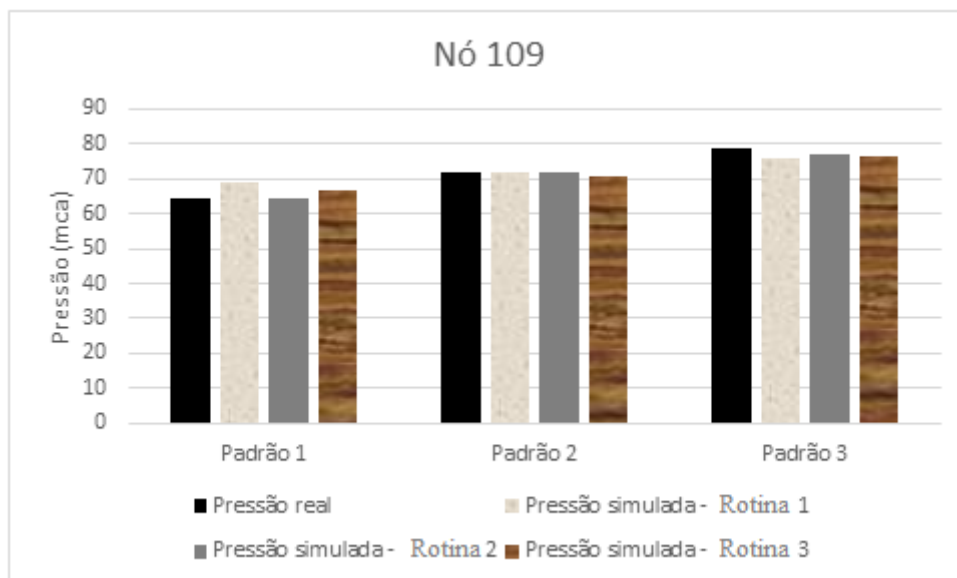


Figura 113 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 109.

Nas pressões simuladas para o nó 116 (figura 114), os melhores resultados ocorrem para a rotina 2, com excessão do padrão de consumo 3 onde apesar da diferença ser pequena, a rotina 1 tem ajuste de 99,06%, seguida das rotinas 2 e 3, com 98,99% e 98,68% respectivamente. Nos padrões de consumo 1 e 2 os melhores ajustes ocorrem na rotina 2, com 100% e 99,73%, respectivamente.

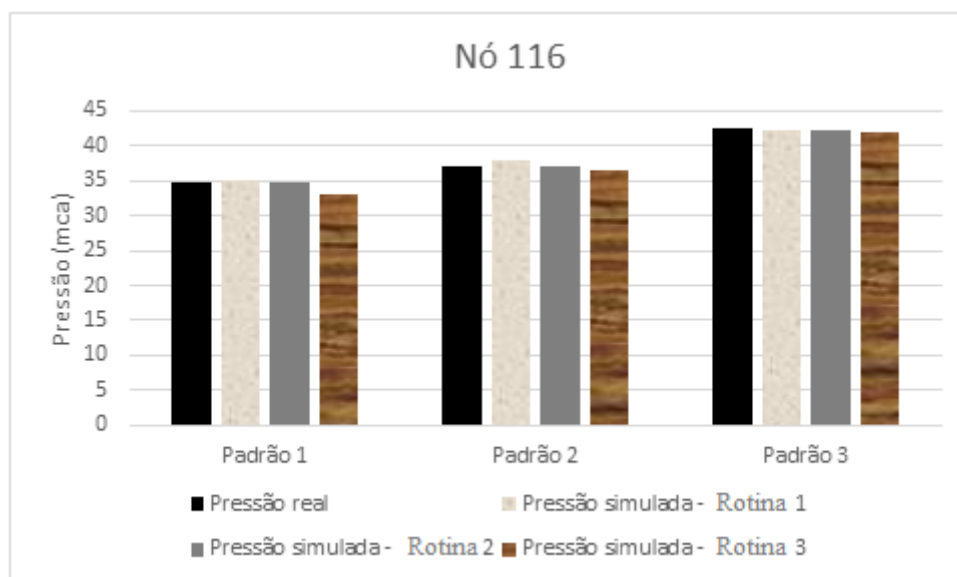


Figura 114 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 116.

Para a pressão do nó 117 (figura 115), a rotina 3 fornece melhores ajustes para os padrões de consumo 1, com 91,88% e 2, com 97,33%. No padrão 1 o ajuste da rotina 2 é melhor que a rotina 1, porém ocorre o contrário no padrão de consumo 2 ao se comparar essas duas rotinas. No padrão 3, a rotina 2 se destaca com 98,97% de ajuste, seguida da rotina 3 (97,52%) e da 1 (86,19%).

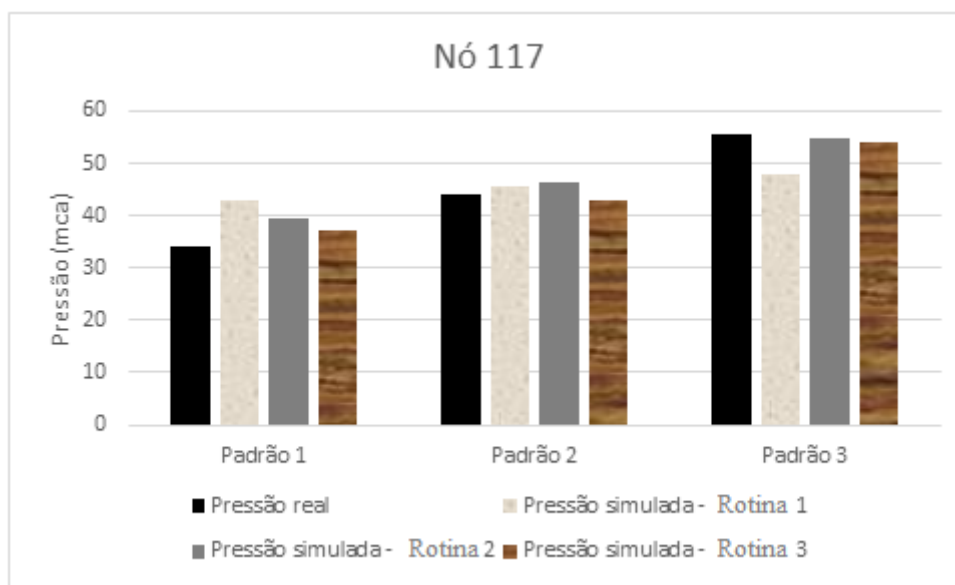


Figura 115 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 117.

As pressões simuladas no nó 113 (figura 116) apresentam melhor ajuste de para as rotinas 2 e 3. No padrão de consumo 1 a rotina 3 tem ajuste de 97,24% e nos padrões 2 e 3 a rotina 2 apresenta melhor ajuste, com 98,95% e 96,85%, respectivamente. O único padrão onde a rotina 1 ficou com o segundo melhor ajuste foi no padrão 2, com 98,16%, seguida da rotina 3, com 95,19%.

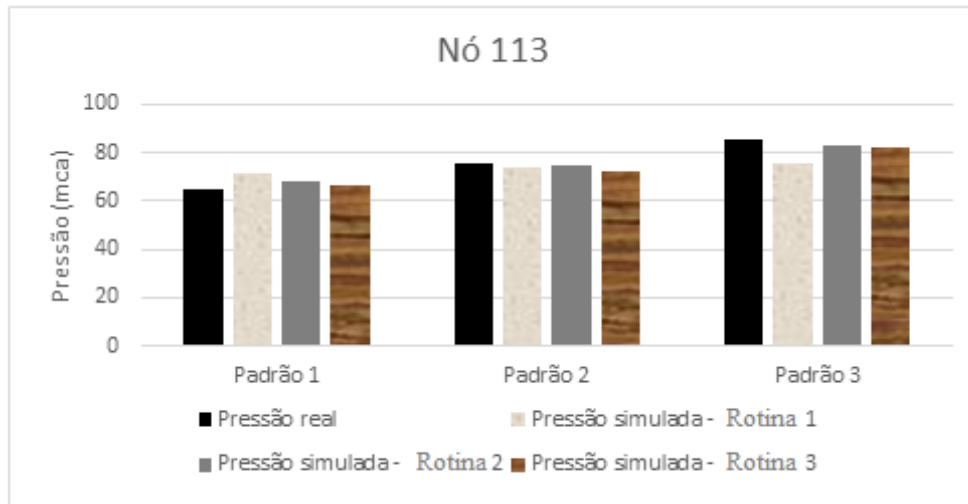


Figura 116 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 113.

No nó 62 (figura 117), as pressões simuladas para os padrões 1 e 3 apresentam melhores resultados para as rotinas 2 e 3, com ajuste de 94,45% no padrão 1 para a rotina 3 e de 97,14% no padrão 3 para a rotina 2. No padrão 2 o melhor ajuste ocorre na rotina 1 (99,47%), seguida da rotina 2 (97,82%) e da 3 (95,75%).

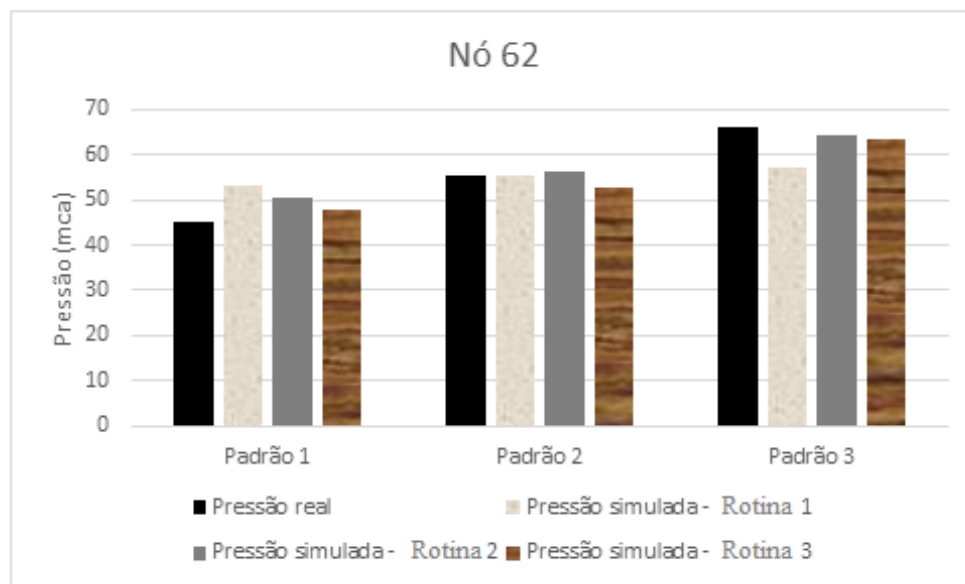


Figura 117 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 62.

Para o nó 85 (figura 118), os melhores resultados de forma geral são apresentados para a rotina 2, com 87,70% no padrão 2 e 88,11% no padrão 3 de consumo. A exceção

ocorre para o padrão 1, onde a rotina 1 tem ajuste melhor, com 99,79%, seguida das rotinas 2 (91,40%) e 3 (86,21%).

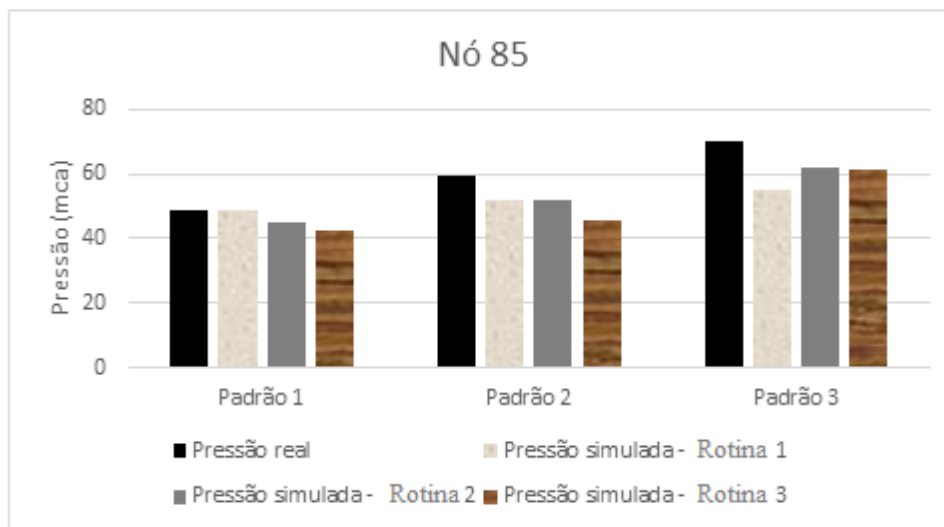


Figura 118 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 85.

No nó 108 (figura 119), os resultados de ajuste das rotinas 2 e 3 são melhores que para a rotina 1 para os três padrões de consumo, onde nos padrões 1 e 2 os melhores valores de ajuste é obtido pela rotina 3, com 87,60% e 98,48%, respectivamente. No padrão 3, o melhor ajuste é obtido pela rotina 2, com 98,92%.

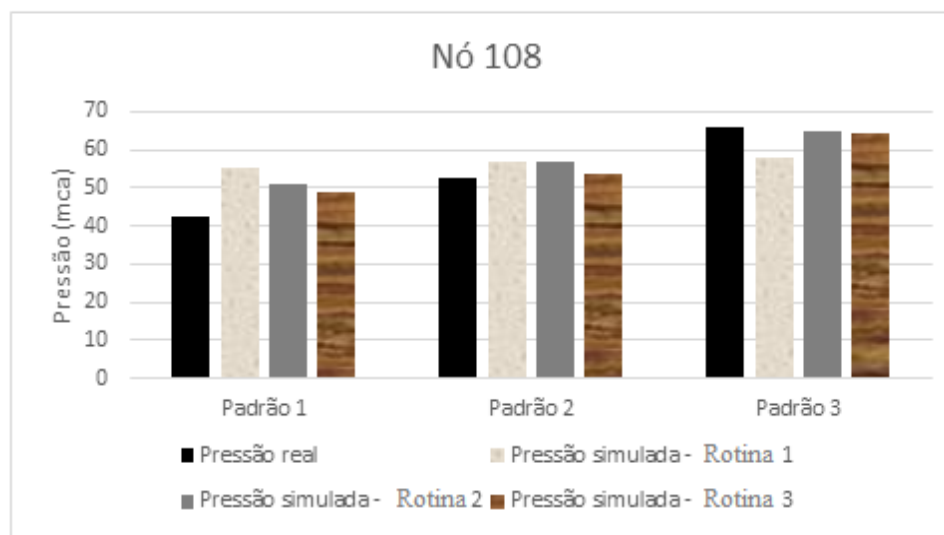


Figura 119 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 108.

As pressões simuladas para o nó 115 (figura 120) apresentou melhores resultados para a rotina 2 nos padrões de consumo 2 (73,72%) e 3 (91,47%). Para o padrão 1, a rotina 1 forneceu melhor resultada, com 99,71%, também seguida pela rotina 2, com 85,10%. No padrão 3 ocorre a maior difença de ajuste entre as rotinas 2 (91,47%) e 3 (90,26%) em relação a rotina 1 (75,79%).

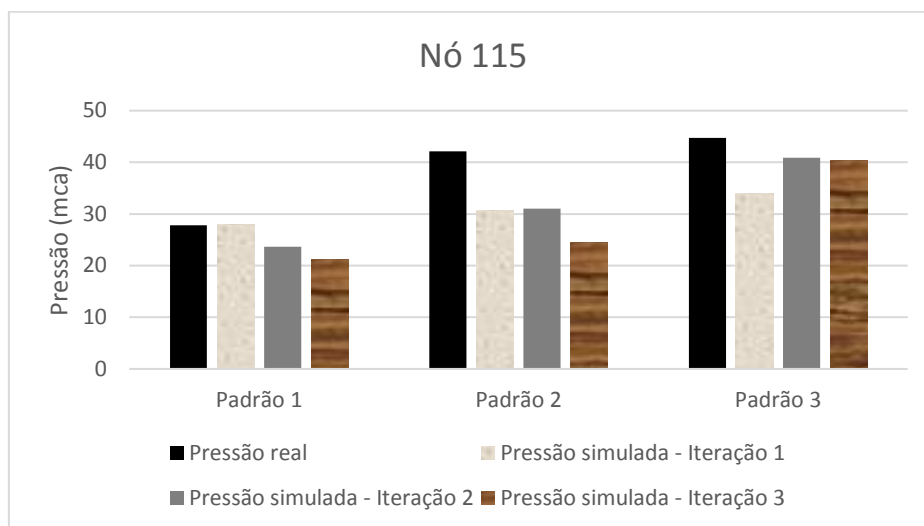


Figura 120 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 115.

