

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

Diego Levit de Castro Ribeiro

Estudos de Calibração da Rede de Distribuição de Água de São Lourenço – MG tendo
em vista a eficiência Hídrica e Energética

Setembro de 2014

Itajubá - MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA DE ENERGIA

DIEGO LEVIT DE CASTRO RIBEIRO

ESTUDOS DE CALIBRAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DE SÃO LOURENÇO – MG TENDO EM VISTA A EFICIÊNCIA HÍDRICA E ENERGÉTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração:Energia e Meio Ambiente - ESMA

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

Setembro de 2014

Itajubá - MG

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a Yasmin, Davi, Morani, Pedro, Tallys, Caroline, Rafaela, Estela, Igo, Inez, Inéria, Rosária e Conceição, raízes fortes que crescem e se fortificaram em meu coração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, toda força criadora, de prover condições e forças para realizar esse trabalho e essa pesquisa, além de prover o sentimento de satisfação por todo o esforço gasto.

Agradeço ao orientador da pesquisa, Professor Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, pela orientação e por possibilitar a pesquisa nessa área de concentração, cujo em sua ausência não seria possível realizar os estudos voltados a esse tema. Imensa gratidão de aparecer em um momento onde as coisas não seriam possíveis sem o seu apoio, além de todo o tempo dedicado gerando sinergia ao trabalho e o brotar da nossa amizade.

Agradeço também a todos os professores que ministraram as disciplinas durante o curso de mestrado, agregando informações de ótima qualidade e ensinamentos, todos quais foram utilizados direta ou indiretamente na construção desse trabalho.

A Mestra Hellen Antunes Lamoglia, pela competência e ótima pesquisa realizada em seu trabalho de mestrado, trabalho qual forneceu uma base de ótima qualidade a realizar esse trabalho, levantando informações de valores inestimáveis ao desenvolvimento da pesquisa. Uma entre muitos parceiros na pesquisa que mostram que sozinhos não conseguimos ir longe.

A Mestranda Thaisa Dias Goulart, amiga e parceira de pesquisa, pelo trabalho conjunto realizado, onde muitos momentos de aprendizado, trabalho e amizade se uniram, fazendo a pesquisa se frutificar até alcançarmos ótimos resultados e avanços em nossas pesquisas. Sua presença, amizade e parceria foram elementos chave no desenvolvimento dessa pesquisa.

A toda a equipe do SAAE de São Lourenço , em especial ao Diretor Hemerson Jader Cunha, por dispor todo o tempo e apoio necessários para a pesquisa. Cada elemento disponibilizado momentos de atenção foram fundamentais para a concretização do estudo. Um agradecimento especial ao técnico Cláudio (Zóinho), pela grande amizade e pela parceria no trabalho na rede, de onde surgiram grandes momentos divertidos, sobretudo um trabalho na rede de ótima qualidade.

A professora Dra. Nívea Pons, pela gentileza de disponibilizar os equipamentos do laboratório de geoprocessamento, o que gerou grande agilidade na aquisição dos dados.

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.

Oswaldo e Tiago Correa, pelo auxílio necessário nos treinamentos dos equipamentos utilizados no laboratório de hidráulica, sanando muitas dúvidas ajudando na solução de diversos problemas.

Minha mãe, Maria Inez, que faz da minha vida um caminhar mais suave, por todo incentivo, dedicação, apoio e amor.

A mulher á quem eu tenho um amor sem tamanho, Caroline Carvalho, por todos os dias de vida caminhando e lutando lado a lado, por todas alegrias e pelo amadurecimento único que veio até nós a partir do momento em que demos as mãos.

Aos meus filhos, Morani e Davi, que regam minha vida com muita felicidade, que os frutos e esforço desse trabalho contribuam sendo um dos tantos caminhos para uma vida mais harmoniosa e com mais igualdade para nosso mundo. Amo vocês.

A toda gurizada, Yasmin, Davi, Morani, Pedro e Talys, flores dessa vida que levam cores, sons, cheiros e muita alegria no jardim da minha alma banhada em toda essa energia divina.

Meus irmãos, Igo, Estela e Rafaela, por todo sentimento de harmonia que conseguimos unir nessa caminhada, sentimento precioso que traz muita alegria a nossas vidas.

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. Agradeço também a FAPEMIG por todo apoio dado aos estudos através do Projeto Pesquisador Mineiro (PPM 06633-11). 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.

As incontáveis pessoas que contribuíram para esse trabalho, de forma tão indireta, mas tão importante, que se torna imensurável dizê-las todas ou porque agradecê-las, ficando somente o sentimento de gratidão.

RESUMO

Este trabalho mostra a continuação de uma série de pesquisas realizadas no setor da rede de distribuição de água de São Lourenço – MG. Enquanto o estudo anterior feito por LAMOGLIA (2013) realizou uma correlação entre perdas de água e energia elétrica no setor estudado, constituído por três bairros, o presente trabalho dá sequência às pesquisas, utilizando da base de informações adquiridas através do estudo anterior para a calibração da rede utilizando um modelo proposto por SILVA (2003), tendo o foco o aumento da eficiência hídrica e energética do sistema. O trabalho consiste em uma aquisição de uma série de informações com a companhia distribuidora de água responsável, SAAE de São Lourenço – MG, além de diversas campanhas de campo onde dados são obtidos com o intuito de se realizar a modelagem matemática da rede e posteriormente realizar uma análise aprofundada dos dados, utilizando-os para a tomada de decisões na rede, visando à diminuição de perdas de água que ocorrem através de vazamentos, refletindo também no consumo de energia bombeada ao reservatório que abastece o sistema. A calibração, a simulação hidráulica mais o memorial de cálculos que leva a estimativa de volumes perdidos na rede e seus respectivos custos permitiram estabelecer alternativas práticas para o aumento da eficiência hídrica e energética, contribuindo com a melhoria do sistema.

Palavras-chave: Sistemas de abastecimento de água, perdas de água, coleta de dados, modelagem matemática, calibração de redes, eficiência hídrica e energética.

ABSTRACT

This work is the continuation of a series of searches made in a sector of water distribution system in São Lourenço – MG. While the previous study made by LAMOGLIA (2013) made a relationship between water losses and energy consumption in the sector of study, made in three neighborhoods, the present work give sequency of the previous searches using a data base aquired by the previous study for the calibration ofwater distribution system, using a model proposed by SILVA (2003), taking aim in the growth of a hydric and energetic efficiency in the system. The work consists in acquiring a serie of informations with the responsable water system distribution company, SAAE of São Lourenço – MG. In addition, several field campaigns where data are colected with the pruporse to perform a mathematical modeling in the water network and after that, perform a deep data analysis, using them to take decisions in the water distribucion system, in order to decrease the water losses that occurs by the leaks, reflecting too on the consumption of the electrical energy which pump water to reservoirs that supplies the system. The calibration, the hidraulic simulation and the memorial of calculations lead a estimated lost volume in the the system and their respective costs allow to set up practical alternatives to the growth of the hydraulic efficiency and energy, contributing to the improvement of the system.

Key words: Water distribution system, water losses, data collection, mathematical modeling, calibration network, hydraulic efficiency and energy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de um sistema de distribuição de água.....	11
Figura 2 – Concepção de um sistema de abastecimento de água.....	21
Figura 3 – Esquematização das perdas de água em sistemas de distribuição de água.....	21
Figura 4 – Diferentes tipos de vazamentos na rede.....	25
Figura 5 – Diferentes tipos de vazamentos na rede de distribuição.....	26
Figura 6 - Fluxograma dos modelos AGS e AGH.....	37
Figura 7 - Tipos de algoritmos de correções.....	38
Figura 8 – Fluxograma ilustrando fatores necessários a previsão de demanda de água na rede de distribuição.....	41
Figura 9 – Relação entre índice de perdas e pressão.....	61
Figura 10 – Fluxograma básico da pesquisa.....	63
Figura 11 – Localização dos bairros do setor de estudos.....	66
Figura 12 – Distâncias entre o município de Itajubá e São Lourenço.....	67
Figura 13 – Esquema de todo o sistema de abastecimento do município.....	70
Figura 14 – Localização dos componentes principais da rede de distribuição.....	71
Figura 15 – Localização do ponto de captação de água bruta – Rio Verde.....	72
Figura 16 – Sistema de captação de água bruta.....	73
Figura 17 – Localização da ETA.....	74
Figura 18a – Localização do reservatório da estação elevatória Vila Nova.....	76
Figura 18b – Reservatório Solar dos Lagos.....	77

Figura 19 – Conjunto moto bomba que abastece o bairro Solar dos Lagos. O primeiro conjunto moto bomba (azul escuro) encontra-se desativado.....	79
Figura 20 – Esquema dos setores estudados.....	82
Figura 21 – Setor estudado da rede de distribuição de água de São Lourenço/MG.....	84
Figura 22 – Inserção de uma base (estaca de madeira e prego no centro) na entrada do setor	84
Figura 23 – DGPS base e movel.....	85
Figura 24 – Uso do geofone na rede em estudo.....	86
Figuras 25 – Datalogger instalado em torneira residencial.....	87
Figuras 26 – Datalogger instalado em caixa residencial.....	87
Figura 27 – Programa utilizado para descarregar dados do logger.....	87
Figura 28 – Medidores ultrassônicos de vazão instalados na EEA Vila Nova e na entrada do setor, respectivamente.....	88
Figura 29 – Medidores ultrassônicos de vazão instalados na EEA Vila Nova e na entrada do setor, respectivamente.....	88
Figura 30 – Porcentagens referentes ao custo de captação e tratamento de água.....	96
Figura 31 – Porcentagens referentes ao custo da estação elevatória nos bairros.....	97
Figura 32 – Estimativa das perdas e seus custos para o setor estudado.....	98
Figura 33 – Estimativa das perdas e seus custos para toda a rede de distribuição.....	99
Figura 34 – Rede de distribuição dos 3 bairros estudados simulados no EPANET depois de coletados todos os dados de entrada necessários ao simulador.....	104
Figura 35 – Esquema do traçado da rede com os nós onde foram instalados os loggers e o	

local de vazamento.....	105
Figura 36 – Pressões máximas, médias e mínimas dos nós monitorados na rede.....	107
Figura 37 – Gráfico de vazão na entrada do setor.....	108
Figura 38 – Vazamento ocorrido durante as medições.....	109
Figura 39 – Registros de pressão na entrada do sistema (PV).....	110
Figura 40 – Registros de pressão, nó 8.....	112
Figura 41 – Registros de pressão, nó 16.....	112
Figura 42 – Registros de pressão, nó 51.....	113
Figura 43 – Registros de pressão, nó 85.....	114
Figura 44 – Registros de pressão, nó 104.....	115
Figura 45 – Registros de pressão, nó 105.....	116
Figura 46 – Registros de pressão, nó 106.....	117
Figura 47 – Registros de pressão, nó 107.....	118
Figura 48 – Registros de pressão, nó 108.....	119
Figura 49 – Registros de pressão, nó 109.....	120
Figura 50 – Registros de pressão, nó 110.....	120
Figura 51 – Booster localizado no bairro Moradas da Serra.....	121
Figura 52 – Evolução da função de aptidão ao longo das iterações dos AGS.....	124
Figura 53 – Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 12.....	125
Figura 54 – Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 14.....	126