E para o nó 114 (figura 121), de maneira geral a rotina 2 apresenta melhores ajustes, com 66,08% no padrão 2 e 86,98% no padrão 3. Para o padrão 1, a rotina 1 fornece melhor ajuste, com 93,18%.

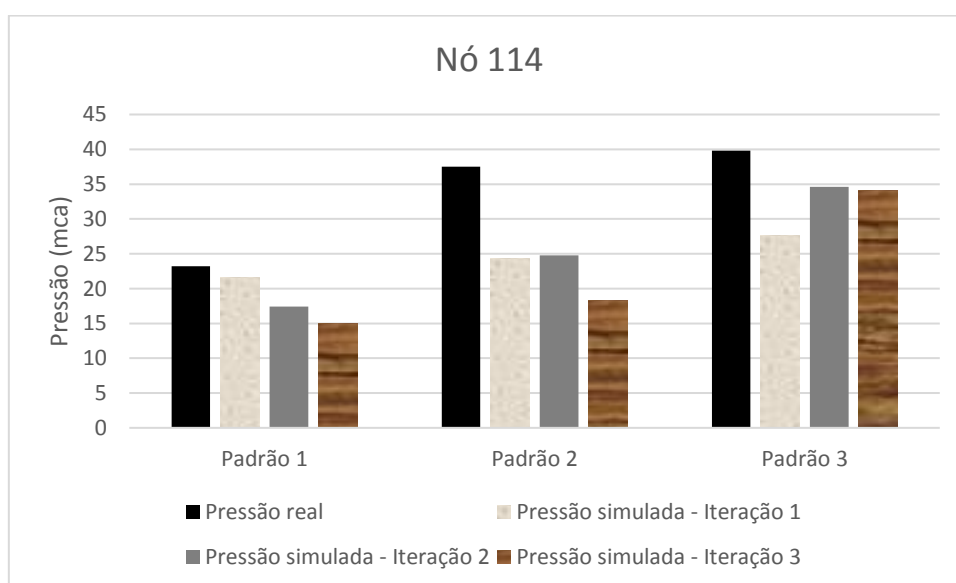


Figura 121 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 114.

5.2.6.2. Nós em que a rotina 1 foi melhor

Os nós de monitoramento 51, 105 e 112 não apresentaram melhorias em relação a rotina 1 nas simulações para pelo menos dois dos três padrões de consumo, porém a diferença é pouca na maior parte dos casos. Realizando análise por padrões de consumo, ocorre exceção deste resultado para os nós 105 e 112, onde o ajuste com os coeficientes de vazamento C1 e N1 por zonas de pressão apresentam melhorias nos resultados no padrão 3.

Nos valores de ajuste do nó 105 (figura 122), a rotina 1 apresentou melhor ajuste para os padrões 1 e 2 com 94,93% e 97,53%, respectivamente. No padrão 3, o melhor ajuste se deu para a rotina 2 (99,74%), seguido pelo 3 (99,67%) e 1 (98,64%).

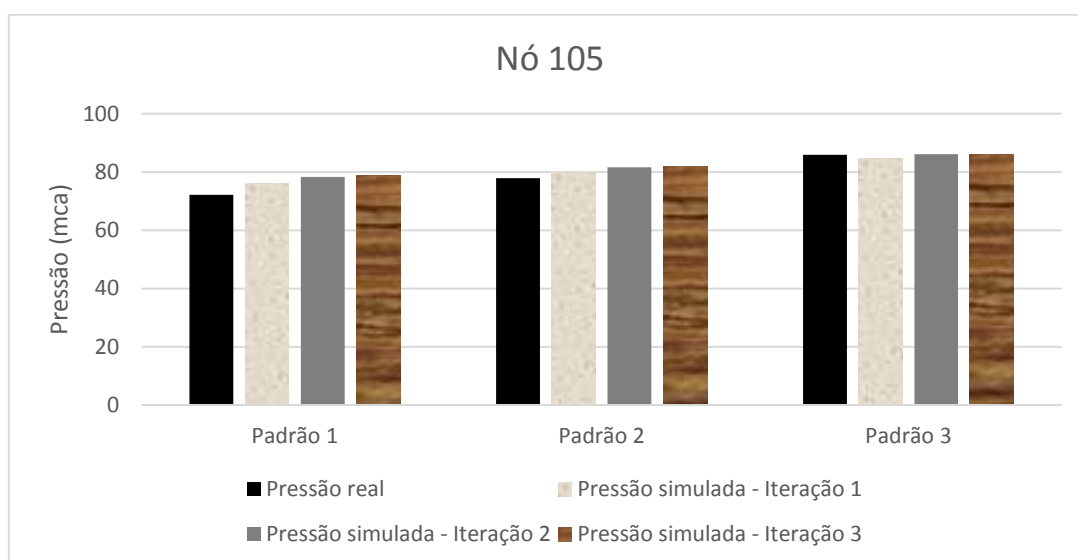


Figura 122 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 105.

Para os valores de ajuste do nó 112 (figura 123), a rotina 1 apresentou melhor ajuste para os padrões 1 e 2 com 98,15% e 97,67%, respectivamente. No padrão 3, o melhor ajuste se deu para a rotina 3 (99,96%), seguido pelo 2 (99,58%) e 1 (98,85%).

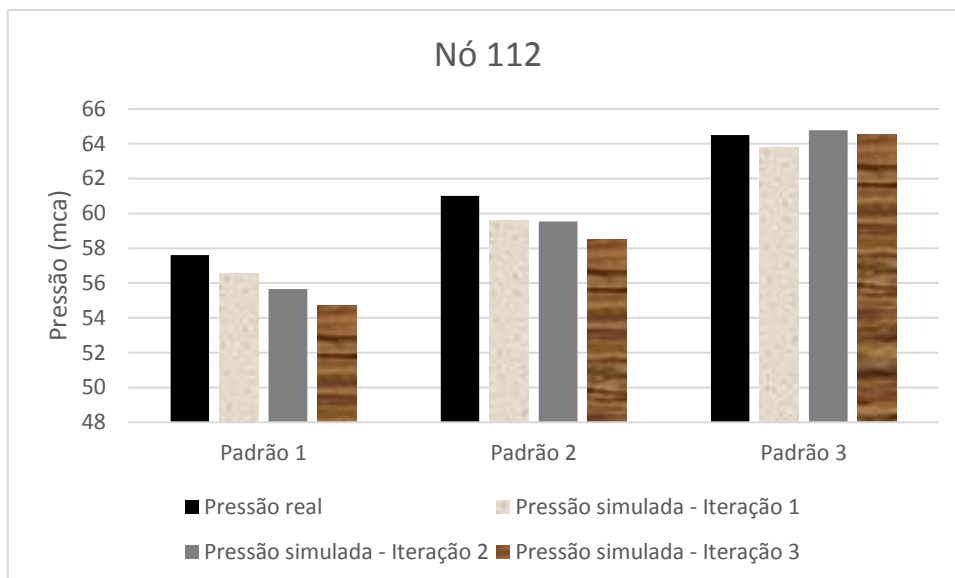


Figura 123 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 112.

E para os valores de ajuste do nó 51 (figura 124), a rotina 1 apresentou melhor ajuste para os padrões 1, 2 e 3, com 92,92%, 90,86% e 87,95%, respectivamente. A menor diferença entre os ajustes se dá no padrão 3, onde pela rotina 2 obteve-se 87,51% e pela rotina 3, 87,03%.

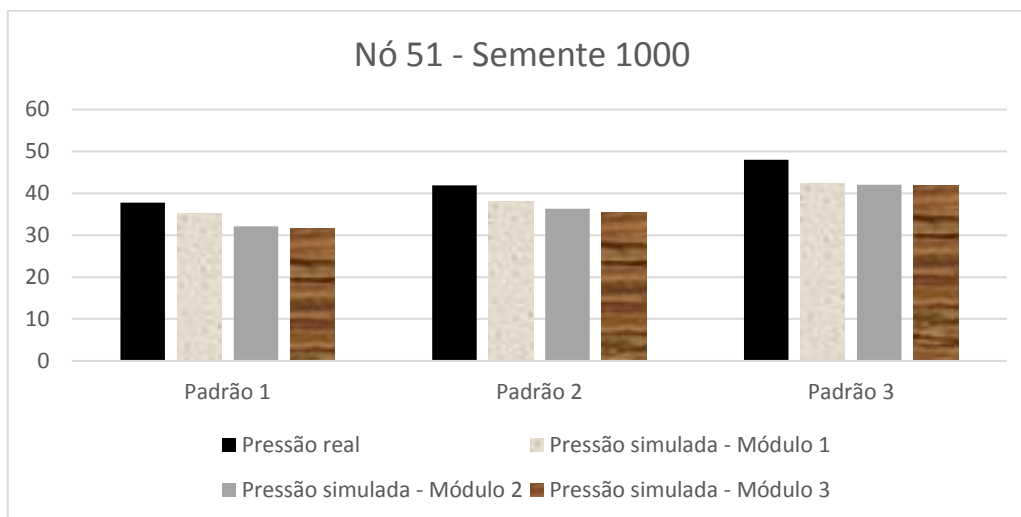


Figura 124 - Comparação dos resultados de pressão para três padrões de consumo - Nó 51.

5.2.6.3. Análise das pressões para os três padrões de consumo da Rotina 1.

No padrão 1 da primeira rotina (figura 125), o melhor ajuste ocorre para os nós 85 e 115, com 99,9% (sequência aleatória 5) e 99,72% (sequência aleatória 1) de ajuste, respectivamente.

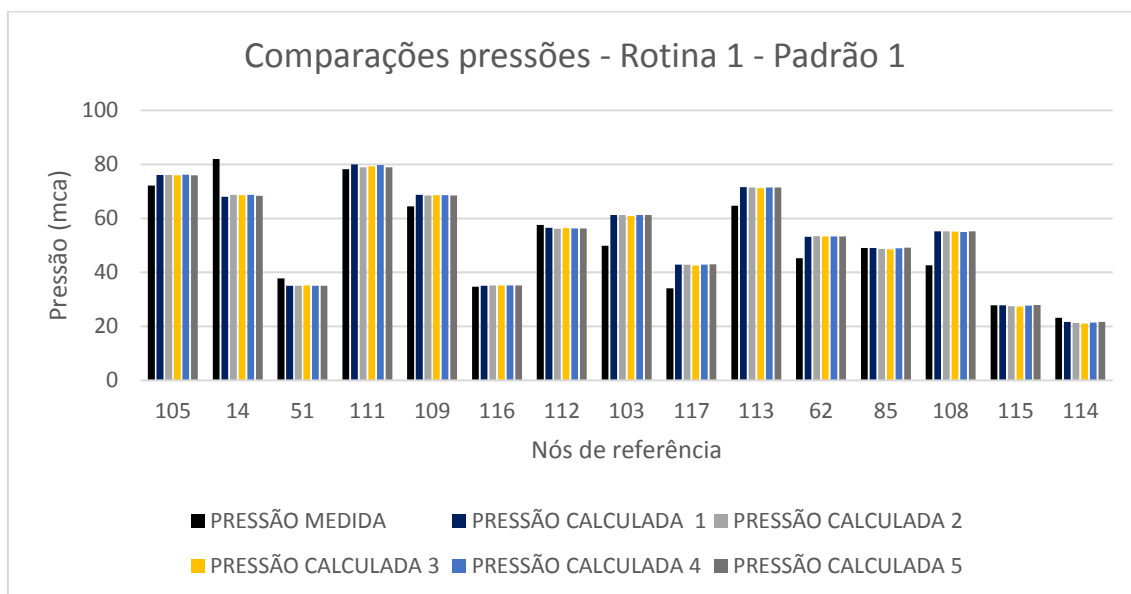


Figura 125 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados para a rotina 1 - padrão 1.

No padrão 2 da primeira rotina (figura 126), o melhor ajuste ocorre para os nós 62 e 109, ambos para a sequência aleatória 1, com 99,44% e 99,83% de ajuste, respectivamente.

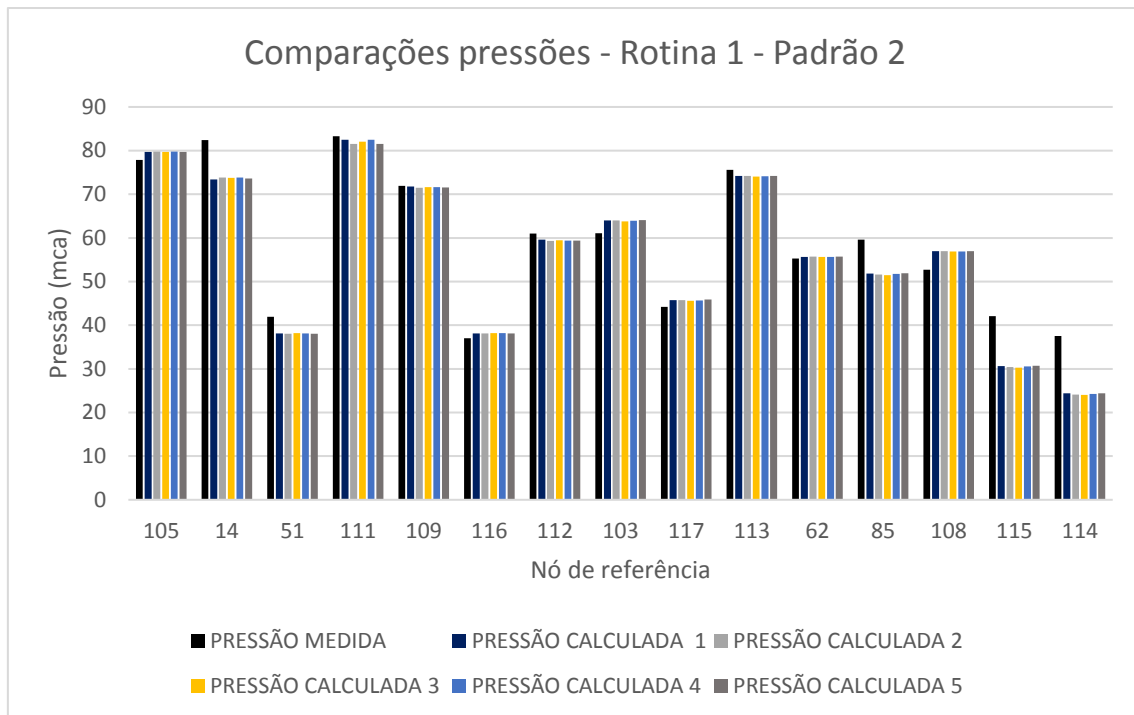


Figura 126 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados para a rotina 1 - padrão 2.

No padrão 3 da primeira rotina (figura 127), o melhor ajuste ocorre para os nós 112 e 116, com 98,83% (sequência aleatória 1) e 99,24% (sequências aleatórias 3 e 4) de ajuste, respectivamente.

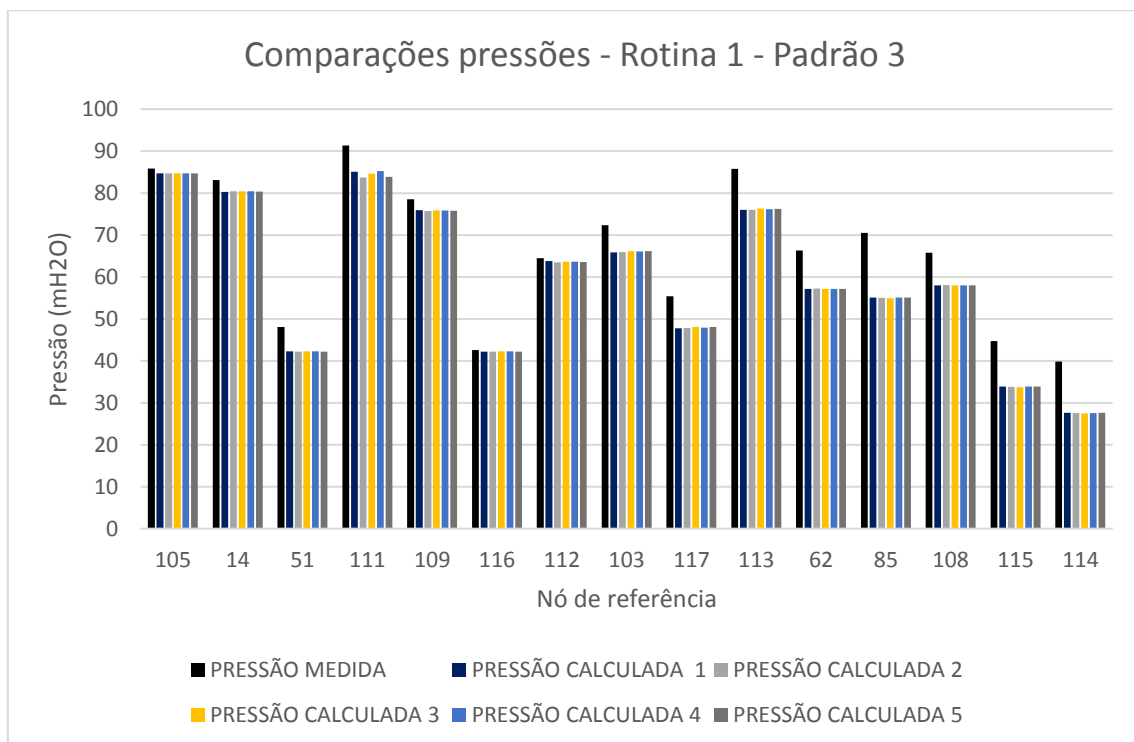


Figura 127 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados para a rotina 1 - padrão 3.

5.2.6.4. Análise das pressões para os três padrões de consumo da Rotina 2 - Resultados obtidos através de Silva, B. (2003)

Os resultados obtidos para a rotina 2 através de Silva, B. (2003) não variam com as sequências aleatórias.

Assim, o nó cuja pressão obteve melhor ajuste para o padrão 1 (figura 128) foi o 111, com 99,25% de ajuste.

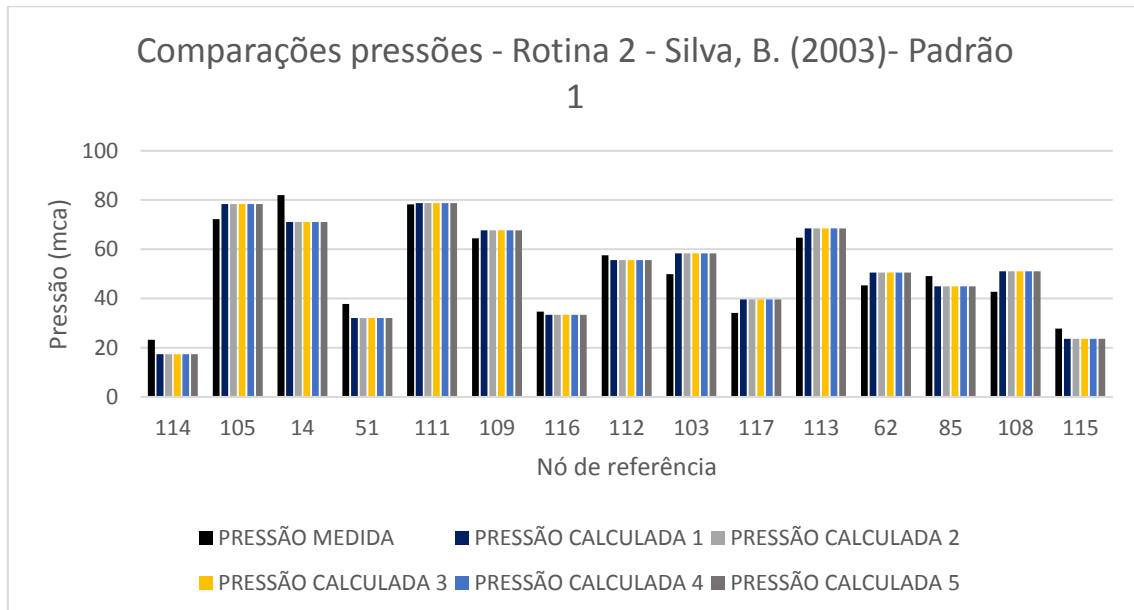


Figura 128 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a rotina 2 - padrão 1.

Para o padrão 2 (figura 129), os nós cujas pressões obtiveram melhor ajuste foram os 111, 109 e 116, com 99,33%, 99,69% e 99,73%, respectivamente.

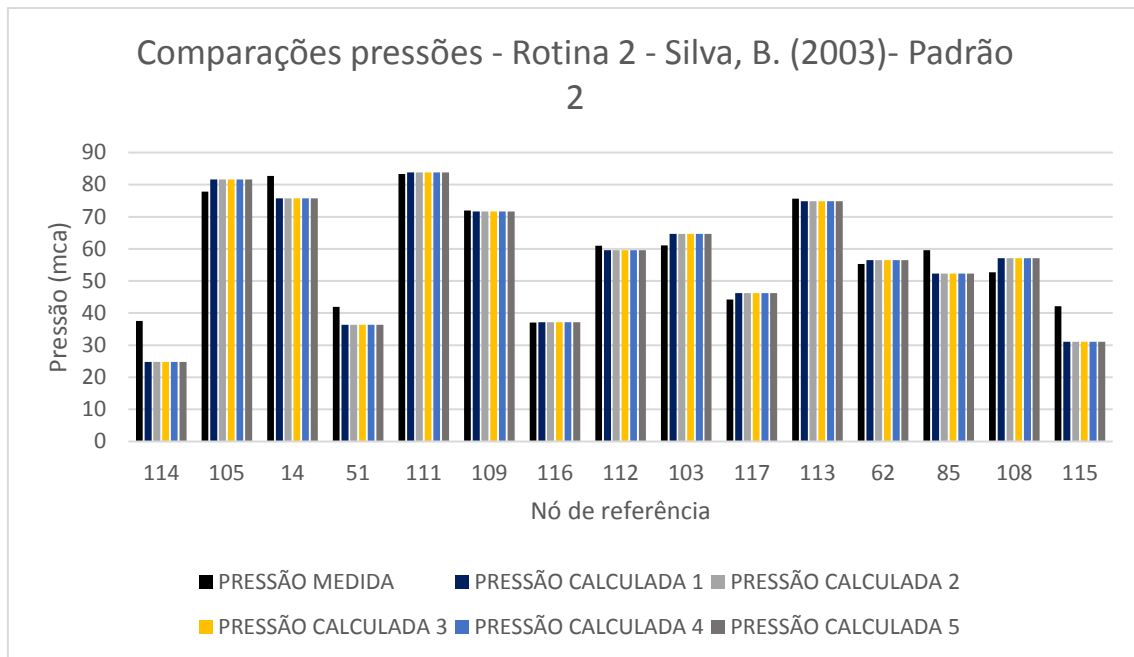


Figura 129 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 2 - padrão 2.

Para o padrão 3 (figura 130), os nós cujas pressões obtiveram melhor ajuste foram os 105, 111, 112 e 103, com 99,75%, 99,15% e 99,59% e 99,02%, respectivamente.

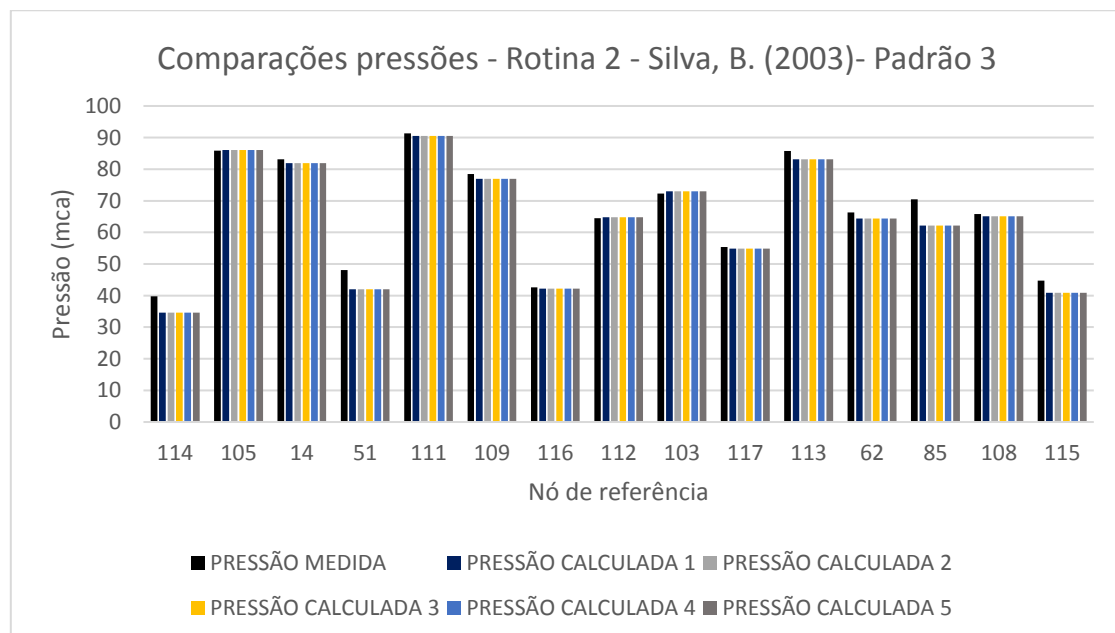


Figura 130 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a rotina 2 - padrão 3.

5.2.6.5. Análise das pressões para os três padrões de consumo da Rotina 3 - Resultados obtidos por meio do uso de Silva, B. (2003)

No padrão 1 (figura 131), o melhor ajuste ocorre para o nó 11, com 98,51%.

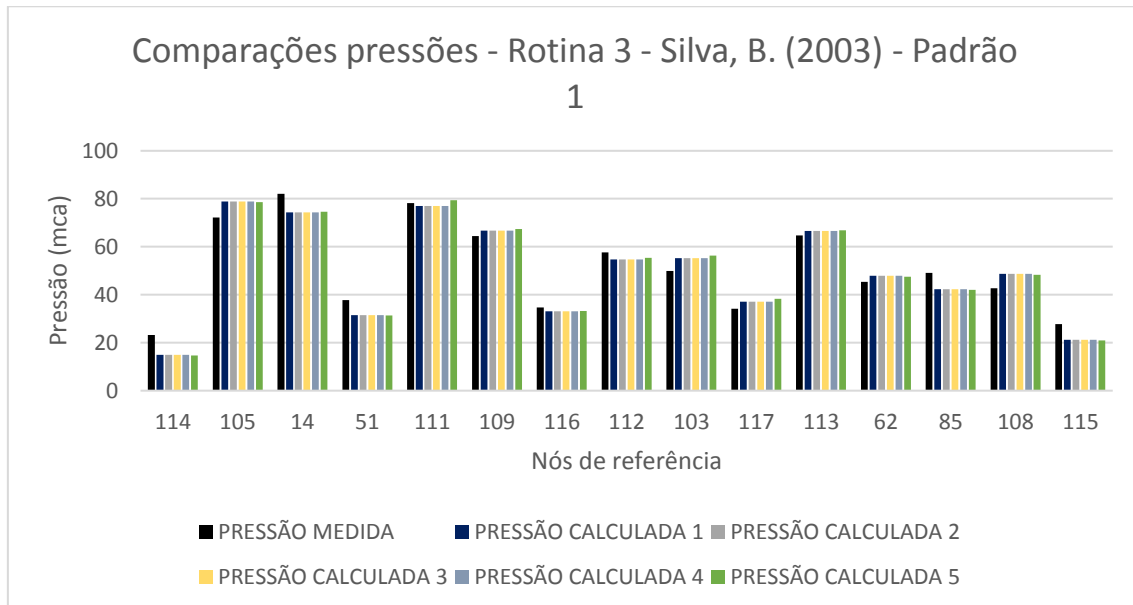


Figura 131 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 3 - padrão 1.

No padrão 2 (figura 132), os melhores ajustes ocorrem para os nós 103 e 111 na sequência aleatória 5, com 99,84 % e 99,9%, respectivamente.

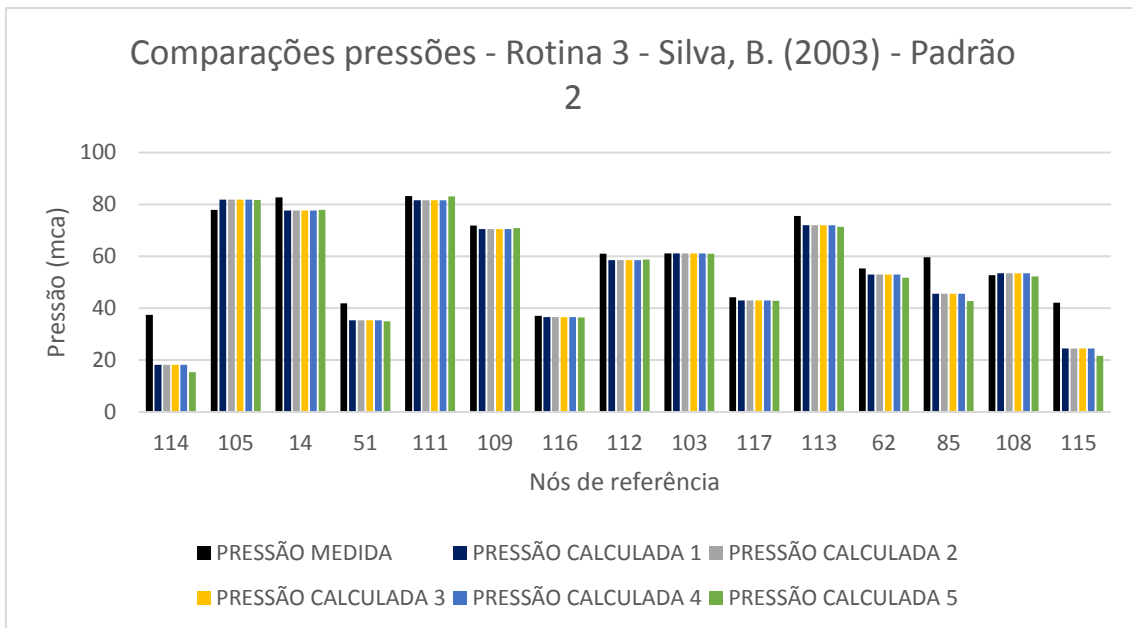


Figura 132 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 3 - padrão 2.

E no padrão 3 (figura 133), os melhores ajustes ocorrem para os nós 103, 105 e 112, com 99,72 %, 99,67% e 99,96%, respectivamente.