Figura 55 – Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 18.....	126
Figura 56 – Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 37.....	127
Figura 57 – Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 64.....	127
Figura 58 – Variação nos níveis de pressão para cada nó com uso das sementes aleatórias...	130
Figura 59 – Variação nos níveis de pressão para cada nó com uso das sementes aleatórias...	131
Figura 60 – Variação nos níveis de pressão para cada nó com uso das sementes aleatórias...	132
Figura 61 – Esquema de perda de carga na rede e coleta de dados de pressão.....	134
Figura 62 – Traçado da rede no condomínio Moradas da Serra.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice de perdas na distribuição (indicador IN049) dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2010, segundo tipo de prestador de serviços, região geográfica e Brasil.....	2
Tabela 2 – Valores de consumo médio <i>per capita</i> de água dos prestadores de serviços participantes do SNIS, nos anos de 2009 e 2010, segundo estado, região geográfica e Brasil....	3
Tabela 3: Limites para as pressões dinâmica e estática.....	18
Tabela 4 – Problemas de maior frequência em sistemas de abastecimento.....	22
Tabela 5 – Relação do índice de perdas e situação do sistema.....	24
Tabela 6 - Restrições explícitas.....	36
Tabela 7 – Aplicando uma nova tipologia para os diferentes simuladores utilizados em uma modelagem integrada.....	49
Tabela 8 – Aplicando uma nova tipologia para os diferentes simuladores utilizados em uma modelagem integrada.....	50
Tabela 9 – Relação entre valores de N_1 e material da tubulação na rede de distribuição.....	59
Tabela 10 - Relação de redução de carga X redução de perdas.....	60
Tabela 11 – Etapas da metodologia.....	64
Tabela 12 – Lista de Características necessárias ao estudo.....	68
Tabela 13 – Dados nominais dos conjuntos moto bomba na captação.....	74
Tabela 14 – Dados nominais dos conjuntos moto bomba na ETA.....	75

Tabela 15 – Dados nominais dos conjuntos moto bomba na EEA que abastece o bairro Solar dos Lagos.....	77
Tabela 16 – Bairros abastecidos e setores estudados.....	80
Tabela 17: Dados disponíveis por intermédio do SAAE e mensurados em campo.....	81
Tabela 18: Tempo para aquisição de dados com a base do DGPS em diferentes localidades.....	84
Tabela 19 – Numero de economias e volume medido para o bairro Vale dos Pinheiros.....	89
Tabela 20 – Numero de economias e volume medido para o bairro Moradas da Serra.....	89
Tabela 21 – Numero de economias e volume medido para o bairro Palmela.....	90
Tabela 22 – Volumes de água em todo o sistema.....	91
Tabela 23 – Gasto mensal da estação de tratamento de água e da estação elevatória de água....	92
Tabela 24 – Custo unitário para os bairros estudados.....	93
Tabela 25 – Índices de perdas calculados.....	93
Tabela 26 – Valores de vazão utilizados no fator de pesquisa.....	94
Tabela 27 – Fator de pesquisa as 3 e as 4 horas.....	94
Tabela 28 – Vazão de perdas e dados adjacentes.....	95
Tabela 29 – Volume perdido e seu custo mensal.....	97
Tabela 30 – Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 no bairro Palmela.....	100
Tabela 31 – Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 no bairro Vale dos	

Pinheiros.....	101
Tabela 32 – Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 no bairro Moradas da Serra.....	102
Tabela 33 – Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 dos bairros estudados.....	102
Tabela 34 – Valores de pressões médias, máximas e mínimas medidas ao longo dos nós da rede e sua relação horária.....	106
Tabela 35 – Comparação de valores de rugosidade para alguns trechos obtidos pelo modelo de simulação utilizando as sementes aleatórias.....	129
Tabela 36 – Critérios de desempenho de modelos de calibração segundo Water Research Center.....	133
Tabela 37 – Reajuste nos valores medidos de pressão.....	136
Tabela 38 – Comparação entre valores de pressão medidos em campo, valores simulados através do algoritmo e através do simulador hidráulico EPANET para o padrão de consumo no período diurno para pressões mínimas.....	137
Tabela 39 – Valores de vazão na EEA e na entrada do setor em estudo.....	138
Tabela 40 – Comparação entre valores de pressão medidos em campo, valores simulados através do algoritmo e através do simulador hidráulico EPANET para o padrão de consumo no período diurno para pressões médias.....	139
Tabela 41 – Valores de vazão medidos na EEA e na entrada do setor em estudo.....	140

Tabela 42 – Comparação entre valores de pressão e vazão medidos em campo, valores simulados através do algoritmo e através do simulador hidráulico EPANET para o padrão de consumo no período noturno para pressões máximas.....	141
Tabela 43 – Valores de vazão medidos na EEA e na entrada do setor em estudo.....	142
Tabela 44 – Vazão de entrada no sistema e vazão distribuída nos bairros para os três padrões de consumo pelo simulador hidráulico EPANET.....	143
Tabela 45 – Valores médios de pressão na rede de distribuição simulados pelo EPANET para os três padrões de consumo.....	146

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Dados do trecho e valores de consumo por trecho.....	156
Anexo B – Nós da rede e seus respectivos valores de cota e consumo.....	159
Anexo C – Traçado da rede de distribuição e nós.....	162
Anexo D – Traçado da rede de distribuição e nós monitorados.....	163

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
AGH	Algoritmo Genético Híbrido
AGS	Algoritmo Genético Simples
CFD	Software utilizado em simulação de escoamento de fluídos
DGPS	Differential Global Positioning System
EEA	Estação elevatória de água
EPANET	Simulador Hidráulico - Environmental Protection Agency Software
ETA	Estação de tratamento de água
FND	Fator de Correção ou Noite/Dia
fofo	Ferro fundido
FORTRAN	Linguagem computacional
FP	Fator de Pesquisa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDP	Índice de Perdas
NAG	Biblioteca matemática do FORTRAN
NBR	Normas técnicas brasileiras
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PV	Poço de Visita
PVC	Cloreto de Polivinila
RNV	Reservatório de Nível Variável
SA	Semente Aleatória
SAA	Sistema de abastecimento de água

SAAE	Sistema Autônomo de Água e Esgoto
SESP	Secretária de Segurança Pública (Atual Fundação Nacional da Saúde)
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TCC	Trabalho de conclusão de curso
VRP	Válvula redutora de pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

H	Carga efetiva total (m)
P/γ	Energia ou carga de pressão
Z	energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência (m)
$v^2/2g$	Energia ou carga cinética (m)
ΔH	Perda de carga ou de energia (m)
$P/\gamma + z$	Linha de carga efetiva ou piezométrica (m)
L	Comprimento da tubulação (m)
D	Diâmetro da tubulação (m)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
v	Velocidade do escoamento (m/s)
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional)
ε	Rugosidade da tubulação (m)
Rey	Número de Reynolds (adimensional)

J	Perda de carga unitária (m/m)
Q	Vazão (m ³ /s)
CE	Custo da energia consumida (R\$)
E	Energia consumida (kWh)
C	Custo tarifário (R\$/kWh)
N	Número de bombas ativas
f	Fração temporal (h)
P _{min}	Pressão mínima (mca)
P _{max}	Pressão máxima (mca)
P	Pressão (mca)
Pot	Potência (kW)
Pot _{max}	Potência máxima (kW)
NR	Nível do reservatório (m)
CETA_MB	Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da captação e ETA (R\$)

CETA_MT	Custo mensal total na captação e ETA
VCMB	Volume de água consumido pelos bairros (m ³)
VCAP	Volume de água mensal captado e tratado na ETA (m ³)
CEEA_MB	Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da EEA Vila Nova (R\$)
CEEA_MT	Custo mensal total na EEA Vila Nova (R\$)
Vdist	Volume de água mensal total distribuído (m ³)
CTMB	Custo total dos bairros estudados (R\$)
CUVC	Custo unitário dos bairros estudados com base nos volumes de água consumida pelos bairros (R\$/m ³)
VEMB	Volume de entrada mensal nos bairros estudados (m ³)
NDM	Número de dias dos meses
Q _{Méd Diária}	Vazão média diária de entrada nos bairros estudados (m ³ /h)
CUME	Custo unitário dos bairros estudados do volume de entrada (R\$/m ³)
VPMB	Volume de água perdida mensal nos bairros estudados (m ³)

PP	Porcentagem de perdas (%)
SEMB	Volume médio mensal de entrada nos bairros estudados (m ³)
CVPMB	Custo do volume perdido dos bairros (R\$)
IDP	Índice de perdas (%)
Vutil	Volume utilizado (m ³)
Q _{min not}	Vazão mínima noturna encontrada nas horas de vazão mínima, entre 3 e 4 horas (m ³ /h)
Q _{méd diária}	Vazão média diária (m ³ /h)
Q _{perdas}	Vazão média das perdas reais diárias (m ³ /dia)
Q _L	Vazão de usos ou consumos legítimos médio no horário da mínima noturna (m ³ /h)
FND	Fator correção ou fator noite/dia
PPMS _i	Pressão média horária do setor, durante o período de dias de amostragem, da hora "i" do dia (mca)
PMNS3-4	Pressão noturna média no setor, obtida no horário entre 3:00 e 4:00
N1	Expoente que depende das características dos materiais das tubulações

n	Rotações (rpm)
ϕ_r	Diâmetro da tubulação de recalque (mm)
D_s	Diâmetro do bocal de recalque (mm)
D_r	Diâmetro do bocal de sucção (mm)
I	Corrente (A)
V	Tensão (V)
P_e	Potência do equipamento (cv)
η	Rendimento do equipamento
P_{3-4}	Pressão média encontrada entre os horários 3:00 e 4:00
P_{med}	Pressão média (mca)