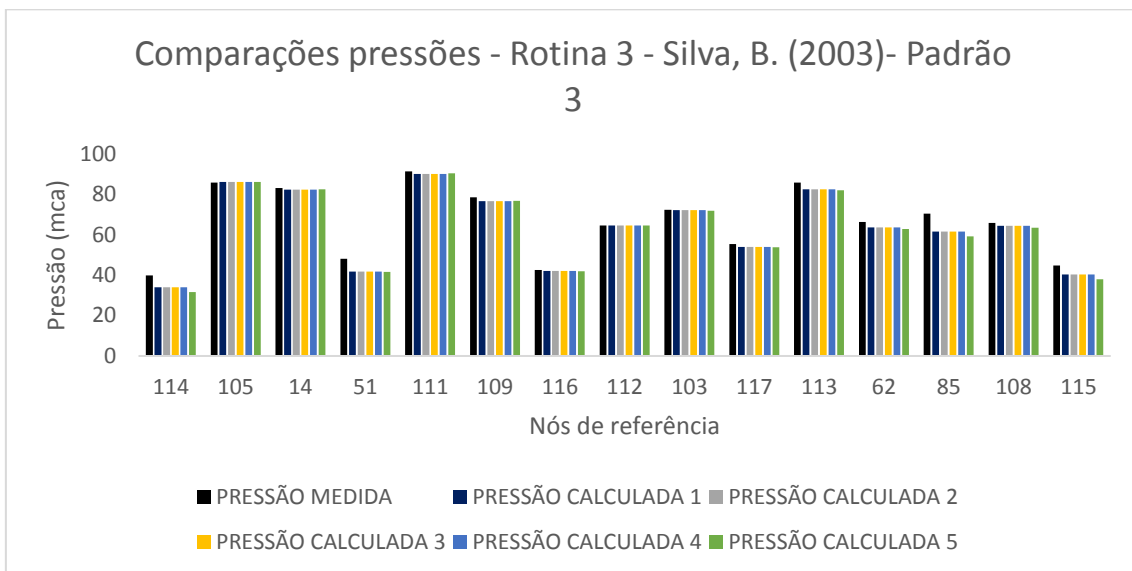


Figura 133 - Comparação entre os valores de pressão real e simulados através de Silva, B. (2003) para a Rotina 3 - padrão 3.

5.2.7. Análise das rugosidades

Foram sorteados 6 trechos para a rotina 2 para análise da calibração de rugosidade. A tabela 30 mostra os valores obtidos pela simulação, sendo que não houve variação entre os valores obtidos para as sequências aleatórias.

Os valores altos de rugosidade justificam-se pois foi considerada a vazão média inferior à vazão média monitorada, sendo esta uma fonte de erro. A soma das médias resulta em cerca de 8 L/s. Entretanto, de acordo com a vazão monitorada (Figura 75), este valor equivale à vazão mínima noturna e não à vazão média fornecida. Assim, o modelo hidráulico tendeu a aumentar a rugosidade absoluta para ajustar à perda de carga total maior devido à vazão média monitorada ser superior à vazão média calculada via consumos fornecidos pelo SAAE.

Tabela 29 - Rugosidade calibrada por trecho - Rotina 2

Rotina 2					
Rugosidade simulada para cada sequência aleatória (mm)					
Trecho	1	2	3	4	5
22	9,58	9,58	9,58	9,58	9,58
27	9,94	9,94	9,94	9,94	9,94
32	9,68	9,68	9,68	9,68	9,68
35	8,56	8,56	8,56	8,56	8,56
36	9,12	9,12	9,12	9,12	9,12
37	7,58	7,58	7,58	7,58	7,58

Nas rugosidades simuladas para a rotina 3 (tabela 31) foram sorteadas para os trechos, constata-se que os valores não se alteram para as sequências aleatórias 1 a 4. A sequência aleatória 5 sorteou trechos distintos das demais sequências aleatórias, sendo considerado para o produto final (item 5.2.8) as quatro primeiras sequências aleatórias. Os trechos que coincidentemente foram sorteados igual para todas as sequências aleatórias são o 31 e o 32, sendo que há maior proximidade para o valor de rugosidade simulado pela sequência aleatória 5 em relação às demais no nó 32.

Tabela 30 - Rugosidade calibrada por trecho - Rotina 3

Rotina 3					
Rugosidade simulada para cada sequência aleatória (mm)					
Trecho	1	2	3	4	5
7	0,05	0,05	0,05	0,05	2,76
22	7,06	7,06	7,06	7,06	0,05
31	9,63	9,63	9,63	9,63	4,43
32	4,97	4,97	4,97	4,97	5,62
33	6,06	6,06	6,06	6,06	0,05
35	8,76	8,76	8,76	8,76	0,05
36	8,94	8,94	8,94	8,94	0,05
37	0,05	0,05	0,05	0,05	5,79
116	0,05	0,05	0,05	0,05	3,87

5.2.8. Zonas de pressão obtidas por meio d uso Epanet

Por meio do uso dos dados de rugosidade calibrados pela rotina 2, foram simuladas no simulador hidráulico EPANET as pressões para cada nó na rede e gerada a imagem das isolinhas de pressão para análise de distribuição de pressão no setor (figura 134). A isolinha de pressão obtida para a rotina 3 (figura 135) não apresenta diferenças significativas em relação a obtida com a rotina 2.

Toda região em amarelo representa a zona de pressão de 75 – 100 mca, implicando maior tendência de rompimento da tubulação . Nas tubulações específicas desta zona, pode-se instalar dispositivos redutores de pressão de forma estratégica a fim de aumentar a vida útil da tubulação, diminuir incomodo aos usuários devido ao corte de fornecimento de água e também, gastos com equipe de manutenção e desperdício de água.

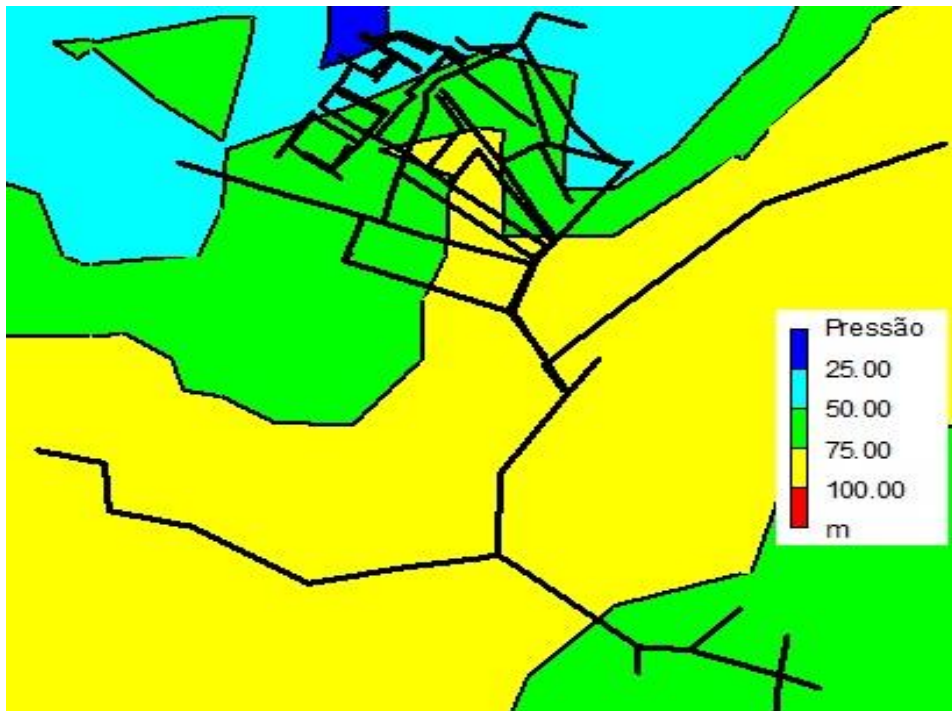


Figura 134 - Isolinhas de pressão obtidas por meio do uso do Epanet e das rugosidades simuladas pela Rotina 2.

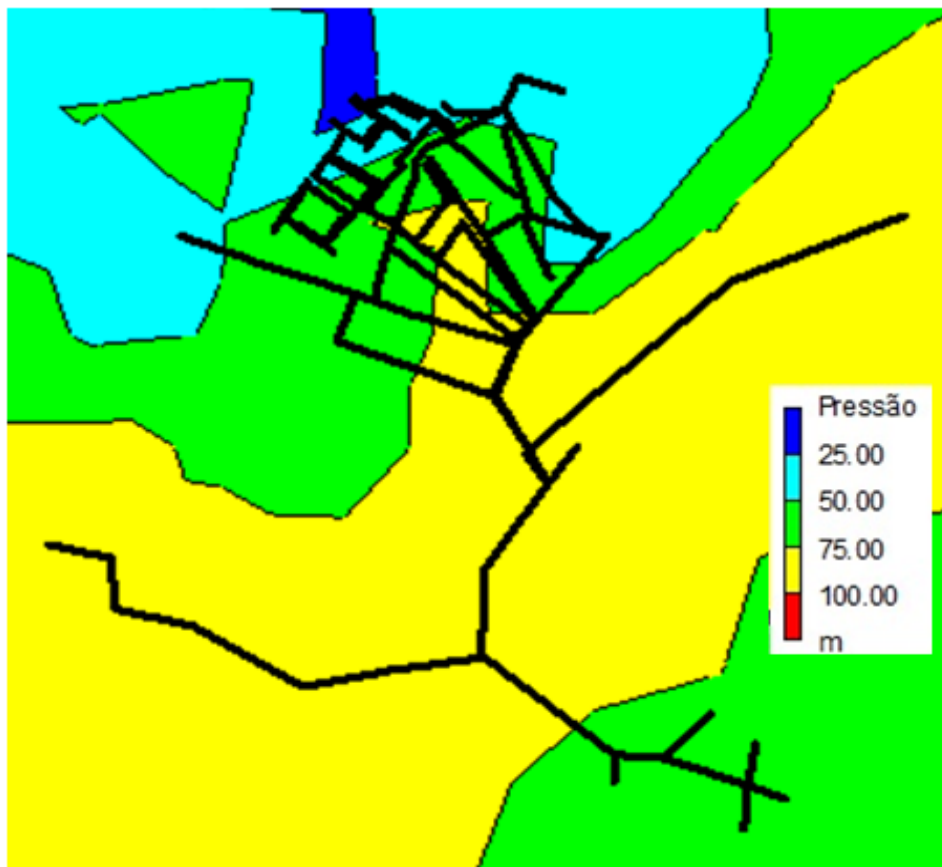


Figura 135 - Isolinhas de pressão obtidas por meio do uso do Epanet e das rugosidades simuladas pela Rotina 3.

5.2.9. Interface computacional

A interface computacional facilita a aplicação das três rotinas para realização das simulações, pois antes de sua criação a execução era limitada ao Windows XP e com a interface o usuário pode executar os programas em qualquer sistema operacional com uma versão executável que torna prático a realização das simulações.

Ela foi desenvolvida por membros do grupo de pesquisa do Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos (NUMMARH) que criaram a “Interface de Utilização do Programa de Simulações Hidráulicas”. Esta interface exige a instalação do JAVA Runtime Environment (JRE) e do Netbeans IDE.

A seguir, são apresentadas as janelas da interface com o funcionamento de cada botão de acesso às rotinas e seus respectivos passos.

A figura 136 apresenta a janela inicial com o botão que inicia a rotina 1.

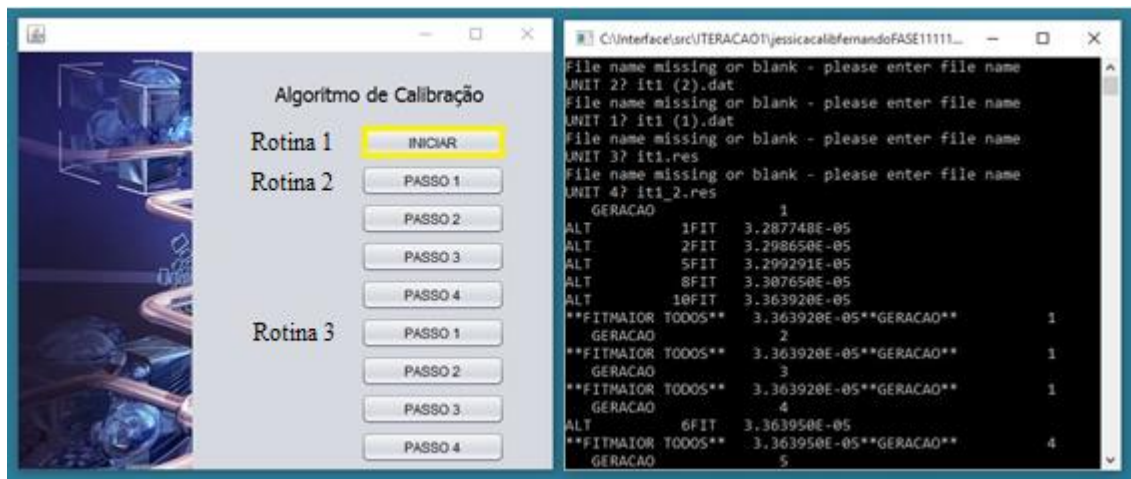


Figura 136 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 1.

A figura 137 apresenta a janela inicial com o botão que inicia o passo 1 da rotina 2.

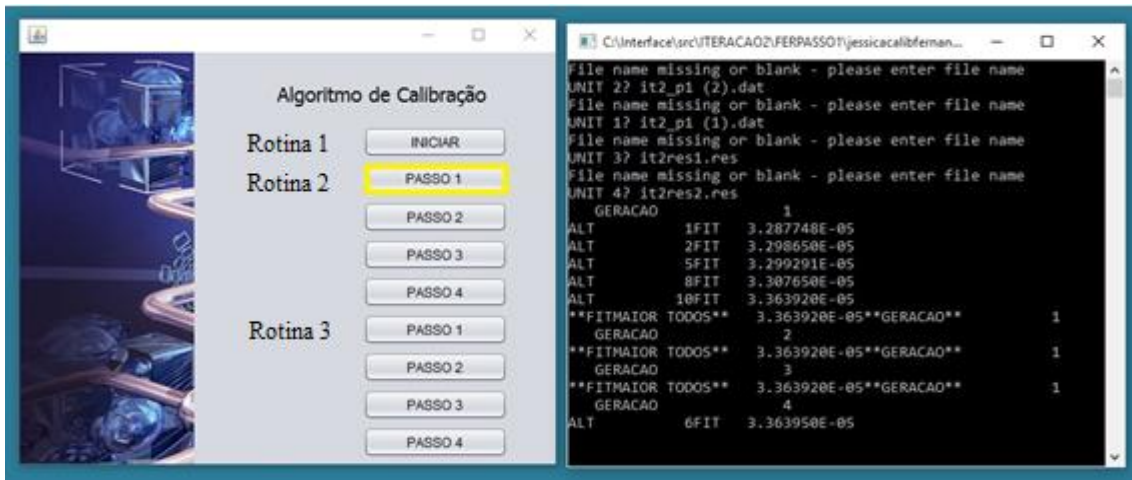


Figura 137 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 1.

A figura 138 traz a janela inicial com o botão que inicia o passo 2 da rotina 2.

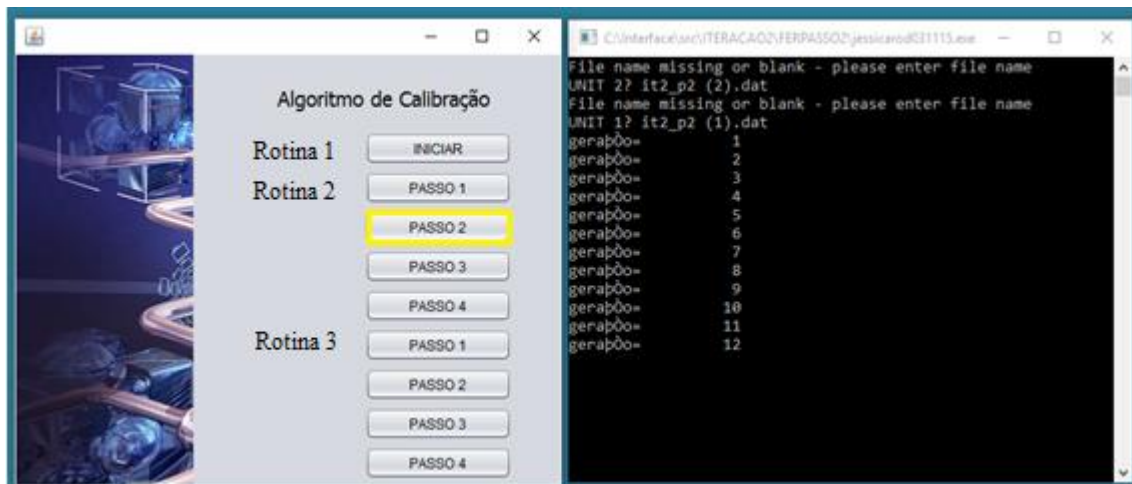


Figura 138 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 2.