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Objetivos.....	8
3	Revisão.....	9
3.1	Perdas de água, eficiência energética e balanços hidro energéticos.....	9
3.1.1	Sistemas de distribuição de água.....	9
3.1.2	Captação.....	15
3.1.3	Adução.....	15
3.1.4	ETA.....	16
3.1.5	Redes de distribuição.....	17
3.1.6	Bomba e Booster.....	19
3.1.7	Válvula redutora de pressão.....	19
3.1.8	Perdas.....	20
3.1.9	Perdas físicas – Reais.....	25
3.1.10	Perdas não físicas – Não reais.....	27
3.2	Crítérios para balanço hidro energético.....	28
3.2.1	Energia hidráulica.....	28
3.3	Possibilidades de adequações de diferentes formatos de uso do EPANET.....	32

3.3.1	Algoritmos Genéticos em sistemas de abastecimento de água.....	33
3.4	Modelos matemáticos para previsão de demanda.....	39
3.4.1	Previsão de Demanda.....	39
3.5	Ferramentas computacionais para processamento de dados.....	45
3.6	Novos simuladores computacionais.....	48
3.7	Indicadores aplicados aos sistemas de abastecimento de água.....	50
3.7.1	Correlação entre custos e consumos.....	51
3.7.2	Custo do volume perdido.....	53
3.7.3	Índice de perdas.....	56
3.7.4	Fator de pesquisa.....	57
3.7.5	Vazão mínima noturna.....	58
3.7.6	Correlação entre pressões em redes e vazamentos.....	60
4	Materiais e métodos.....	62
4.1	Etapas da realização do estudo.....	62
4.2	Rede de estudo.....	65
4.2.1	Informações dos setores estudados do município.....	65
4.2.2	SAAE São Lourenço.....	68
4.3	Dados de projeto do sistema.....	69
4.3.1	Abastecimento.....	69
4.3.2	Captação.....	72
4.3.3	ETA.....	74

4.3.4	Reservação.....	75
4.3.5	Estações Elevatórias de água (EEA).....	76
4.3.6	Rede de distribuição de água.....	78
4.3.7	Setores estudados.....	78
4.4	Equipamentos.....	82
4.4.1	DGPS.....	83
4.4.2	Geofonamento.....	85
4.4.3	Loggers de pressão.....	86
4.4.4	Medidor ultrassônico de vazão.....	87
4.5	Consumo de água nos bairros.....	88
4.5.1	Vale dos Pinheiros.....	88
4.5.2	Moradas da Serra.....	89
4.5.3	Palmela.....	89
4.6	Volumes de água do sistema de abastecimento.....	90
4.7	Índices e vazões de perdas.....	93
5	Resultados e discussão.....	96
5.1	Relação de proporção entre o sistema e o setor de estudo.....	96
5.2	Cálculo do consumo nodal.....	99
5.3	Pressões na rede.....	103
5.3.1	Registros horários de pressão, rupturas nas tubulações e seus efeitos.....	109
5.4	Calibração de redes.....	122

5.4.1	Populações e sementes aleatórias.....	124
5.5	Correção dos dados de pressão.....	133
5.5.1	Problemas estruturais e de simulação.....	144
5.6	Modelagem da eficiência do sistema de abastecimento.....	146
6	Conclusões e recomendações.....	148
7	Referências bibliográficas.....	151
	ANEXOS.....	155

1 Introdução

Existe um tempo considerável no qual foi descoberto que a água potável é um recurso finito, tornando-se gradativamente em um recurso escasso, ainda onde as sociedades em expansão têm aumentado cada vez mais seus índices de desperdício, oscilando entre 37 e 42% da água captada em média no Brasil, não muito diferente de um padrão internacional, que beira os 35% de perdas no sistema (ABES, 2013).

Porém, apresentando alguns desequilíbrios graves, sendo que em algumas regiões como o Norte e o Nordeste do Brasil este índice atinge os 70% de desperdício enquanto a região Sul alcançou o mínimo de perdas de 28,9%. Atualmente, é tomado como prejuízo em função dessas perdas, aproximadamente R\$ 7 bilhões/ano, além das perdas desse importante insumo de funcionalidade básica e vital (SNIS, 2010).

Dentre muitas das necessidades básicas do ser humano no momento presente a água se destaca por sua funcionalidade única no ciclo vital, distribuída em sistemas ao longo de estruturas urbanas e rurais.

Para os consumidores de água cuja a faixa de consumo encontra-se com problemas de escassez, seu acesso a esse bem é em grande parte difícil de se captar e/ou transportar até os locais onde se encontrarão o consumo final, suas residências e afins . Isso ocorre porque os seus mananciais, sejam superficiais ou subterrâneos, encontram-se em parte frequente enfraquecidos, além de haver o problema de cobertura de um sistema de distribuição de água a uma determinada região, devido a problemas de origem antrópica, referindo-se mais a qualidade e quantidade de água nos mananciais, ou geológica, tratando-se mais do alcance da água captada ou uma combinação entre ambos.

Já em locais de aspecto urbano ou rural onde o consumo supera a média de consumo vital de água, existe uma alta probabilidade dessa abundância de água bruta disponível nos mananciais ser desperdiçada não só por hábitos de consumo, mas como também por falhas estruturais no sistema de distribuição.

Então, desperdiça-se não só um insumo tão importante como também elementos utilizados no tratamento da água adequando-a as condições de potabilidade e a energia consumida no bombeamento e uso de demais equipamentos elétricos utilizados no sistema de distribuição de água.

A Tabela 1 mostra o índice de desperdício em diversas regiões do país:

Tabela 1 – Índice de perdas na distribuição (indicador IN049) dos prestadores de serviços participantes do SNIS¹ em 2010, segundo tipo de prestador de serviços, região geográfica e Brasil

Regiões	Tipos de prestador de serviços					Total
	Regional	Micro-regional	Direito público	Direito privado	Empresa privada	
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Norte	53,2	-	38,3	-	59,4	51,2
Nordeste	52,6	-	36,6	12,8	-	50,8
Sudeste	33,3	47,5	38,0	28,8	32,2	34,4
Sul	36,1	28,9	32,8	43,3	43,7	35,4
Centro-Oeste	30,2	56,6	38,9	58,5	27,0	33,8
Brasil	39,2	46,1	37,1	35,9	42,5	38,8

¹ - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

Um índice geral também é mostrado e na Tabela 2, onde também é mostrado o consumo per capita:

Tabela 2 – Valores de consumo médio *per capita* de água dos prestadores de serviços participantes do SNIS, nos anos de 2009 e 2010, segundo estado, região geográfica e Brasil.

Estados/Regiões	Consumo médio	Consumo médio	Variação 2009/2010
	<i>per capita</i>	<i>per capita</i>	
	$\left(\frac{L}{\text{hab.dia}}\right)$	$\left(\frac{L}{\text{hab.dia}}\right)$	
	Ano 2009	Ano 2010	
Norte	139,5	143,5	2,9%
Nordeste	114,4	117,3	2,5%
Sudeste	170,4	185,9	9,1%
Sul	138,1	145,4	5,3%
Centro-Oeste	143,7	154,9	7,8%
Brasil	148,5	159,0	7,1%

Quanto maior o índice de desperdício, menor é o consumo *per capita*. Esse desperdício de água certamente é um volume de água que podia chegar a uma região mais prejudicada por fatores climáticos e geográficos. O próprio dinheiro que é desperdiçado devido ao mal funcionamento do sistema de distribuição de água, tanto em função do tratamento quanto do transporte, poderia ser utilizado na melhoria do sistema.

Tais índices mostrados na Tabela 2 retratam a polarização no que se refere ao acesso à água de qualidade e quantidade, mostrando a situação de desigualdade que é retratada nos dias atuais, situação esta agravada quando o cenário trata-se de toda a região global.

² – TSUTYA, M. T. 2004, Abastecimento de água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004, 643 p.

Evitar o índice de desperdício, tornando-o nulo de fato trata-se de uma ação demasiada complexa, onde todos os planejamentos, investimentos e gerenciamentos seriam polarizados somente em um setor de tantos outros existentes como indústrias, etc.

Estima-se um nível aceitável de 25% no índice de perdas, possibilitando então recuperar aproximadamente R\$ 4,2 bilhões/ano desse investimento (ABES, 2010), com uma tendência de que esses valores aumentem consideravelmente com o passar do tempo, levando em conta a expansão urbana através do aumento demográfico, valor esse que certamente pode ser canalizado ao próprio país, dividindo a economia em diversos setores, cada um com sua respectiva relevância.

Um primeiro passo que tange a direção de um acesso à água a todos de forma equilibrada em escala global é focar os reparos dos sistemas já existentes de forma a minimizar o índice de desperdício, buscando ações que, uma vez deliberadas, reduzam este índice de desperdício de uma maneira que reflita diretamente no próprio crescimento do sistema de distribuição, refletindo no aumento da qualidade e alcance de uma água em quantidade satisfatória a todos.

Este índice de desperdício trata-se da relação entre o volume de disponível na estação de tratamento de água (ETA) pelo volume de água que chega até o consumidor final. Este volume não é o mesmo porque a água quando transportada pelas tubulações geralmente acumula uma grande quantidade de energia contida na água consigo por ganho constante de energia cinética, potencial e de pressão, e essa energia fica toda contida dentro do sistema de tubulações, e uma vez que a energia não se dissipa corretamente, de acordo com os limites da capacidade do material que transporta essa água, a tubulação acaba sofrendo danos na sua estrutura e consequentes vazamentos,

² – TSUTYA, M. T. 2004, Abastecimento de água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004, 643 p.

estes dados por efeitos de pressões elevada enquanto há o problema de sobre pressão, havendo pouca energia contida no fluído para alcançar todos os trechos da rede.

Intervenções físicas em tais estruturas são complexas pelo custo e pela operação no sistema, acarretando em inutilizações temporárias de ruas, necessitando de remanejamento no trânsito entre outros problemas. Uma maneira de se explorar as possibilidades que cercam os problemas de vazamento nas redes de distribuição é a modelagem matemática, que consiste em estruturar matematicamente uma estrutura física de distribuição de água através de linguagens computacionais.

Linguagens computacionais além de expressarem matematicamente um modelo físico, também são capazes de utilizar técnicas de busca de soluções para se minimizar as perdas de água através de restrições em parâmetros conhecidos.

Para que esses índices de desperdício diminuam, há necessidade de intervenções em estruturas de distribuição de água potável, essas redes implantadas em municípios e cidades, abastecendo água para consumo residencial, comercial e industrial, sendo esse sistema de abastecimento responsável por 50 a 70% do custo total de implementação de uma rede, sendo este o setor mais oneroso segundo TSUTYA²(2004).

As intervenções basicamente tratam-se de substituição de condutos por novas tubulações na rede de distribuição de água cuja vida útil esteja próxima a extinguir-se, havendo rupturas nas tubulações causando vazamentos e quedas de pressões, além de incrustações que se acumulam internamente, inferindo em um maior nível de rugosidade ao longo dos trechos da rede refletindo em uma queda de pressão no sistema, diminuindo assim a eficiência energética do sistema. Também pode ocorrer de uma mudança estrutural ser implementada no sistema, como a mudança de posição de uma

² – TSUTYA, M. T. 2004, Abastecimento de água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004, 643 p.

estação elevatória ou até mesmo de um reservatório, estas intervenções sendo ainda menos frequentes.

Mas, tais intervenções são onerosas, e também vazamentos são de difícil detecção uma vez que a tubulação encontra-se enterrada, pode-se localizar vazamentos de grande porte através de equipamentos sensíveis a um fluxo de água que escoe fora da tubulação devido a uma ruptura; agora, os vazamentos de pequeno porte são mais difíceis, e a somatória de todos ao longo de uma rede se mostra como contribuinte em potencial ao aumento desses índices de perdas.

Uma das formas de deliberar essas intervenções de maneira mais econômica é a utilização de rotinas de computação capazes de expressar da melhor forma a realidade dos parâmetros da tubulação e outros diversos da rede, através de calibração da mesma, fazendo o uso de uma ferramenta computacional de custo minimizado como estratégia a se realizar tal intervenção nas redes, uma ferramenta a auxiliar uma tomada de decisão, podendo este recurso, ser útil a contribuição da redução dos índices de perda no sistema.

Alternativas como essa servem de um monitoramento com custo mínimo levando ao conhecimento direto do comportamento da rede, tendo maior facilidade em remanejar a estrutura do sistema de distribuição, seja pela troca das tubulações de um trecho que já se encontra com o material em estado de desgaste, ou seja, mesmo por dispositivos que acrescentem ou dissipem energia no sistema de distribuição, deixando-o em faixa ótima de operação de forma que todos os usuários acessem uma água de qualidade em quantidade satisfatória sem que haja perda de água, que implica na perda do insumo mais a energia e componentes que transportam e tornam a água potável.

O intuito desse trabalho é melhorar a eficiência hídrica e energética de uma rede de distribuição de água, utilizando um modelo de calibração de redes proposto por

SILVA (2003) e, com base nos dados da calibração, implementar ações para o aumento da eficiência do sistema.

2 Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em calibrar setores da rede de distribuição de água de São Lourenço – MG, utilizando o modelo proposto por SILVA (2003), servindo de subsídio para estudos de eficiência hídrica e energética nos sistemas de distribuição de água.

Os objetivos fundamentais consistem no monitoramento da rede e sua modelagem matemática utilizando linguagens de programação.

Estabelecer campanhas de campo, consistindo basicamente na instalação de equipamentos na rede distribuidora de modo a se obter dados consistentes dos parâmetros na rede, como pressão e vazão de maneira contínua e localização espacial, estabelecendo um monitoramento dos parâmetros na rede de qualidade;

- Realizar a calibração de uma rede experimental e da rede de distribuição de um setor em São Lourenço, constituído basicamente de três bairros, utilizando uma rotina computacional com implementação de algoritmos genéticos além da implementação da mesma;

- Encontrar elementos e maneiras de gerenciamento no sistema distribuidor de água que possibilitem aumentar sua eficiência energética como um todo no sistema.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Perdas de água, eficiência energética e balanços hidroenergéticos

Perdas de água tratada em uma rede de distribuição refletem diretamente na eficiência energética de um sistema de distribuição de acordo com o balanço hidroenergético do sistema.

Por exemplo, se o equilíbrio fluido dinâmico estiver estabelecido no sistema, como faixa de pressão limite no que tange o material condutor na rede, podendo ser geralmente tubulações de PVC ou ferro fundido dúctil ($f_o f_o$), estas terão, em seu material, a capacidade de suportar as pressões exercidas pelo fluido sem que haja ruptura em sua estrutura, de forma que a água escoe sem vazamentos desde que essa força exercida contra as paredes esteja dentro de uma faixa de pressões, de maneira que o excesso cause ruupturas. O balanço das energias de pressão ao longo dos nós em uma rede podem fornecer um diagnóstico energético do sistema.

3.1.1 Sistemas de distribuição de água

Os sistemas de distribuição de água constituem-se de estruturas que basicamente captam água bruta de fontes ou mananciais, conduzindo-a por um sistema até uma estação aonde essa água é tratada e, posteriormente à sua adequação ao consumo, esta é transportada aos reservatórios ou diretamente distribuída nas redes nos municípios abrangendo ao perímetro urbano e rural.

As águas desses sistemas têm, como destino final, o consumo nas residências e indústrias, estas em qualidade e quantidade suficiente para que haja abastecimento geral e também haja pressão suficiente para que a água abranja todos os pontos de fornecimento, além de apresentar pressões suficientes para haver combates a incêndios

quando necessários e não havendo ultrapassagens de possíveis limites de pressões, que acarretam rupturas nas tubulações.

Águas necessárias para o consumo têm como fonte os mananciais, podendo ser captadas superficialmente nos cursos d'água, lagos e represas, ou também haver captações subterrâneas através da perfuração de poços na busca de lençóis e/ou bolsões d'água, estas possuindo maior ajuste ao consumidor necessitando de um tratamento menos rigoroso, bastando apenas à adição de cloro e flúor em concentrações adequadas ao consumo do homem. Geralmente isso dependerá das condições locais (clima e formação topográfica da região) e também da demanda necessária a satisfazer a população (SARZEDAS, 2009).

A Figura 1 exemplifica um sistema de distribuição de água, mostrando seus diversos componentes básicos e também suas três divisões básicas:

- Sistema produtor;
- Sistema adutor; e
- Sistema de distribuição.

Levando em conta que, em cada componente de cada uma das três divisões, existe chance de ocorrer perdas que acarretaram em drásticas perdas globais de água e energia no sistema. Uma vez conhecida a estrutura do sistema, existe uma maior facilidade de se reconhecer os locais onde se concentram os maiores índices de perdas. (SARZEDAS, 2009).

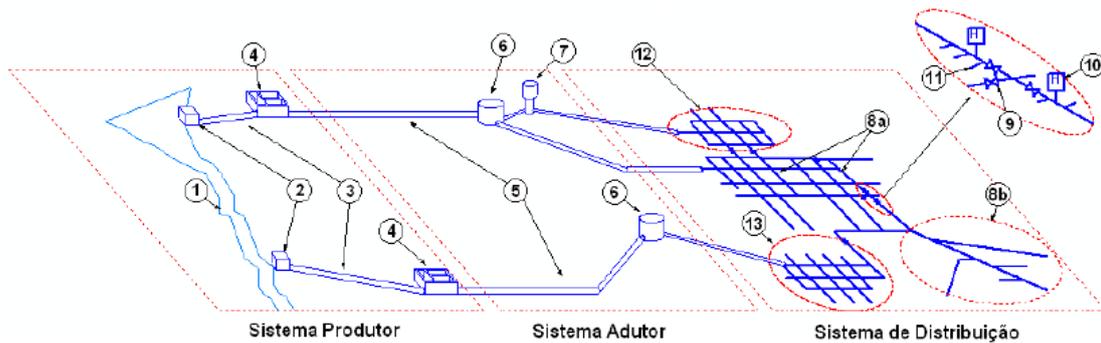


Figura 1 - Exemplo de um sistema de distribuição de água (SARZEDAS, 2009)

As divisões básicas são constituídas por: Sistema produtor, adutor e de distribuição e os itens seguintes representam cada componente na Figura 1:

1. Manancial
2. Captação
3. Adutora de água bruta
4. Estação de tratamento de água – ETA
5. Adutora
6. Reservatório superficial
7. Reservatório elevado (Torre)
8. Rede de distribuição (a) em anéis e (b) ramificada
9. Válvula de isolamento (registro)
10. Hidrante
11. Ramal domiciliar
12. Zona alta
13. Zona baixa

O sistema produtor, que inicia a captação através de um manancial, transporta a água em estado bruto e impróprio para o consumo para uma estação de tratamento de água – ETA – onde, por diversos processos de filtração e desinfecção, a água se

tornará própria para o consumo. Este transporte é feito de duas maneiras: ou por gravidade, quando a água possui energia potencial o suficiente para chegar à estação de tratamento apenas pelos condutos ou canais estruturados pelas adutoras; ou então por bombeamento, equipamento este que através de um gasto de energia elétrica converte energia fornecida em energia hidráulica fornecendo pressão suficiente para que a água chegue até a estação, sendo que a forma na qual se realizará esse transporte dependerá da cota topográfica do terreno e da distância entre o manancial e a ETA estiverem localizados.

Após tratada a água, o produto precisa ser transportado até as redes ou então até os reservatórios que alimentam as mesmas, e para isso é desenvolvido a segunda parte do sistema, que se trata do sistema adutor. Este sistema tem uma grande importância porque este transporta grandes volumes de água, geralmente a grandes distâncias, visto que os mananciais não se encontram sempre próximos as redes de distribuição.