A figura 139 apresenta a janela inicial com o botão que inicia o passo 3 da Rotina 2.

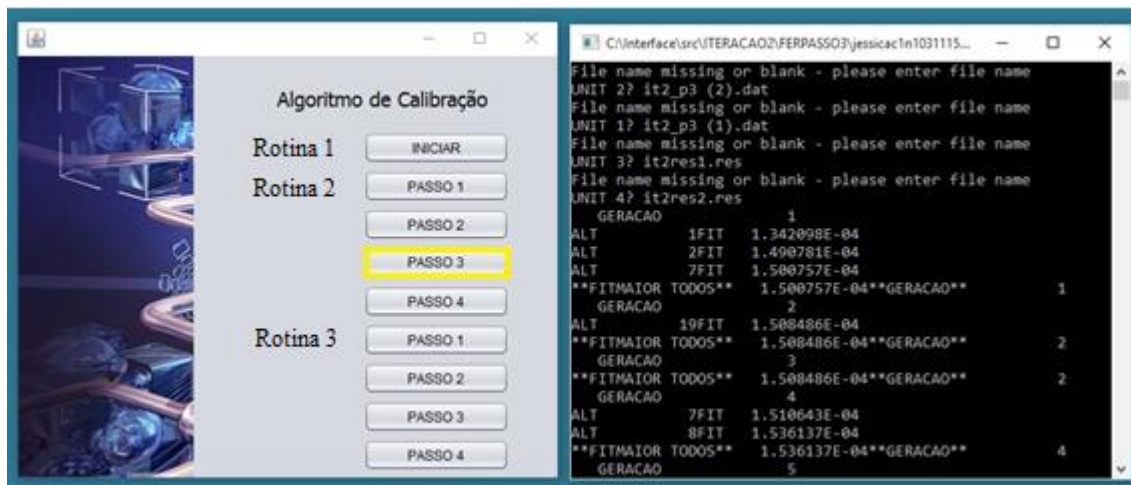


Figura 139 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 3.

E a figura 140 apresenta a janela inicial com o botão que inicia o passo 4 da rotina 2.

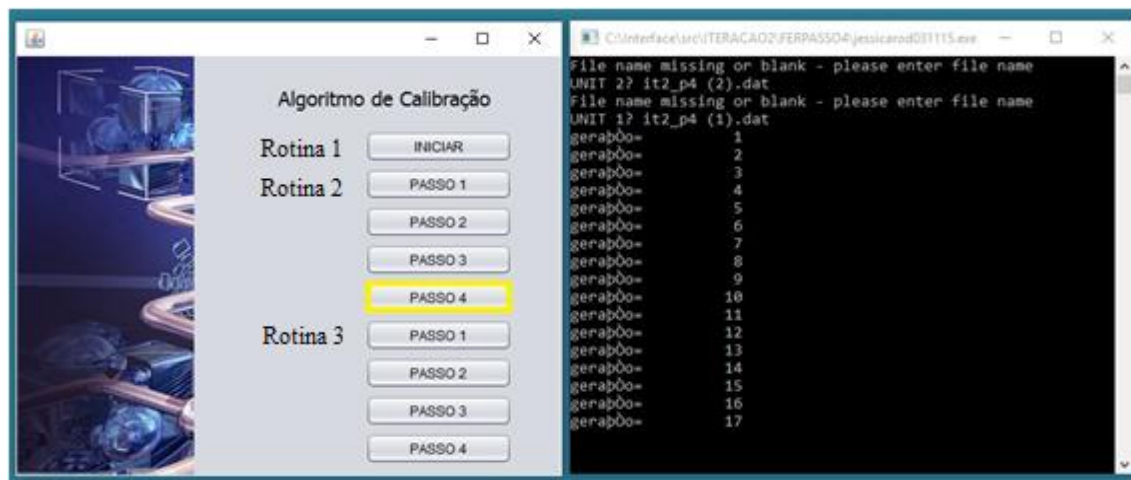


Figura 140 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 2: Passo 4.

A seguir, são apresentados a janela inicial com os botões referentes aos 4 passos da rotina 3.

A figura 141 contém a janela inicial com o botão que inicia o passo 1 da rotina 3.

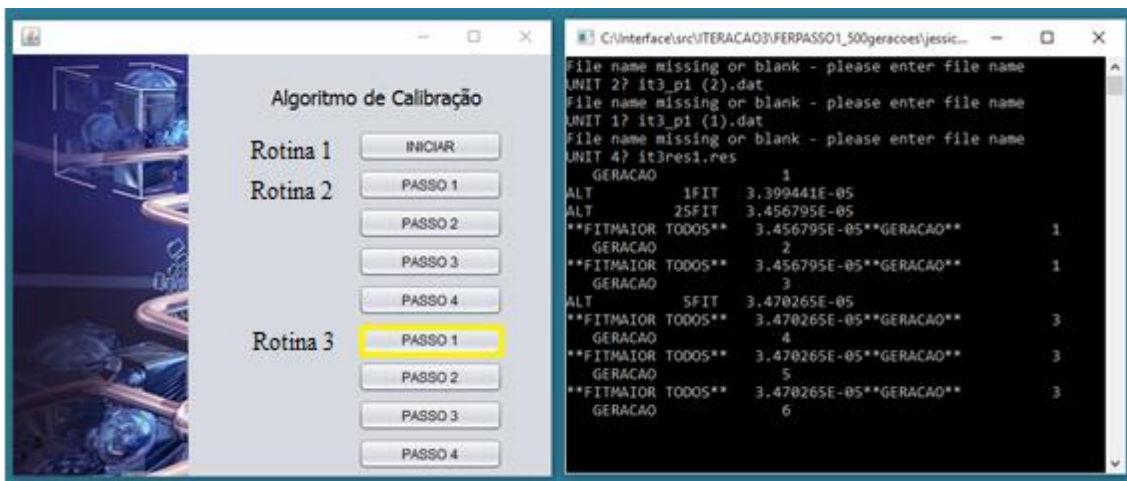


Figura 141 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 1.

Na sequência, a figura 142 apresenta a janela inicial com o botão que inicia o passo 2 da rotina 3.

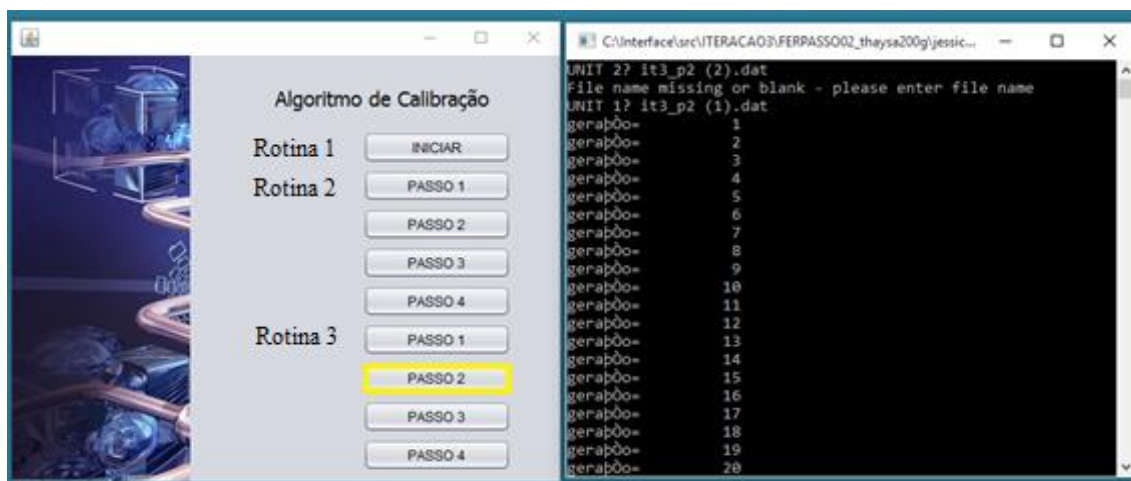


Figura 142 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 2.

A figura 143 contém a janela inicial com o botão que inicia o passo 3 da rotina 3.

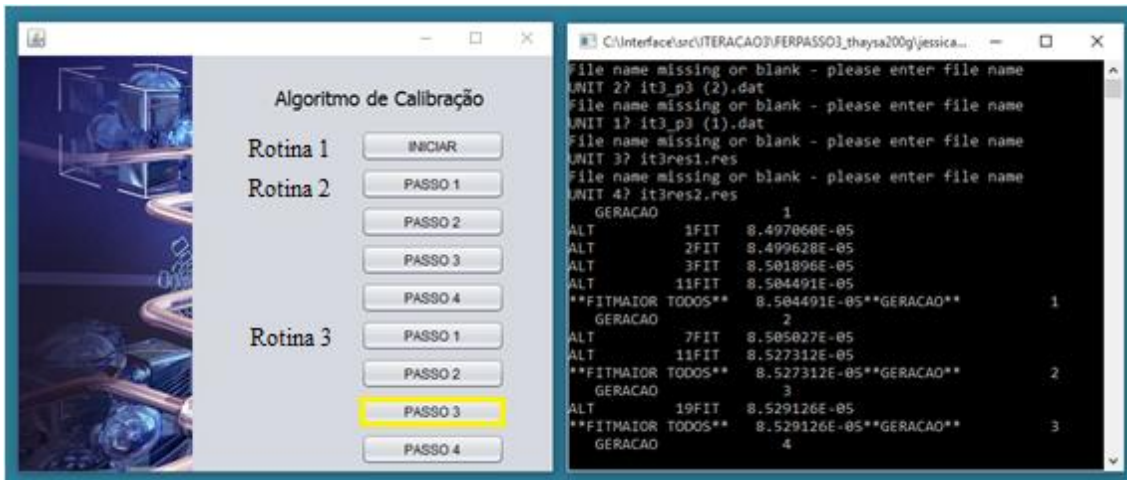


Figura 143 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 3.

E a figura 144 contém a última janela inicial, com o botão que inicia o passo 4 da rotina 3.

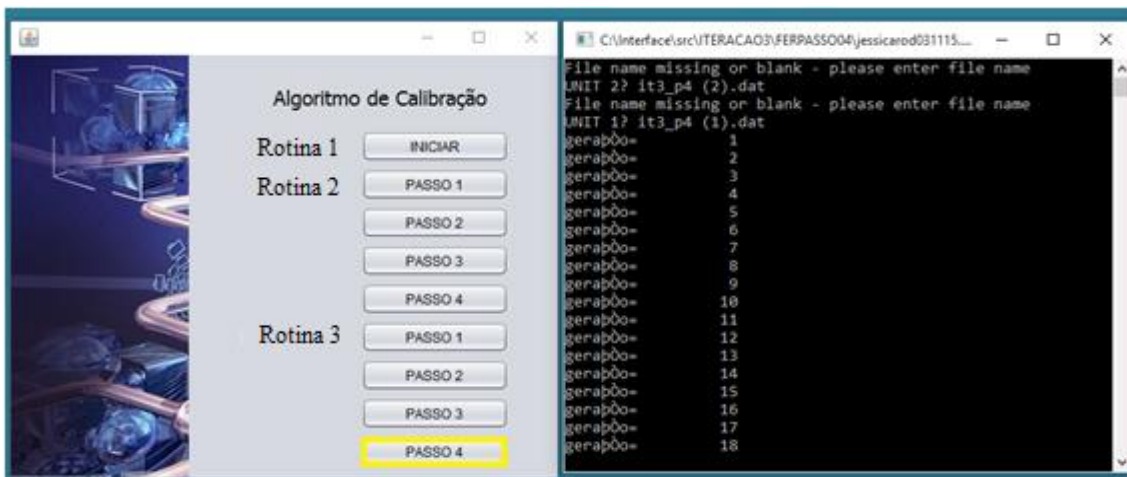


Figura 144 - Janela da interface desenvolvida - aplicação na Rotina 3: Passo 4.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise dos gráficos dos dados experimentais de variação da vazão medida ao longo do dia para 7 dias de medida demonstrou que todos os dias apresentam mesmo padrão de variação. Observa-se apenas valores inferiores de consumo de vazão no domingo (dia 21) e consumos médios no sábado (dia 27) em relação aos demais dias.

Ao analisar os gráficos da variação da pressão ao longo do tempo para a campanha de 7 dias (resultados experimentais) constata-se como comportamento padrão que a média da pressão medida no dia 21 de setembro para cada nó apresenta média superior aos demais dias, provavelmente pelo fato de se referir a um dia de domingo, ocorrendo, portanto, menor consumo de água na data. As variações de pressão indicam a presença de manobras no sistema.

Para o cálculo do consumo nodal médio dos bairros observou-se maior média para o bairro Vale dos Pinheiros (1,85 L/s), seguido do bairro Palmela (1,16 L/s) e Morada da Serra (0,83 L/s), com consumo total do setor de estudo de 3,85 L/s. O bairro Morada da Serra é o que possui maior renda média familiar, porém deve-se considerar que sua população é menor devido a muitas residências do condomínio serem apenas para passeio.

Os valores altos de rugosidade justificam-se pois foi considerada a vazão média inferior à vazão média monitorada, sendo esta uma fonte de erro. A soma das médias resulta em cerca de 8 L/s. Entretanto, de acordo com a vazão monitorada, este valor equivale à vazão mínima noturna e não à vazão média fornecida. Assim, o modelo hidráulico tendeu a aumentar a rugosidade absoluta para ajustar à perda de carga total maior devido à vazão média monitorada ser superior à vazão média calculada via consumos fornecidos pelo SAAE.

A campanha de obtenção de dados durante a madrugada que permitiu a análise de vazamentos durante a madrugada e a obtenção dos patamares de pressão e vazão que foram auxiliares para o cálculo dos coeficientes de vazamento C1 e N1 através das rotinas 2 e 3.

O único nó que não apresentou formação nítida dos patamares foi o nó 14 por ser o ponto mais distante de monitoramento e ter assim a maior perda de carga ao longo da rede, com conseqüente não formação dos patamares. Entretanto, a influência da manobra dos registros é registrada através de oscilações.

Para o ajuste dos coeficientes de vazamento C1 e N1, entre as 5 sequências aleatórias adotadas para as simulações da rotina 2, ambas convergiram para o mesmo valor dos coeficientes de vazamento C1 e N1 por área apesar da primeira sequência aleatória necessitar de um processo iterativo a mais que as outras. Esta convergência para o mesmo valor demonstra estabilidade do programa.

Para a rotina 3, todas as sequências aleatórias convergiram no terceiro processo iterativo. Nesta rotina as quatro primeiras sequências aleatórias convergiram para o mesmo valor de C1 e N1.

Ao comparar a porcentagem de ajuste entre a vazão simulada e a vazão real obtidas por Silva, B. (2003) para a rotina 1 (C1 e N1 fixos) com os valores da porcentagem de ajuste para as vazões simuladas nas rotinas 2 e 3 (onde programa ajusta C1 e N1 por zonas de pressão) conforme esperado os resultados para as rotinas 2 e 3 apresentam significativa melhora em relação a rotina 1.

A análise entre uma simulação realizada com 500 gerações em relação a uma com 200 gerações (número de gerações adotada neste estudo) demonstrou que a diferença entre os resultados obtidos para 200 e 500 gerações não é tão significativa, sendo que a diferença entre os ajustes varia entre 0,01 a 0,69% para o padrão 1 de consumo, entre 0,01 a 0,31% para o padrão 2 de consumo e entre 0,01 a 0,13% para o padrão 3 de consumo.