Como é ilustrado na Figura 1, as adutoras tendem a se setorizarem devido ao tamanho da rede de distribuição e a demanda dos consumidores finais. As tubulações de adução tendem a percorrer até mesmo dezenas quilômetros e suas tubulações tendem a ter diâmetro superior a 300mm, podendo ser projetadas de forma que se localizem enterradas ou até mesmo acima do nível do solo, de acordo com a necessidade local, alcançando reservatórios que podem ser superficiais ou elevados, de acordo com a topografia local, de forma que se possa aproveitar da melhor maneira possível o comportamento do terreno e se otimizar o transporte do recurso.

O sistema adutor é constituído de um arranjo estrutural possuindo equipamentos diversos, elementos que estruturam o sistema onde o transporte cruza diversas resistências ao fluxo de destino ao consumidor. Alguns destes elementos são listados a seguir:

- Válvulas de bloqueio;
- Válvulas de controle;
- Ventosas;
- Bombas.

Com o auxílio de tais elementos, uma logística deve ser estruturada para melhor funcionamento do sistema de forma que sempre haja uma economia do insumo, do produto final disponível e da energia gasta no processo. Como exemplo, tem-se os horários de funcionamento das bombas que se encontram em diversos pontos do sistema como um todo, buscando o uso de maneira ideal ser feito através do manejo onde a tarifa da energia elétrica é menor, ou então utilizar bombeamento em conjunto com distribuição por gravidade caso a vazão distribuída esteja em limites poucos seguros. Outro exemplo de técnicas efetivas observadas em sistemas é o bombeamento de um reservatório para outro reservatório, além de bombeamentos de ETA's para reservatórios ou de mananciais para ETA's apenas, com o intuito de haver um ganho energético e aumento de disponibilidade (SARZEDAS, 2009).

Segundo TSUTIYA (2004), a terceira parte do sistema, o de distribuição, representa o setor mais oneroso do sistema, alcançando entre 50% e 75% do custo total de todas as obras do sistema de abastecimento. Um sistema de distribuição apresenta uma sensibilidade maior à energia utilizada na água para seu transporte devido à maior complexidade dos fluxos e também da diminuição do diâmetro das tubulações, o que

acarreta maior sensibilidade a rupturas nas tubulações causadas por implosões devido a pressões superiores aos limites dos quais estas podem suportar por diversos fatores, como velocidade do escoamento, rugosidade, atrito, espessura da tubulação, material de fabricação, etc (PÉREZ et al, 2011).

As redes possuem um diâmetro reduzido em relação às adutoras, o que gera um ganho de pressão das mesmas. Ainda assim, as redes não são de fato o destino final dos consumidores, ainda havendo trechos de contribuição que seguem os alinhamentos das guias, podendo as tubulações formar anéis em torno de espaços físicos como quadras por exemplo, onde por meio de junções e conexões, de onde serão abastecidos os ramais domiciliares onde se encontram os consumidores finais, como também nos ramais onde essas conexões havendo então só o sentido linear do fluxo da água, como ilustrado na Figura 1.

Há também o uso de válvulas de isolamento, ou registro, que servem para a manutenção ou a inserção de algum projeto na rede, isolando as extremidades na rede e assim podendo realizar as intervenções necessárias dadas em maior parte na manutenção da rede, e também podem ser fechadas de maneira que a rede de distribuição passe a operar em um novo arranjo, gerando uma possível inversão no fluxo de água nos anéis e um ganho de pressão gerando zonas com maiores valores energéticos, em casos onde a água precisa vencer cotas mais elevadas por exemplo, mas também havendo o caso onde ocorre o inverso, incrementando-se ao sistema uma válvula redutora de pressão por exemplo, por onde o fluxo de água dissipa uma quantidade de energia, fazendo assim com que evite danos as tubulações (SARZEDAS,2009).

Hidrantes de combate a incêndios também são importantes elementos nas redes de distribuição de água e precisam sempre ter água em quantidade e pressão disponível para a operação de acordo com o planejamento da cidade e suas atividades envolvidas, já que a ocupação urbana tem um peso substancialmente relativo em função dessa relação, mas geralmente com hidrantes localizados a 100m de distância uns dos outros.

Os ramais domiciliares, por fim, permitirão que os consumidores acessem a água captada, tratada e conduzida até os locais definidos, possuindo tubulações de diâmetros e comprimentos curtos, tomando o recurso da rede de distribuição na rua e levando para a propriedade, onde antes passará por um hidrômetro, que registrará o volume de água que por ali passar em direção a caixas d'água, instalações prediais e etc, no que se compete a água tratada alcançar residência, comércio, indústria etc.

3.1.2 Captação

A captação de água no estado bruto, ainda imprópria para o consumo é encontrada em mananciais superficiais ou subterrâneos, necessitando de um poço de extração com um auxílio de uma bomba.

Nos casos de mananciais subterrâneos ou nos casos de mananciais superficiais, estes podem ser lagos, rios dentre outros corpos aquáticos, podendo ser encontrado seu ponto de captação de água bruta em uma cota superior ou inferior ao ponto final de distribuição. Isso implicará na necessidade de bombeamento do volume de água captado ou então o escoamento poderá ocorrer simplesmente por gravidade, se a cota do ponto de captação for superior.

3.1.3 Adução

O sistema de adução consiste em duas etapas básicas, a que transporta a água bruta até a estação de tratamento de água e a adutora que transporta a água tratada até a

rede de distribuição para os consumidores finais. Como existem dois sistemas adutores distintos, existe também a necessidade projeção distinta para ambos, dada em função da vazão captada, que tem de estar em uma faixa limite adequada a ETA projetada e a vazão de demanda, além da quantidade de material suspenso e concentração de produtos utilizados no tratamento da água.

Todos estes parâmetros devem estar bem definidos para que se a tubulação de adução opere em faixa ótima em função de seu diâmetro projetado, operando com uma água de pressão dentro dos limites do bom funcionamento da mesma, de modo que não haja desgaste nas paredes do tubo e tão pouco rupturas, de maneira que sua vida útil possa ser explorada ao máximo.

É de grande importância, tanto para as tubulações de grande porte como as adutoras como nas de pequeno porte na rede de distribuição que opere de forma ótima, para que o abastecimento cubra todas as necessidades ao mesmo tempo que não haja uma injeção excessiva de energia no sistema, superando as capacidades das tubulações e encurtando sua vida útil.

3.1.4 ETA

As estações de tratamento de água (ETA) são unidades indispensáveis no sistema de abastecimento, sendo ela abastecida diretamente pelo sistema de adução de água bruta após a captação da água em seu local fonte. Na ETA, ocorrem as adequações da água a potabilidade a sociedade, como retirada do excesso de material orgânico através de coagulantes e floculadores, e desinfecção através da adição de cloro e fluor além de outros diversos processos dentro da ETA. Após a água atingir os padrões de potabilidade necessários, estas são conservadas em grandes reservatórios ou então enviadas diretamente a rede de distribuição.

3.1.5 Redes de distribuição

As redes de distribuição tratam-se da parte do sistema de abastecimento onde a água tem o seu destino final de consumo. É formada por tubulações além de órgãos acessórios, com a finalidade de transportar a água tratada até os consumidores, disponível em quantidade e pressão recomendadas.

Em redes de distribuição o sistema é um pouco mais complexo devido a sua maior quantidade de ramificações e conexões, formando uma malha ao longo da rede. Então, existe uma área dentro da rede de distribuição denominada setor de manobra, tratando-se esta de uma subdivisão dentro da própria rede de distribuição, local este onde o abastecimento pode ser isolado para efeitos de manutenção, de modo que não afete o abastecimento dos demais setores da rede.

Numa rede de distribuição, existe o valor de consumo, que se trata da água utilizadas pelos seus consumidores por uma dada unidade de tempo, geralmente esta mensurada pelas companhias de saneamento em m³/mês ao entregar o faturamento ao consumidor, e também existe a vazão de distribuição, que é o volume de água consumido acrescido de possíveis perdas que tendem a ocorrer ao longo da rede.

Os consumidores são separados em categorias, em função do uso da água que este realiza, resultando em faixas de consumo da água distintas, por exemplo, um consumidor que usa a água somente para suas necessidades básicas (limpeza, cocção e higiene pessoal) consome uma faixa de água bem menor a um consumidor que possui uma faixa de consumo mais elevada abastecendo uma piscina e/ou um campo de cultivo através da irrigação, além de outras hipóteses de classes de consumidores industriais e comerciais, por exemplo.

A rede de distribuição possui uma área de abastecimento específica, tratando-se da própria característica de ocupação, concentração demográfica além da categoria do consumidor. Esta área pode sofrer um processo de expansão, que geralmente se dá de forma desordenada devido ao mal planejamento e conhecimento insuficiente de todos os critérios que satisfazem a expansão correta do local.

O conjunto de tubulações que compõem a rede de distribuição é denominado condutos ou tubulações secundárias, estes possuem diâmetro inferior ao diâmetro da adutora de água tratada e bruta.

Segundo a NBR 12218 – Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público, existe uma faixa ótima de operação para as pressões na rede de distribuição nas zonas de pressão, estas sendo áreas abrangidas por uma subdivisão na rede, aonde as pressões estática e dinâmica obedecem a limites pré fixados, mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Limites para as pressões dinâmicas e estáticas

Limites na faixa de pressão na rede		
Pressão dinâmica	100 kPa	Valor mínimo
Pressão estática	500 kPa	Valor máximo

Fonte: NBR 12218

A pressão dinâmica trata-se do momento em maior consumo na rede, onde a energia da água se dissipa através dos consumidores finais, esta por norma operando no valor mínimo de 100 kPa, valor este que garante água em pressão satisfatória a todos os consumidores, principalmente os que se encontram ao final da rede de distribuição.

O valor máximo de 500 kPa verifica-se para o momento de menor consumo, ou seja, toda a energia da água encontra-se reservada dentro da rede de distribuição, atribuindo-se este valor de modo que não haja danos nas estruturas das tubulações.

3.1.6 Bomba e Booster

Bomba é o conjunto de equipamentos utilizado para diversos fins em uma rede de distribuição de água, mas basicamente trata-se de adicionar energia ao fluido, seja para superar uma cota elevada, através de uma estação elevatória ou recalque, seja também para se transportar o fluido a longas distâncias aonde a energia disponível contida no fluido não seja suficiente.