Para a função de aptidão, na rotina 1, ocorre variação na forma como os valores da função de aptidão variam com o processo iterativo. A sequência aleatória 1 convergiu para $3,06 \times 10^{-3}$ e as demais sementes convergiram para $3,2 \times 10^{-3}$.

Para a rotina 2, independente da combinação aleatória considerada, ambas seguiram o mesmo caminho de cálculo, tendo como valor de convergência o valor de $1,681351 \times 10^{-4}$.

E na rotina 3 conclui-se que independente da combinação aleatória considerada, as sequências aleatórias 1 a 4 seguiram o mesmo caminho de cálculo, tendo como maior Ajuste maior o valor de $1,0823 \times 10^{-4}$. A sequência aleatória 5 teve evolução diferente do cálculo ao longo das gerações, convergindo para $0,8782 \times 10^{-4}$.

Entre os nós de monitoramento em que a pressão apresentou melhor ajuste através dos coeficientes de vazamento (C1 e N1) nas rotinas 2 e 3, observa-se melhor ajuste para a rotina 2 em relação a 3 na maior parte dos nós. Pode-se observar assim que o objetivo do estudo de melhorar a calibração (rotina 1) através da inserção dos coeficientes de vazamento C1 e N1 (rotinas 2 e 3) foi atingido.

6.5. Recomendações

Para aprimoramento deste estudo, recomenda-se:

- Aplicação modelo de demanda dirigida por pressão de Tucciarelli, Criminisi e Termini (1999);
- Mais campanhas para analisar C1 e N1 – Campanhas da madrugada;
- Simulações com vários cenários, onde pode-se variar a localização de dispositivos redutores de pressão ao longo da rede, visando a diminuição dos altos valores de pressão, gerando assim novas isolinhas de pressão que sejam mais favoráveis à redução de rupturas de tubulação na rede de abastecimento.

7. REFERÊNCIAS

ABE, N. **Proposição de Calibração de Redes de Sistemas de Abastecimento de Água Através de Método Híbrido**. 2014. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-24072014-094502/pt-br.php>> Acesso em: 5 mar. 2015

ALEGRE, H. **Indicadores de desempenho de Sistemas de Abastecimento de Água – Trabalho em Curso no âmbito da IWSA**. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. 4º Congresso da Água, Lisboa, p.1-15, 1998. Disponível em: <www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/138.pdf> Acesso em: 7 nov. 2014

ALEGRE, H., COELHO, S.T., LOUREIRO, D. **Modelação e análise de Sistemas de Abastecimento de Água**. Ed.: Instituto Regulador de Águas e Resíduos & Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 2006. Disponível em: <<http://epanet-curso.lnec.pt/artigos/GT4.pdf>> Acesso em: 09 jul. 2015

ALMEIDA, E. V., FERREIRA, P. S. M., FORTUNATO, J. A., NISHIDA, P. N. O. WELSCH, R. **Modelagem Hidráulica – Uma simplificação para sistemas de distribuição de água de pequeno e médio porte**. XV SILUBESA. 2012. CD-ROM.

AQUAFLUXUS. Consultoria Ambiental em Recursos Hídricos. **Elementos do Sistema de Abastecimento de Água**. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <<http://www.aquafluxus.com.br/economia-de-agua-e-energia-uma-boa-parceria/>>. Acesso em: 7 ago. 2014.

BAKKER, M et al. Improving the performance of water demand forecasting models by using weather input. **Procedia Engineering**. Nieuwegein, p. 93-102. jan. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000149>>. Acesso em: 08 mar. 2015.

BARROS, V. F. A.; MENEZES, J. E.. Análise da relação entre a produção e o consumo de água na Grande Goiânia utilizando o Método Estatístico de Previsão de Holt-Winters. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Cascavel, v. 7, n. 7, p.1272-1282, mar. 2012. Semestral. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/index>>. Acesso em: 09 set. 2014.

BOBSIN, D. **Estudo de demanda hídrica em sistema de abastecimento de água na cidade de São Lourenço - MG**. 112 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014. Disponível em: <

https://sig.unifei.edu.br/sigaa/public/programa/defesas.jsf?lc=pt_BR&id=335> Acesso em: 29 nov. 2015.

BORGES, V.M.N.A. **Acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água a uma modelo simulador em tempo real – Estudo de caso: Sistema adutor metropolitano de São Paulo**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Hidráulica. Universidade de São Paulo, São Paulo (2003). Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-17092004-101640/pt-br.php>> Acesso em: 11 jan. 2015.

BORGES, 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 CONGRESSO 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: 04 out. 2014.

CALIMAN, R. O. (2002). **Determinação dos Parâmetros do Modelo Pressão x Vazamento para Sub-setores da Rede de Distribuição de Água de São Carlos - SP**. São Carlos. 110 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

CASTRO, M.A.H. **Uso conjunto do Autocad e do Epanet para projeto, simulação e dimensionamento de redes de abastecimento de água**. IV SEREA – Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa (Brasil), 2004. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/4serea/artigos/uso_conjunto_do_auto_cad_co.pdf> Acesso em: 5 out. 2015.

COLOMBO, F. **Calibração de Modelos Hidráulicos de Redes de Abastecimento de Água de Sistemas Reais Admitindo Vazamentos**. 2007, 200f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-05042007-103413/pt-br.php>>. Acesso: 10 abr 2015.

FARIA, S.H., CALIJURI, M.L., OLIVEIRA, J.C. **Uso de Softwares gratuitos (SPRING e EPANET) na simulação de pressão e vazão de uma rede de abastecimento de água**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 3729-3735. Disponível em: <<http://martem.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.15.49/doc/3729-3735.pdf?ibiurl.language=en>> Acesso: 19 nov. 2014

FRANGIPANI, M. **Macromedição: Guias práticos – Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água**. Brasília: Grau Design, 2007. 81 p. Disponível em: <<http://www.capacidades.gov.br/biblioteca/detalhar/id/199/titulo/guias-praticos-tecnicas-de-operacao-em-sistemas-de-abastecimento-de-agua-volume-1>>. Acesso em: 29 nov. 2014.

GALVÃO, C.O., BARBACENA, M.M., NOBRE, E.C.M. **Simulações intensivas de redes de abastecimento de água utilizando o Epanet em grande computacional**. VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2006. Disponível em: <<http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/EricaCristine0/Publica%EF%BF%BD%EF%BF%BDes/EpanetGrid.pdf>> Acesso: 1 de jun.2015

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning: AddisonWesley Professional**. Revisado. RYAN, J. Department of Mathematics. University of Colorado at Denver. 1989. Disponível em: <<http://pubsonline.informs.org/doi/pdf/10.1287/ijoc.3.2.176>> Acesso: 30 mai. 2015.

GOMES, A. S. **Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água**. - Brasília: SNSA, 2007. 5 v. Disponível em: <<http://www.capacidades.gov.br/biblioteca/detalhar/id/199/titulo/guias-praticos-tecnicas-de-operacao-em-sistemas-de-abastecimento-de-agua-volume-1>>. Acesso: 5 de outubro de 2014.

GONÇALVES, F. V.. **Previsão e Otimização de Soluções Híbridas Sustentáveis de Energia em SSA: concepção de RNA, Aplicação AG e análise experimental**. 2012. 333 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <http://fabiogoncalves.eng.br/wp-content/uploads/2012/09/tese_fabio.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2014.

GOULART, T. D. C. (2015). **Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de Distribuição de Água de Cambuí (MG)**. Itajubá, 197 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Brasil. CD-ROM.

HOLLAND, J. **Adaptation in natural and artificial systems**. Cambridge, MA, EUA: MIT Press. 1975.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/bdgpesq_googlemaps.php#tabela_dado>. **Censo 2010**. Acesso em: 20 mai 2015.

JAIN, A.; ORMSBEE, L. Short-Term water demand forecast modeling techniques: Convencional Methods Versus AI. **Journal Awwa**. Eua, p. 64-72. jul. 2002. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/41298416?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 8 jul. 2015.

JOWITT, P.W.; XU, C. (1990). **Optimal Valve Control in Water Distribution Networks**. Journal of Water Resources Planning and Management, v.116, n.4, p.455-472,

July.

KOVAR, Ju; RUCKA, Ju. **Software Tool for calibration of Hydraulic Models of water-supply networks**. Brno: Springer, 2014. 901 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=hATABAAAQBAJ&pg=PA253&lpg=PA253&dq=calibration+network+water+supply&source=bl&ots=yiZ_Dao9db&sig=dXcdXAIQfLIKb4YbI6gZtR0kHzi&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwj3m6usgcvLAhXDE5AKHePZCdgQ6AEILDAC#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 7 dez. 2015.

Lee, D. S. **Randomized Experiments from Non-random Selection in U.S. House Elections**. *Journal of Econometrics*, 142(2): 675–97. 2008. Disponível em: <<https://www.princeton.edu/~davidlee/wp/RDrand.pdf>> Acesso: 5 abr. 2015.

LAMOGLIA, H. A., SILVA, F.G.B., VIANA, A.N.C., OTTONI, A. B. **Avaliação Hidráulica de Rede de Distribuição de água da cidade de Passos – MG**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. CD-ROM.

LOURENCETTI, F. H.; ODAN, F. K.; REIS, L. F. R. **Estudo da reprodução do comportamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água via redes neurais artificiais (RNA's)**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04052012-103031/en.php>> Acesso: 7 fev. 2015.

MAIA JÚNIOR, J. V. F.. **Comparação de métodos de dimensionamento em Redes de Distribuição de Água**. 2012. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/5163>>. Acesso em: 7 fev. 2015.

MARQUES, J. A. S. **Passado e Futuro dos Sistemas Públicos de Distribuição de Água - O Caso Português**. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, Gesta*, v.1, n.1 – Sá Marques, p. 021-044, 2013 – ISSN: 2317-563X. Disponível em: <<http://www.portalseer.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7103>>. Acesso: 27 mar 2015.

MARQUES, A; SOUSA, C; CURINHA, J; MARIANO, C; YIP, A; CUNHA, A. AQUAFIELD - **Uma solução de mobilidade orientada para a gestão de ordens de trabalho em redes de água e saneamento**. In: 12.º Congresso da Água / 16.º ENASB / XVI SILUBESA, 2014, Portugal, Lisboa. Sistema de informações nos serviços de água. CD-ROM.

MASKIT, M.; OSTFELD, A.. Leakage Calibration of Water Distribution Networks. **Procedia Engineering**. Haifa, p. 664-671. jan. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814026071>>. Acesso em: 09 mar. 2015.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE C.A.V.; ALMEIDA, A.T. **Priorização de Áreas de Controle de Perdas em Redes de Distribuição de Água**. *Pesquisa Operacional*. 2010.

30 15–32. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-74382010000100002&script=sci_arttext> Acesso: 7 ago. 2014.

MOURA, V. M. **Modelação Matemática e Sistema de Informação Geográfica como suporte ao gerenciamento de sistema de abastecimento de água – Subsistema CoopHEMA de Cuiabá / MT**. Cuiabá, MT Instituto de Ciências Exatas e da Terra, 2006. Disponível em: <http://www.pgfa.ufmt.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=82&Itemid=37>. Acesso: 30 out. 2014.

NAZARÉ, A.V.B., SOUZA, V.C.B. **Modelagem e Simulação do Sistema Adutor Principal da Bacia Leiteira utilizando o Epanet**. 2011. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=81&PAG=16>>. Acesso: 7 mai. 2015.

NETTO, C. G.. Sistema controla perdas de água em redes de distribuição. **Jornal da Unicamp**. Campinas, p. 9. 30 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/621/sistema-controla-perdas-de-agua-em-redes-de-distribuicao>>. Acesso em: 30 de junho 2015

NEVES, C. L.. **Calibração de Parâmetros de Modelos de Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede**. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental: Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2007. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/2666>> Acesso: 19 nov. 2014.

NEVES, C. L., KOIDE, S., VASCONCELOS NETO, J. G., MARTINEZ, D. S. A. **Análise de Interferência dos Parâmetros de entrada na calibração de uma rede de distribuição de água usando problema inverso e algoritmos genéticos**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=19&PAG=10>> Acesso: 15 set. 2014.

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: 8 mai 2015.

ODAN, F. et al. **Use of Metamodels in Real-Time Operation of Water Distribution Systems**. *Procedia Engineering*, v. 89, p. 449-456, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814023261>>. Acesso: 9 mai 2015.

OLAIA, A.I.S. **Gestão de Sistema de Abastecimento de Água através de Modelação Hidráulica**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente - Perfil Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Lisboa. 2012. Disponível em: <http://run.unl.pt/bitstream/10362/8228/1/Olaia_2012.pdf>. Acesso: 11 jun. 2014.

OLIVEIRA, G. G.. **Abordagem estocástica para análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro**. 2014. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/115215>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

ORMSBEE, L. E., LINGIREDDY, S. **Calibrating Hydraulic Network Models**. Vol 89, Issue 2, Journal AWWA, 1997. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/229849487_Calibration_of_Hydraulic_Network_Models>. Acesso: 04 out 2014.

PEREIRA, M. V. F. G. **Implementação e Monitorização de uma Zona de Medição e Controlo no Sistema de Abastecimento de Matosinhos**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/6931>>. Acesso: 12 set. 2014.

PIZZO, H. S.; LUVIZOTTO, Edevar. Calibração de modelos de distribuição de água através do Algoritmo de Nelder-Mead. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** . Juiz de Fora: Abes, 2001. p. 1 - 16. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228642679_I-024>. Acesso em: 7 out. 2014.

PNUD. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento**, 2013. Disponível em <http://atlasbrasil.org.br/2015/perfil/sao-lourenco_mg>. Acesso em 20 out. 2015.

PRIETO, M. A. Mathematical model as a standard procedure to analyze small and large water distribution networks. **Journal Of Cleaner Production**. Dublin, p. 541-554. 01 nov. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614012967>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

PUUST, R; A VASSILJEV,. Real Water Network Comparative Calibration Studies Considering the Whole Process from Engineer's Perspective. **Procedia Engineering**. Tallinn, p. 702-709. jan. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814026125?np=y>>. Acesso em: 05 fev. 2015.

RIBEIRO, D. L. C.. **Estudos de Calibração da Rede de Distribuição de Água de São Lourenço – MG tendo em vista a eficiência Hídrica e Energética**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2014.

ROCHA, V. A. G. M., CASTRO, M. A. H., ARAÚJO, J. K. **Calibração de rugosidades em redes de abastecimento a partir de gradientes hidráulicos através de método iterativo**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009. Disponível em: <<https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=110&PUBLICACAO=SIMPÓSIO>>. Acesso: 9 out. 2014.

SALVINO, M. M. **Modelagem Computacional Visando a Reabilitação de Redes Hidráulicas**. 2012, 166p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012. Disponível em: <www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Tese_Moises.pdf>. Acesso: 9 out. 2014.

SALVINO, M. M., et al.. **Modelo Iterativo de Calibração de Redes de Abastecimento de Água com Vistas à Reabilitação**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011. Disponível em:< <http://docplayer.com.br/8387901-Xix-simposio-brasileiro-de-recursos-hidricos-modelo-iterativo-de-calibracao-de-redes-de-abastecimento-de-agua-com-vistas-a-reabilitacao.html>>. Acesso: 9 jul. 2015

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) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/11606321-Previsao-de-demanda-de-agua-na-regiao-metropolitana-de-sao-paulo-com-redes-neurais-artificiais-e-condicoes-socioambientais-e-meteorologicas.html>>. Acesso em: 26 abr. 2015.

SANTOS, M. A. F. **Simplificação de Sistemas de Distribuição de Água**. 2013. 79f. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura de Construção Civil) - Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco, Portugal, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ipcb.pt/bitstream/10400.11/2382/2>. Acesso: 5 de setembro de 2014.

SÃO LOURENÇO, (Org.). **Federação de Balonismo de MG**. 2015. Disponível em: <<http://www.saolourencomg.com/federacao-de-balonismo-do-estado-de-mg-sede-em-sao-lourenco/>>. Acesso em: 09 dez. 2015.

SHABANI, S; NASER, G. Dynamic Nature of Explanatory Variables in Water Demand Forecasting. **Procedia Engineering**. Kelowna, p. 781-787. ago. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815026041>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

SILVA, N. A. S.; LUVIZOTTO, E. **Indicadores de gestão para sistemas de abastecimento de água**. São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.lrh.ct.ufpb.br/serea/trabalhos>>. Acesso em: 15 ago. 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. CD-ROM.

SILVA, S. F.. **Análise da disponibilidade e demanda para o sistema de abastecimento de água de Salvador frente a cenários de mudanças climáticas**. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meio Ambiente, Águas e Saneamento, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012. Disponível em: <<http://www.maasa.eng.ufba.br/dissertacoes/analise-da-disponibilidade-e-demanda-para-o-sistema-de-abastecimento-de-agua-de-salvado>>. Acesso em: 10 set. 2014.

SILVA, C. O. **Modelagem de Rede de Distribuição de Água com Ênfase no Controle de Perdas**. 2014. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/cleyton.pdf>> Acesso: 4 out. 2014.

SOARES, A. K. **Calibração de Modelos de Rede de Distribuição de Água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. 2003, 178f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13102004-150130/pt-br.php>>. Acesso: 14 abr. 2015.

SOUSA JÚNIOR, J.C.S. **Distritos de medição e controle como ferramenta de gestão de perdas em redes de distribuição de água. XII Simpósio Ibero Americano**. Serea 2013. Disponível em: <<http://www.colpos.mx/wb/index.php/notas-informativas/simposio-iberoamericano-sobre-sistemas-de-abastecimiento-de-agua-y-drenaje-urbano>> Acesso: 15 mai 2015.

TRATA BRASIL (Brasil) - Instituto. Oscip - Organização da Sociedade Civil de Interesse Público (Org.). **Perdas de água dificultam o avanço do saneamento básico e agravam o risco de escassez hídrica no Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/perdas-de-agua-dificultam-o-avanco-do-saneamento-basico-e-agravam-o-risco-de-escassez-hidrica-no-brasil>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

PNUD. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento**, 2013. Disponível em <http://atlasbrasil.org.br/2015/perfil/sao-lourenco_mg>. Acesso em 20 out. 2015.

TORRES, P. A. S.. **Controlo de Perdas Reais em Sistemas de Abastecimento de Água Monitorização e Reparação de Fugas**. 2014. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Construções Cívicas-ramo Ambiente, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viano do Castelo - Portugal, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ipv.pt/bitstream/123456789/1147/1/Paulo_Torres.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2014.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. M. C. **Gestão da Água no Brasil**. Brasília: Unesco, 2001. 178 p. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001298/129870POR.pdf>>. Acesso em: 6 jun. 2014.

VENTURINI, M. A. A. G.. **Metodologia de Análise e decisão multicriterial para a reabilitação de Sistemas de Abastecimento de Água**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil - Unicamp, Campinas, 2003. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000418835>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

VIEIRA, A. S. et al. Simulação, via Programação Linear Sequencial com Artíficos de Linearização, para Sistema de Recursos Hídricos Parte 1 e Parte 2: Modelo e Aplicação. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Brasília, v. 17, n. 1, p.33-

51, jan. 2012. Trimestral. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=61>>. Acesso em: 17 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.

ANEXOS

Anexo A – Características do Conjunto Motobomba 1 que abastece o setor 4

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO			
PLANO DE MANUTENÇÃO DE CONJUNTO MOTOBOMBA			
EEAT4 - CONJUNTO 1	Ø Rotor (mm): 185,1 Trocado em: Obs:	Aperta Gaxeta Trocado em: Reparo em: Obs.:	Retentores Nº- Trocado em: Obs.:
Bomba Centrífuga Horizontal Marca: IMBIL Mod.: ITAP 80-200 Linha: SÉRIE 83245 Vazão:(M3/H): 144 HM (M.C. A): 61 Bocal Recalque (MM): 80 Bocal Sucção (MM): 100 R.P.M.: 3560	Gaxeta ("): Trocado em: Obs:	Tampa de pressão Trocado em: Motivo:	Rolamento Bomba Diant. Nº.: Trocado em:
MOTOR	Luva Protetora Eixo Trocado em: Obs:	Eixo Bomba Trocado em: Reparo em: Motivo:	Lubrificação DATA
Marca: VOGES Mod.: U 225 S/M2-1558 Hz: 60 R.P.M.: 3560 F.S.: 1.15 CAT.: N I.P.: 65 Potência(CV/KW): 60 / 45 Tensões:(V): 220/380/440 Correntes:(A): 137 Ip/In Isol.	RECUPERADO EM		
Correntes de trabalho Inicial(A): Data In.Func.	Rolamento motor Diant. Nº- Trocado em: Tras. Nº- Trocado em:	Proteção e Partida Tipo: QCM -	Rebobinado Em: Motivo:
OBSERVAÇÃO			
Acoplamento: Flexível de alta performance - Tipo A (Pneu) Tamanho A35 - Torque: 127 Nm Furos: Ømáx.= 32 mm / Ømín.= 10 mm			

Parafuso Cabeça Hexagonal: 5/16" x 7/8" - 16 unidades			
PLANO DE MANUTENÇÃO			
COMPONENTES	DIARIAMENTE	SEMANALMENTE	ANUALMENTE
MOTOR COMPLETO	INSPEÇÃO DE RUIDOS E VIBRAÇÃO		REAPERTAR PARAFUSOS
ROLAMENTOS	CONTROLE DE RUIDOS	REENGRAXAR	
CAIXA DE LIGAÇÃO			LIMPAR INTERIOR E REAPERTO PARAFUSOS
ACOPLAMENTO		APÓS 1ª SEMANA: CHEQUE ALINHAMENTO E FIXAÇÃO	CHEQUE ALINHAMENTO E FIXAÇÃO
DISPOSITIVOS DE MONITORAMENTO	REGISTRE OS VALORES DE MEDIÇÃO		
FILTRO			LIMPEZA
ÁREAS DOS ANÉIS		CONTROLE E LIMPEZA	
GAXETAS		VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTO	
SELO MECÂNICO		VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTO	
OBS: TROCAR ROLAMENTOS NOVOS (CONFORME INSTRUÇÃO DO FABRICANTE) NA OPORTUNIDADE FAZER REVISÃO COMPLETA.			

Anexo B – Características do Conjunto Motobomba 2 que abastece o setor 4

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO			
PLANO DE MANUTENÇÃO DE CONJUNTO MOTOBOMBA			
EEAT4 - CONJUNTO 2	Ø Rotor (mm): 186	Aperta Gaxeta	Retentores
Bomba Centrífuga Horizontal Marca: IMBIL Mod.: 80-200 Linha: Vazão:(M3/H): 142,27 HM (M.C. A): 60,2 Bocal Recalque (MM): 108 Bocal Sucção (MM): 121 R.P.M.: 3500	Trocado em: Obs:	Trocado em: Reparo em: Obs.:	Nº- Trocado em: Obs.:
	Gaxeta ("):	Tampa de pressão	Rolamento Bomba
	Trocado em: Obs:	Trocado em: Motivo:	Diant. Nº-:. Trocado em:
MOTOR	Luva Protetora Eixo	Eixo Bomba	Lubrificação DATA
Marca: EBERLE Mod.: B 200 L2 Hz: 60 R.P.M.: 3540 F.S.: 1.15 CAT.: N	Trocado em: Obs:	Trocado em: Reparo em: Motivo:	
	RECUPERADO EM		
	Rolamento motor	Proteção e Partida	Rebobinado

I.P.: 55 Potência(CV/KW): 60 / 45 Tensões:(V): 220/380/440 Correntes:(A): 138 Ip/In: 7,7 Isol.: F Correntes de trabalho Inicial(A): Data In.Func.	Diant. Nº- Trocado em: Tras. Nº- Trocado em:	Tipo: QCM -	Em: Motivo:
OBSERVAÇÃO			
Acoplamento: Flexível de alta performance - Tipo A (Pneu) Tamanho A35 - Torque: 127 Nm Furos: Ømáx.= 32 mm / Ømín.= 10 mm Parafuso Cabeça Hexagonal: 5/16" x 7/8" - 16 unidades			
PLANO DE MANUTENÇÃO			
COMPONENTES	DIARIAMENTE	SEMANALMENTE	ANUALMENTE
MOTOR COMPLETO	INSPEÇÃO DE RUIDOS E VIBRAÇÃO		REAPERTAR PARAFUSOS
ROLAMENTOS	CONTROLE DE RUIDOS	REENGRAXAR	
CAIXA DE LIGAÇÃO			LIMPAR INTERIOR E REAPERTO PARAFUSOS
ACOPLAMENTO		APÓS 1ª- SEMANA: CHEQUE ALINHAMENTO E FIXAÇÃO	CHEQUE ALINHAMENTO E FIXAÇÃO
DISPOSITIVOS DE MONITORMENTO	REGISTRE OS VALORES DE MEDIÇÃO		
FILTRO			LIMPEZA
ÁREAS DOS ANÉIS		CONTROLE E LIMPEZA	
GAXETAS		VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTO	
SELO MECÂNICO		VERIFICAÇÃO DE VAZAMENTO	
OBS: TROCAR ROLAMENTOS NOVOS (CONFORME INSTRUÇÃO DO FABRICANTE) NA OPORTUNIDADE FAZER REVISÃO COMPLETA.			

Anexo C – Características do Conjunto Motobomba do Bôoster instalado no bairro Morada da Serra.

Bomba Franklin - Modelo BC-92GA	
Vazão	9,13 m ³ /h
Altura manométrica	24,30 mca
Diâmetro do rotor	140 mm
Motor Weg	Alto rendimento
Potência	1,50/1,10 (CV/kW)
Tensão	220V
Rotação	3460 RPM
IP	21
FS	1,30

Anexo D – Figuras da variação da pressão em função do tempo obtidos na campanha de campo de madrugada para determinação dos coeficientes de vazamento.

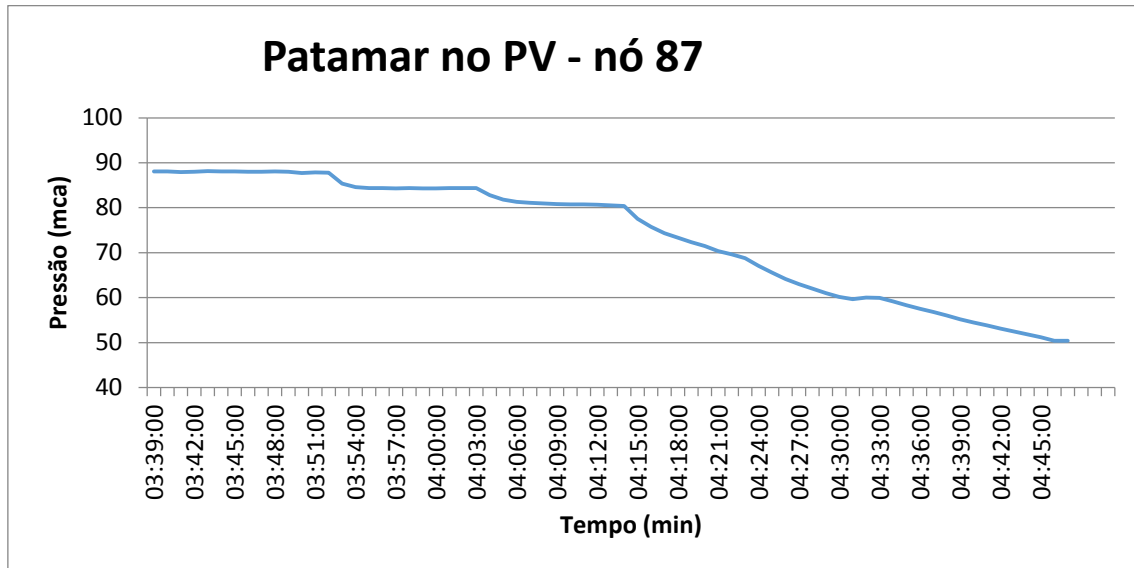


Figura 145 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 87.

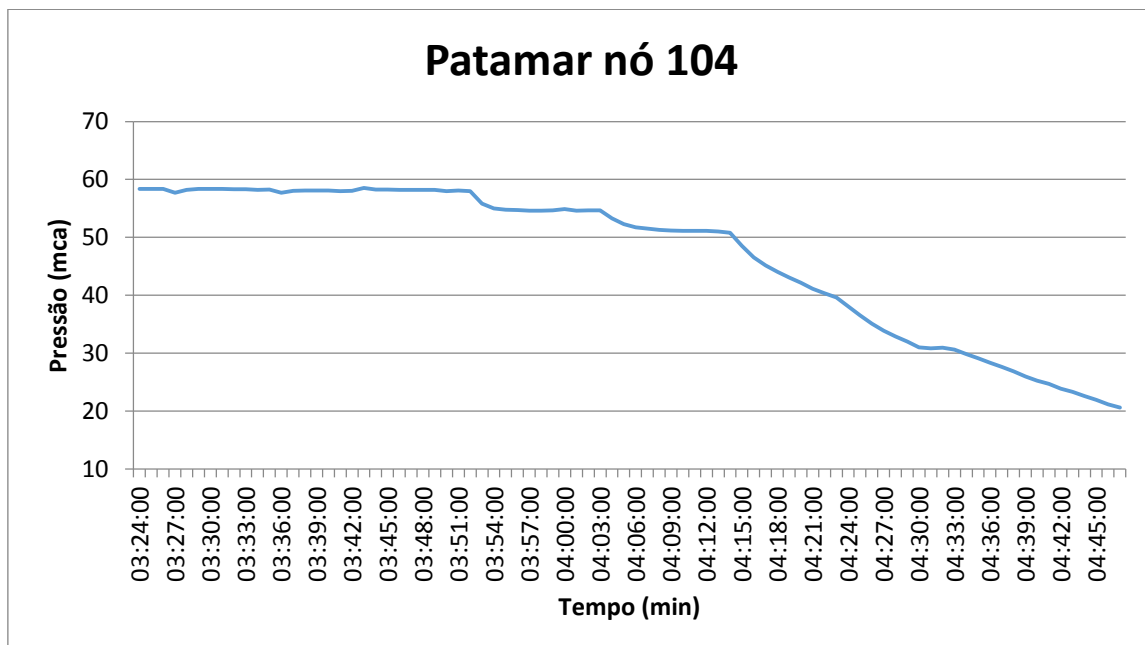


Figura 146 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 104.

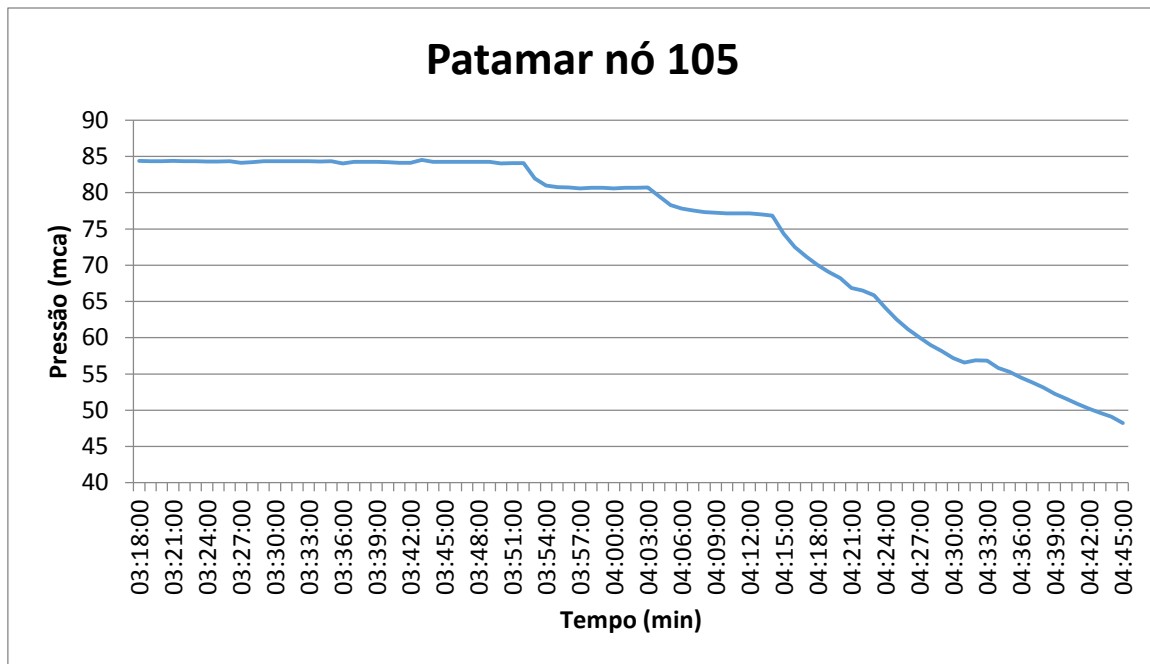


Figura 147 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 105.