O ponto principal da utilização da bomba em uma rede de distribuição é a sua projeção em função da vazão de projeto que atende ao local, juntamente com este levantamento o estudo da relação das características hidráulicas e morfológicas, atendendo todas as particularidades locais, geográficas e demográficas.

3.1.7 Válvulas Redutoras de Pressão

As válvulas redutoras de pressão (VRP) são dispositivos que dissipam a energia contida dentro de uma rede de distribuição de água ou mesmo uma adutora, de forma que extraída essa energia, esse sistema opere em uma faixa de pressão ótima, com níveis de pressões mínimos (100 kPa, segundo a NBR 12218) que alcancem todo o sistema de forma satisfatória e com níveis máximos de pressão (500 kPa, segundo a NBR 12218) que não causem danos às estruturas da rede, as quais podem levar a rupturas nas tubulações e consequentes vazamentos.

Uma técnica de busca de soluções através dos algoritmos genéticos pode ser eficaz em encontrar um local ideal onde possa ser instalado tal dispositivo ou mais de

um, de maneira que estes sejam reguladores do sistema de forma que, em todos os nós, sejam encontradas em tempo integral níveis de pressões que estejam contidas dentro dessa faixa ótima de operação.

3.1.8 Perdas

As perdas de água são uma grande problemática que refletem na diminuição da eficiência energética e hídrica, resultando em queda na qualidade e quantidade de água, além de grande demanda de mão de obra para reparos estruturais. Mas não trata-se somente disso, inicialmente já se depara com o problema de haver grandes dificuldades de encontrar-se o local danificado na rede para que assim, o reparo possa ser feito, mas também podendo-se facilmente não tratar-se dessa problemática, mas sim de uma propagação de erros nos momentos de leitura de micro medidores residenciais ou macro medidores em ETA's e etc.

A Figura 3 ilustra esquematicamente a problemática das perdas:



Figura 3 – Esquematização das perdas de água em sistemas de distribuição de água.
Fonte: Adaptado de Zanta et. al. (2008).

Também são mostrados alguns problemas mais comuns na rede de distribuição, segundo Tardeli Filho³ (2006, apud LAMOGLIA, 2013) apresentados na Tabela 4 e a relação de índice de perdas e suas causas na Tabela 5:

³ TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In: TSUTYA, M. T. (org), Abastecimento de água, 3ª Ed. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

Tabela 4 – Problemas de maior frequência em sistemas de abastecimento.

Problemas	Causas
	Insuficiência de oferta de água
	Tubulações subdimensionadas
Falta de água	Tubulações entupidas
	Manutenção do sistema
	Rompimentos da tubulação
Arrebatamentos	Grandes perdas de água
Vazamentos	Falhas em junções dos tubos
	Trincas
	Perfurações
	Perdas de água através de fluxos contínuos
	Insuficiência
Baixa pressão	Entupimento das tubulações
	Situações topográficas adversas
	Pontos baixos da rede

Tabela 4 – Problemas de maior frequência em sistemas de abastecimento
(continuação)

Problemas	Causas
Alta pressão	Facilitando arrebatamentos Aumenta perda por vazamentos Danificação de bóias de caixa d'água
Água suja	Corrosão das tubulações de ferro fundido Infiltração de esgoto

Fonte: Tardeli (2006, apud Lamoglia, 2013)

Tabela 5 – Relação do índice de perdas e situação do sistema.

Local	Origem	Magnitude
Adução de água bruta	Vazamentos na tubulação	Variável, função do estado de conservação e procedimentos operacionais
	Limpezas (volumes além do necessário)	
Tratamento	Vazamento nas estruturas	Significativa, função do estado de conservação e procedimentos operacionais
	Lavagem de filtros Descarga de lodo	
Reservação	Vazamentos nas estruturas	Variável, função do estado de conservação e procedimentos operacionais
	Extravasamentos Limpezas (volumes além do necessário)	
Adução de água tratada	Vazamentos na tubulação	Variável, função do estado de conservação e procedimentos operacionais
	Descargas Limpezas, (volumes além do necessário)	
Distribuição	Vazamentos na rede	Significativa, função do estado de conservação e procedimentos operacionais
	Vazamentos nos ramais Descargas	

Fonte: Adaptado de Marcka⁴ (2004, apud Lamoglia, 2013)

⁴MARCKA, E. 2004. Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água – DTA A2. Programa de combate ao desperdício de água – PNCD, Secretária especial de desenvolvimento urbano, Secretaria de Política Urbana, 80 p. Brasília, 2004.

3.1.9 Perdas físicas – Reais

As perdas reais são consideradas pela companhia distribuidora como quantidade de água que sai da estação de tratamento e não alcança o consumidor final, dissipadas ao longo das redes através dos vazamentos, causados por rupturas nas tubulações, podendo ocorrer em macro ou micro escala (grandes estouros nas tubulações ou gotejamentos perenes que seguem por longos períodos na rede sem serem detectados), podendo ser visíveis, aflorando e jorrando água no local; ou invisível, sendo absorvidos pelo solo.

A Figura 4 e 5 ilustram as inúmeras possibilidades de perdas de águas através das tubulações:

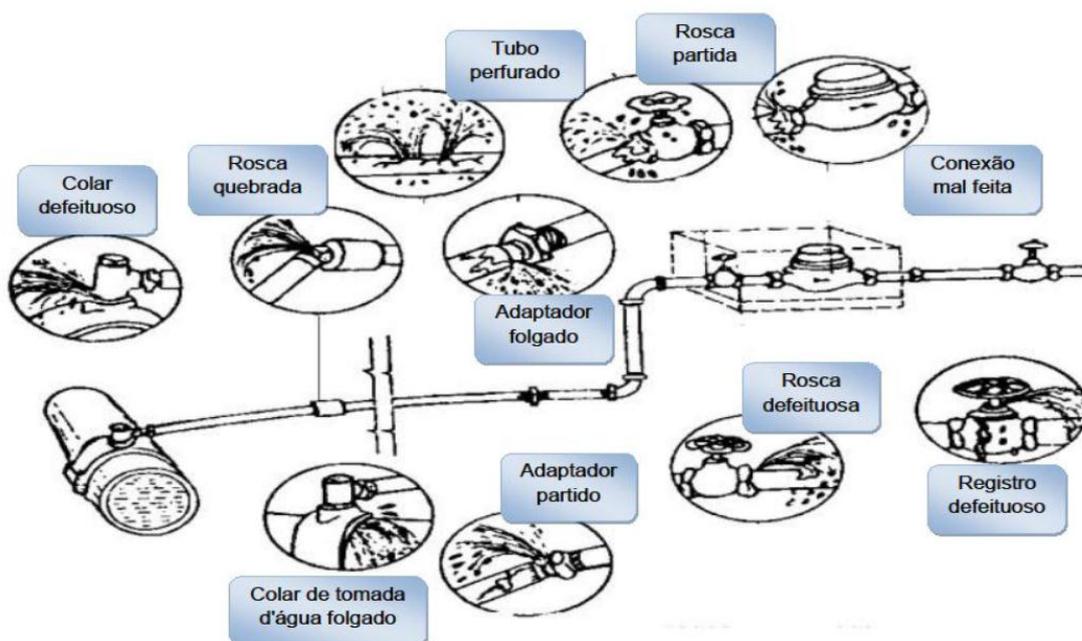


Figura 4 –Diferentes tipos de vazamentos na rede (Fonte: Padilha e Niida, 2003)

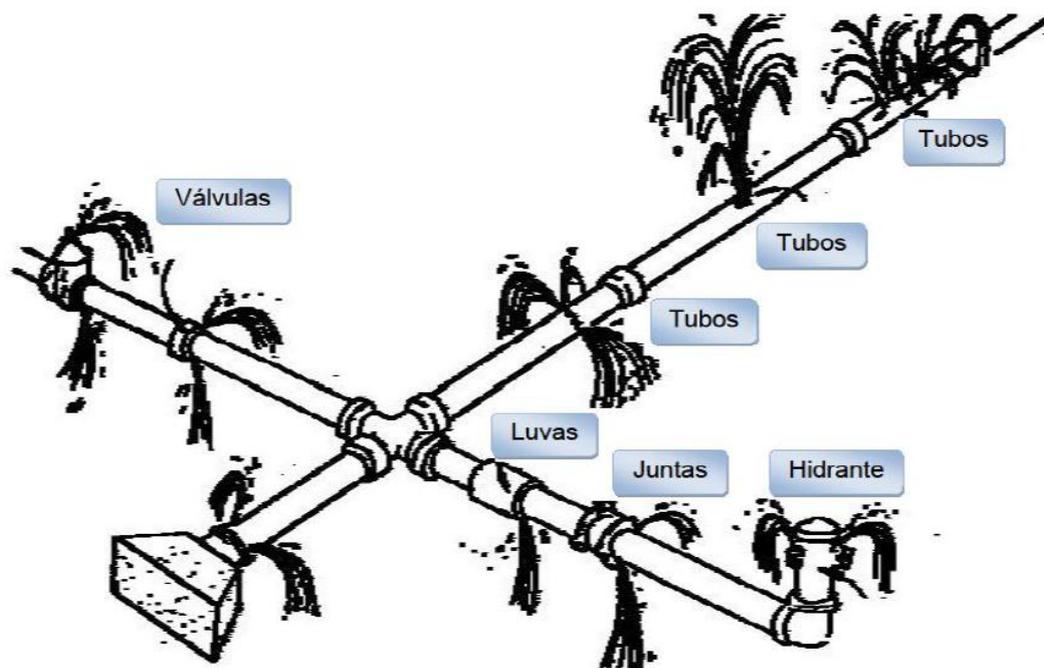


Figura 5 – Diferentes tipos de vazamentos na rede de distribuição (Fonte: Fonte: Padilha e Niida, 2003).

A grande problemática dessas perdas localiza-se nos métodos de detecção, pois tratam-se de técnicas pouco utilizadas pelas companhias de água ou técnicas de difícil aplicação ou mesmo muito caras, tornando-se por muitas vezes ações dispensadas pelas companhias.

3.1.10 Perdas não físicas – Não reais

As perdas de água não reais são consumidas no seu ponto final da rede de acordo com a quantidade demandada, porém, não são contabilizadas em momentos de leituras nos hidrômetros, ou por hidrômetros defeituosos, havendo uma defasagem no valor real, ou então por hidrômetros parados, ligações clandestinas, etc.