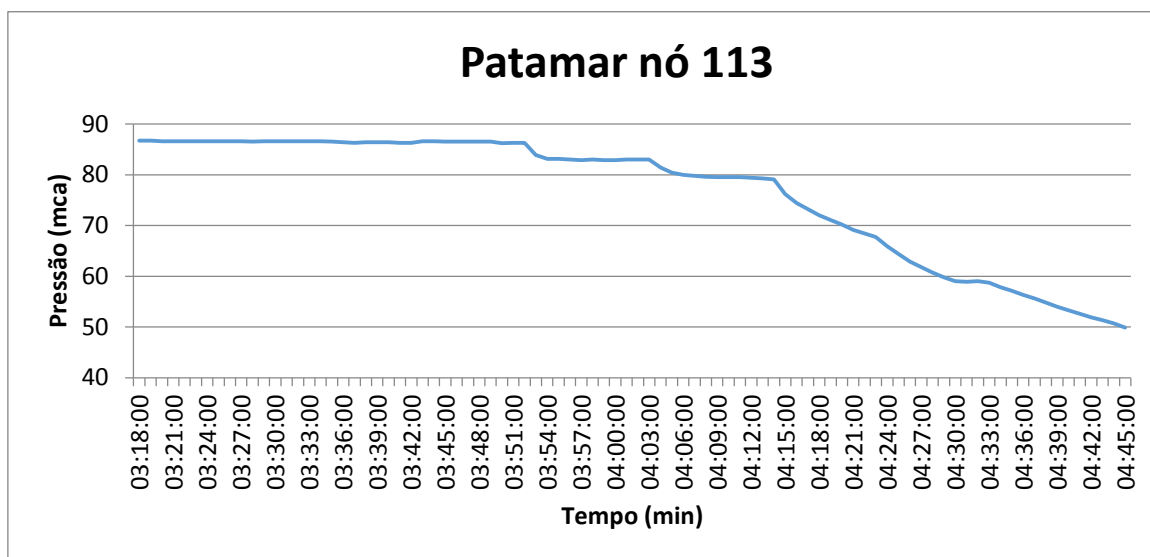


Figura 148 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 113.

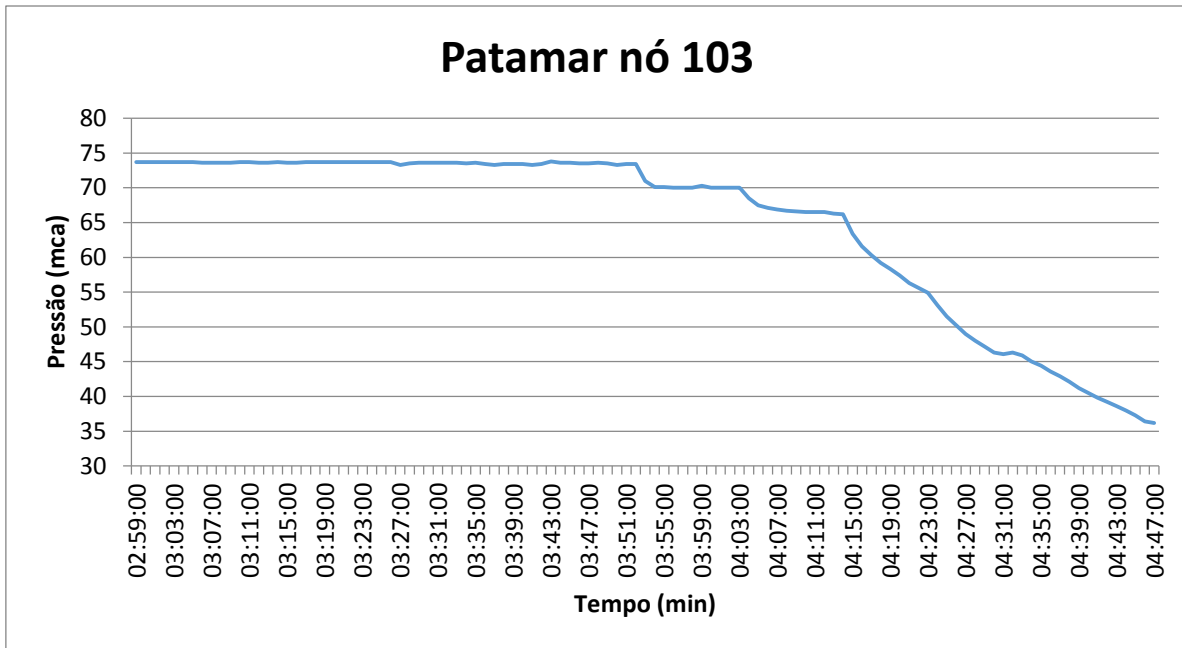


Figura 149 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 103.

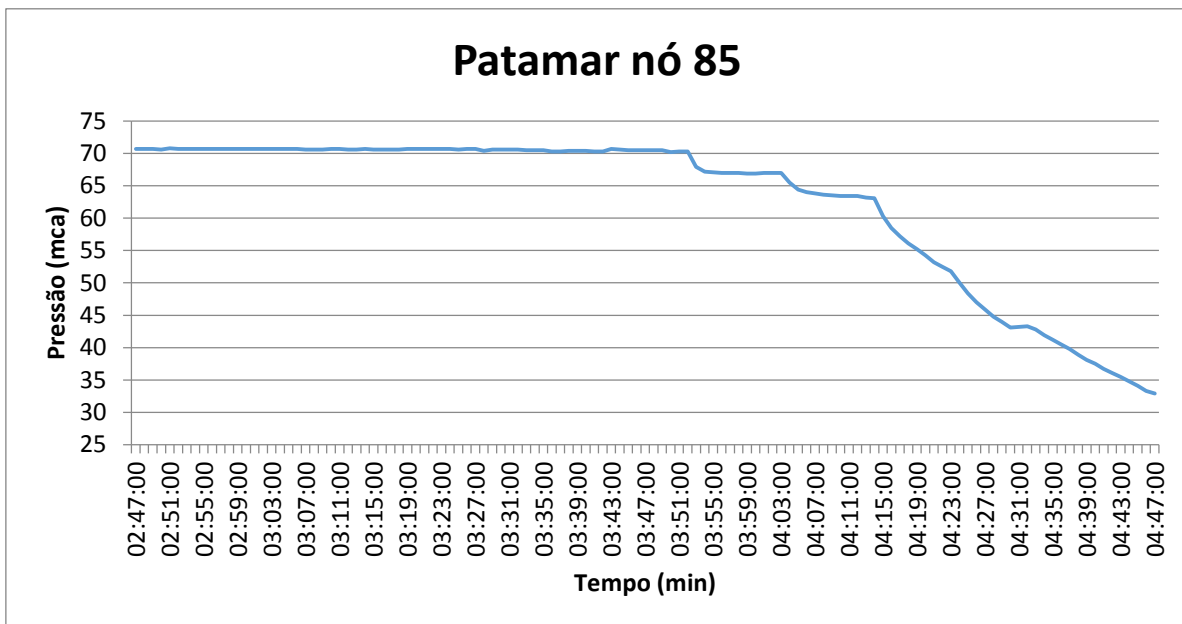


Figura 150 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 85.

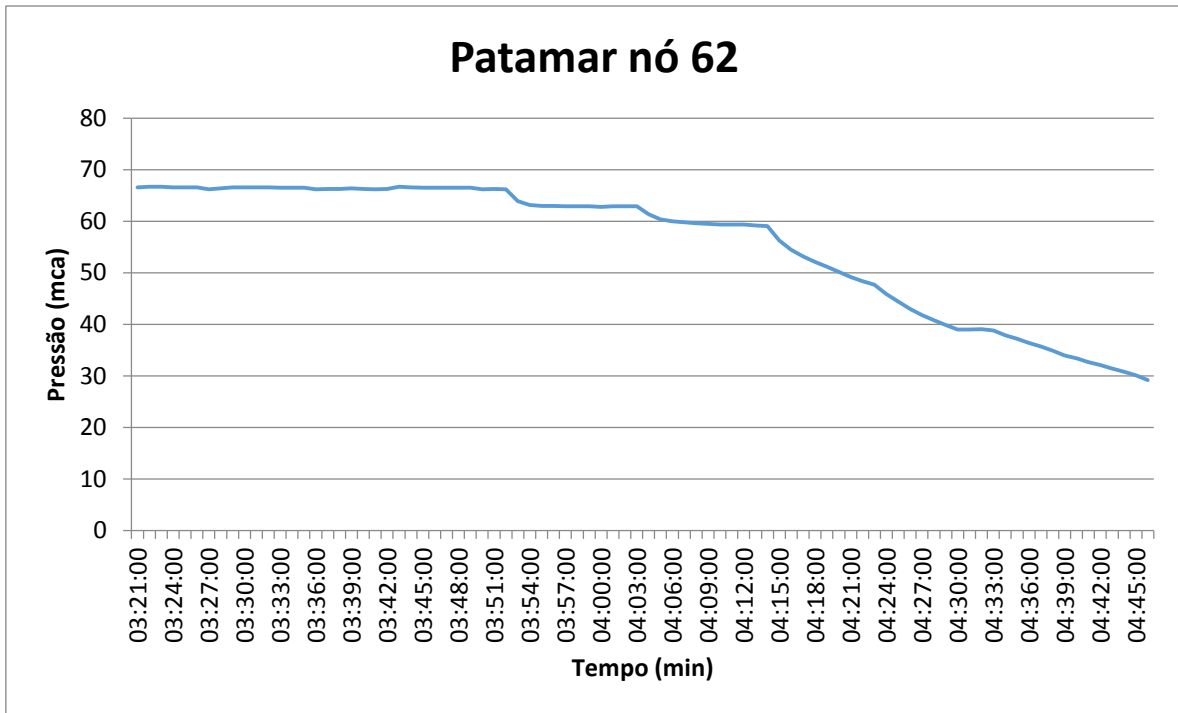


Figura 151 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 62.

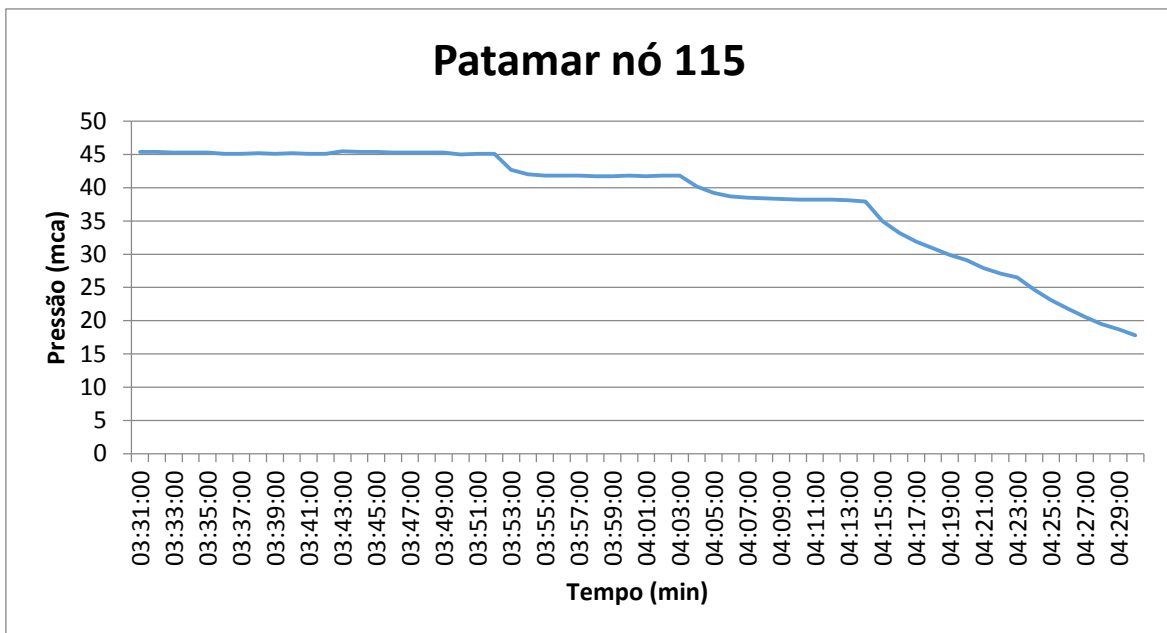


Figura 152 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 115.

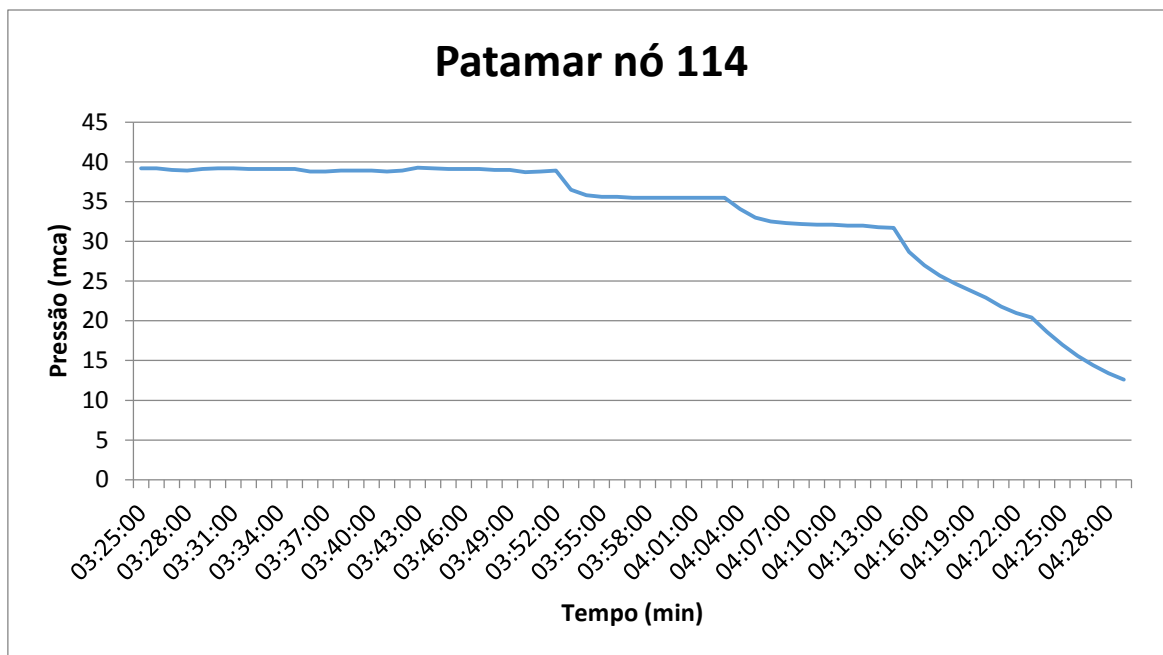


Figura 153 - Variação da pressão em função do tempo na campanha de madrugada - formação dos patamares do nó 114.