Um trabalho de fiscalização contínuo na rede deve ser realizado para que se possa detectar tais perdas, levantando valores reais de água que não se dissipam através

de vazamentos na rede, mas sim através de todos possíveis erros listados anteriormente. Somente conhecendo ambos os valores de perdas reais e não reais é que se pode estimar com confiança um índice de perdas na rede, e a partir daí, iniciar-se através da companhia processos de organização, planejamento e gestão das informações para que se possa tomar medidas corretivas que visem diminuir o índice de perdas ao longo de toda rede.

3.2 Critérios para balanço hidroenergético

3.2.1 Energia hidráulica

O estudo do escoamento do fluido através de estruturas construídas pelo ser humano, ou mesmo em obras de estruturas naturais, vem sido estudada e aperfeiçoada através dos séculos por meio de muitas perspectivas científicas, empíricas e fundamentações teóricas. Modelagens matemáticas utilizadas na atualidade trabalham com todo esse conhecimento através do século, além das deduções dos próprios fenômenos que envolvem a água e dos próprios fenômenos elétricos e computacionais que envolvem a programação e modelagem.

Um matemático holandês chamado Daniel Bernoulli⁵ (1700 – 1782) deduziu uma fórmula onde todos os parâmetros pudessem ser mensurados. Ele realizou a afirmação de que os líquidos perfeitos em regime permanente possuem a mesma quantidade de energia ao longo de uma trajetória, ou seja, que a energia de pressão somada à energia cinética e a potencial do fluido fossem sempre a mesma ao longo de todo o trecho aonde esse fluido for canalizado. Então, dessa maneira pode-se mensurar quanto de energia foi perdida no sistema realizando esse balanço de energia entre os trechos. A equação deduzida por Bernoulli é a mostrada a seguir.

⁵PORTO, R. M. (2006). Hidráulica Básica. Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 4ª ed., 540 p.

$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{cte}$$

ou

Equação 1

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H_{12}$$

Onde:

H – Carga efetiva total [m];

P/γ – Energia ou carga de pressão [m];

z – Carga de posição [m] (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência) ;

$v^2/2g$ – Energia ou carga cinética [m];

ΔH – Perda de carga ou de energia [m];

$P/\gamma + z$ – Linha de carga efetiva ou piezométrica [m].

O parâmetro ΔH foi inserido a equação uma vez que constatada uma diferença na quantidade à montante e a jusante do trecho, sendo ΔH a energia dissipada ao longo do trecho.

Este equacionamento então foi utilizado durante quase meio século até que um engenheiro francês Henry Philibert Gaspard Darcy (1803 – 1858) junto a um engenheiro e professor alemão Ludwig Julius Weisbach (1806 – 1871) desenvolveram um equacionamento que pudesse encontrar o valor de perda de carga (ΔH) em função de diversos parâmetros da rede e do escoamento, conhecida comumente como fórmula universal de perda de carga ou equação de Darcy-Weisbach, mostrada a seguir:

$$\Delta H = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ΔH – Perda de carga ou de energia [m];

L – Comprimento da tubulação [m];

D – Diâmetro da tubulação [m];

g – Aceleração da gravidade [m/s²];

v – Velocidade do escoamento [m/s];

f – Fator de atrito de Darcy-Weisbach [adimensional].

Então, ainda restava uma maneira de mensurar o fator de atrito, parâmetro envolvido na perda de carga de uma maneira que não fosse o processo inverso, ou seja, conhecendo o valor da perda de carga total e todos os outros diversos parâmetros (comprimento da tubulação, velocidade do escoamento etc.) até que em 1939, Colebrook-White estabeleceu definitivamente uma lei para o fator de atrito f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

f – Fator de atrito de Darcy-Weisbach [adimensional];

D – Diâmetro da tubulação [m];

ε – Rugosidade da tubulação [m];

Rey – Número de Reynolds [adimensional].

Ficou restando um ultimo problema em se encontrar o fator de atrito pela formula de Colebrook-White que se tratava de obter várias iterações na equação até que fosse encontrado o valor do fator de atrito. Até que em 1976, Swamee & Jain criaram uma expressão explicita para o cálculo da perda de carga unitária, sem a necessidade de processos iterativos utilizando na fórmula somente parâmetros mensuráveis no sistema de transporte do fluido:

$$J = \frac{(0,203Q^2/gD^5)}{[\log(\varepsilon/3,7D+5,74/Rey^{0,9})]^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

J – Perda de carga unitária [m/m];

D – Diâmetro da tubulação [m];

g – Aceleração da gravidade [m/s²];

ε – Rugosidade da tubulação [mm];

Rey – Numero de Reynolds [adimensional];

Q – Vazão [m³/s].

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

Onde:

f – Fator de atrito [adimensional];

Re – Numero de Reynolds [adimensional];

ε – Rugosidade da tubulação [m]

D – Diâmetro da tubulação

Atualmente, a modelagem matemática em sistemas de distribuição de água torna-se factível. Esse conhecimento, junto ao desenvolvimento computacional fazem factível a modelagem através da linguagem computacional

3.3 Possibilidades de adequações de diferentes formatos de uso do EPANET

EPANET é um software que realiza simulações hidráulicas, podendo aplicar diretamente a modelagem matemática no sistema de distribuição de água em estudo, sendo este é um software de acesso livre. A combinação de um simulador hidráulico como o EPANET junto a técnicas de buscas de soluções fornecem resultados ideais no que se refere a operação de sistemas de abastecimento de água.

3.3.1 Algoritmos Genéticos em sistemas de abastecimento de água:

Os algoritmos genéticos são definidos como uma técnica de busca fundamentada na ciência da computação pelo americano John Henry Holland.

Esta técnica consiste em encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização e busca. Tal técnica foi embasada na teoria da biologia evolutiva, de Charles Darwin, onde as soluções são indivíduos de uma população e sua espécie que, mediante vários processos evolutivos, encontram uma solução mais adaptável às condições impostas por um sistema.

Sendo então inspirados na biologia evolutiva os algoritmos passam por diversos processos evolutivos como mutação, hereditariedade, seleção natural e recombinação, uma vez que um conjunto de soluções é criado aleatoriamente, formando gerações de soluções que se adaptam e formam uma nova população de soluções.

Por fim, a nova população é utilizada como entrada em uma próxima iteração do algoritmo. Este processo tende a atingir um equilíbrio na população de soluções, onde as próximas gerações não sofrerão mutações significativas, ou seja, a população de soluções tende a se tornar constante (AFSHAR, 2006). A seguir são listadas algumas características dos algoritmos genéticos:

- São baseados em uma codificação do conjunto de soluções possíveis e não nos parâmetros de otimização em si;
- Não existe uma solução única, e sim uma população de soluções;
- Não há necessidade de nenhum conhecimento derivado do problema, apenas de uma forma de se avaliar o resultado;
- Usam-se transições probabilísticas e não regras determinísticas.

Como mencionado anteriormente, os algoritmos genéticos são técnicas de busca de soluções em um campo abstrato, ou seja, a área de aplicação é de grande expansão, podendo ser utilizada não só no campo de sistemas de distribuição de água, mas para diversos fins.

O algoritmo genético utilizado no caso específico é sistemas de abastecimento de água, onde visava-se reduzir o custo do consumo de energia elétrica de equipamentos compressores (bombas) presentes em estações elevatórias, estas utilizadas para se vencer a topologia local e abastecer reservatórios em cotas superiores às cotas de captação de água para o consumo (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010).

O custo da energia elétrica idealizado foi o mínimo, buscado pela função objetivo (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010):

$$CE = \sum_{n=0}^N \sum_t^{24} C_{nt} \times E_{nt}(X_{nt}) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

CE = Custo da energia consumida (R\$);

E = Energia consumida (kWh);

C = Custo tarifário (R\$/kWh);

N – numero de bombas ativas e t – Fração temporal (h);

X – Variável de decisão, representando os estados operacionais da bomba.

As variáveis de decisão são representadas por valores binário indicando o estado de ligada e desligada.

A justificativa de se ter esse parâmetro explorado como função objetivo é de que, num sistema de abastecimento, 90% do consumo de energia elétrica se deve ao uso de compressores para dar aumento energético à água, para que esta chegue ao destino de consumo (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010).

Há também diversos fatores hidráulicos que influenciam na eficiência hidroenergética de um sistema, como rugosidade da tubulação, força de atrito, manutenção, local de implantação do sistema, tempo de uso dos equipamentos e etc.

Além das variáveis definidas anteriormente, também há variáveis implícitas na equação, que se tratam das equações da continuidade – para os nós – e da conservação de energia – para os anéis da rede. Para isto, o algoritmo genético deve trabalhar junto com uma rotina de cálculos voltados a tais variáveis hidráulicas que, para o estudo de caso, foi o Toolkit disponível no software EPANET.

Então, além de ser avaliada a quantidade de bombas trabalhando em um intervalo de tempo, a quantidade de ativações para cada bomba e tempo de funcionamento, o EPANET realiza uma rotina de cálculos onde se verificam as pressões nos nós e níveis dos reservatórios, estes que por sua vez possuem limites estabelecidos para que se operem em uma faixa ótima para o bom funcionamento e longevidade do sistema (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010).

Porém, dentre a população de soluções criadas pelo algoritmo genético, existe uma parcialidade na população de soluções que não é factível. Estas se devem a pressões e NR fora do padrão de operação, além do bombeamento em frações do tempo

onde a tarifa de energia elétrica é superior, uma vez que a tarifa de energia elétrica é diferenciada ao longo de 24 horas. A Tabela 6 mostra as restrições explícitas a esse sistema, havendo então uma seleção de regras operacionais ótimas para o SAA:

Tabela 6: Restrições explícitas

Restrições	Limites
Pressões nos nós	Pressões dos nós entre os limites mínimos e máximos
Níveis dos reservatórios I	Níveis dos reservatórios entre os limites mínimos e máximos
Níveis dos reservatórios II	Os níveis dos reservatórios no fim do horizonte operacional (24h) devem ser superiores aos níveis iniciais (0h)
Potência das bombas	A potência de cada bomba deve ser inferior à potência máxima permitida
Quantidade de acionamento das bombas	A quantidade de acionamento das bombas deve ser inferior a um limite pré estabelecido

FONTE: (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010)

Porém, além das restrições explícitas, há também um método para que se haja maior convergência de soluções factíveis na população final de soluções do problema

dados que se trata da adição de um sistema de correção de soluções, que dará origem à formação de um algoritmo genético híbrido (AGH). A Figura 6 mostra a diferença na geração do banco de dados referentes à população de soluções:

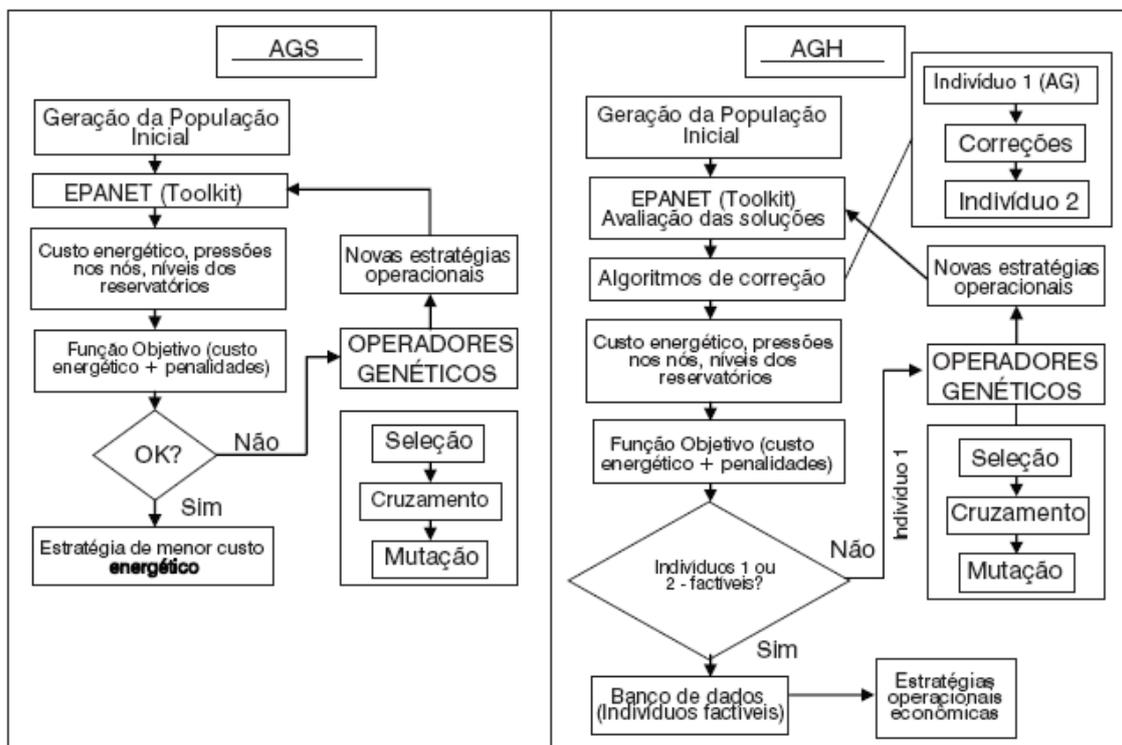


Figura 6 - Fluxograma dos modelos AGS e AGH (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010).

Um dos procedimentos básicos que diferenciam os dois modelos é que, quando o processo de seleção (cruzamento e mutação) só ocorrerá com uma população de soluções (geração) no AGS, o AGH realizará esses processos a cada passo de tempo, uma vez que houver necessidade, acusada pelas restrições calculadas no Toolkit do EPANET. Isso resulta em uma convergência mais rápida nos resultados, ou seja, menor número de gerações evoluídas a uma população de soluções ótimas.

Alguns tipos de algoritmos de correções são mostrados na Figura 7:

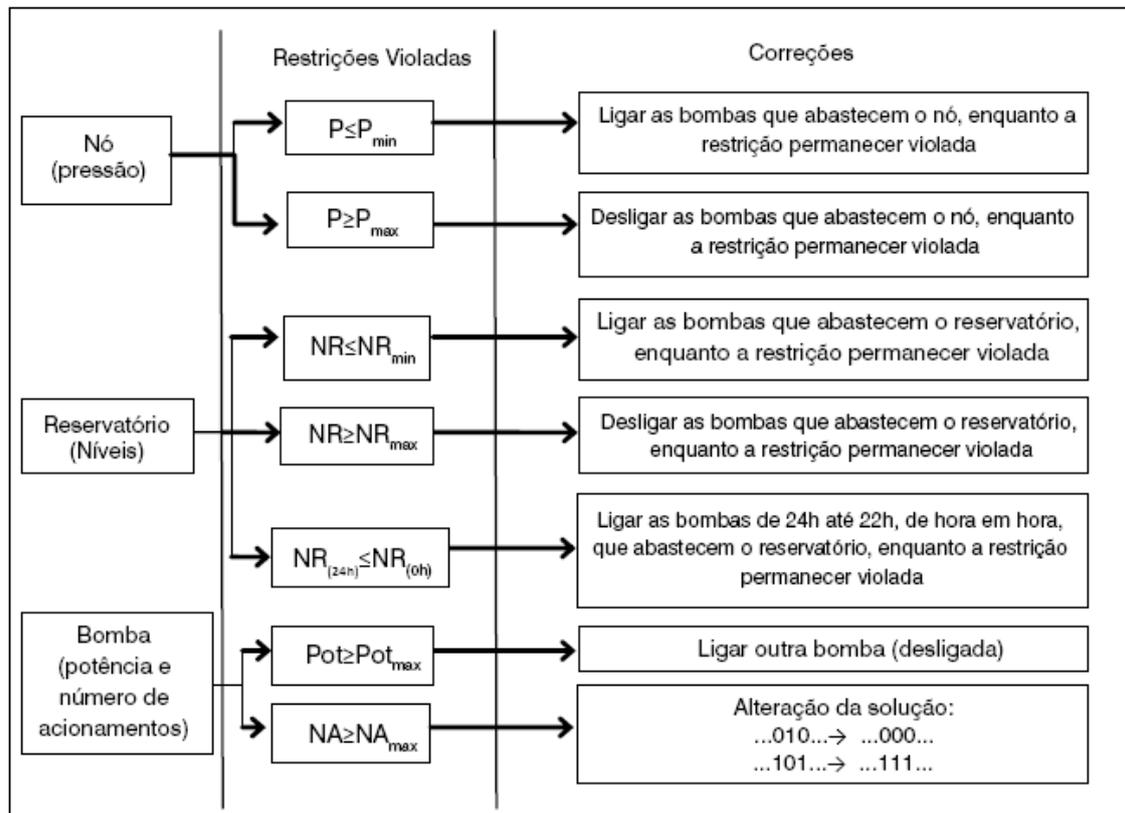


Figura 7 - Tipos de algoritmos de correções (COSTA, CASTRO, RAMOS, 2010).

Também é de suma importância a utilização dos algoritmos genéticos como técnica de calibração de redes, em conjunto com uma rotina de programação utilizando a linguagem computacional FORTRAN e um plug-in para o mesmo chamado NAG, que consiste em uma biblioteca de rotinas de cálculos para versáteis finalidades, havendo no estudo em questão, a utilização das rotinas hidráulicas.

A calibração de redes utilizando algoritmos genéticos consiste em determinar um parâmetro difícil de ser mensurável na rede de distribuição, a rugosidade. Então, o processo fundamenta-se em estruturar os cálculos teóricos da rede, obtendo as pressões nos nós e determinando as vazões de consumo base nos mesmos, além de definir outros parâmetros diversos da tubulação como comprimento, diâmetro, velocidade do fluxo (conseqüentemente encontrando-se a vazão correspondente no trecho) e cota dos nós.

Uma vez que calculado os processos dentro da rede, utilizando um valor inicial de rugosidade (tubulações de certo material, novos), um reflexo direto haverá nas pressões devido à influência no fator de atrito, que, quanto maior for a rugosidade, menor serão os valores de pressão nos nós, pois a energia contida na massa da água irá dissipar-se ao longo da dos trechos, em trechos com maior rugosidade havendo maior dissipação e menores dissipações com menores valores de rugosidade.

Então, como existe uma mudança significativa nos valores de rugosidade em tubulações em sistemas que possuem mais de 10 anos de funcionamento, por exemplo, os nós apresentarão mudanças em seus padrões de pressão. Então a calibração é feita através das medições de pressão no local, estrategicamente estruturadas, e seus valores são fornecidos como dados de entrada para a rotina de programação que fará uso do algoritmo genético, e fornecendo diversas soluções factíveis, expressando em uma de suas soluções, o valor que melhor representará a realidade da rede (SILVA, 2003). Esta determinação pode ser muito útil a se adotar como uma técnica para saber quando e onde substituir trechos da tubulação por se conhecer as suas tendências locais.

3.4 Modelos matemáticos para previsão de demanda

3.4.1 Previsão de Demanda

Prever quantitativamente e qualitativamente a necessidade de água em um sistema complexo pode ser uma ação que, se ocorrer de maneira eficaz, trará além de benefícios econômicos ao setor que produz o produto final de consumo: a água potável.

Benefícios econômicos a população, cliente fiel das companhias e dos sistemas distribuidores. Mas, por uma perspectiva, a relação econômica se mostra como indicador de desempenho e satisfação em relação ao produto, uma vez que, sempre que

houver previsões abstraídas a um horizonte no qual ainda se possa estimar parâmetros diversos e possíveis propagações de seus erros em relação ao tempo utilizado para as projeções, evitando intensas problemáticas futuras, que requerem soluções complexas necessárias a resolver problemas que abrangem todo o setor.

Prever a demanda de maneira eficiente implica em um investimento mínimo para a companhia/sistema distribuidor, e obter retorno de um máximo benefício líquido, uma vez que, conhecida as necessidades presentes e havendo um alto grau de sensibilidade das necessidades futuras para uma determinada população, local, sistema, etc, decisões a serem tomadas se tornarão mais claras.

Há assim melhores maneiras de se estruturar projetos como selecionar técnicas mais adequadas para implantação de sistemas e reforma e reestruturação dos mesmos, controles de prevenção e correção mais apurados, o que leva a um consumidor mais satisfeito, usufruindo de um produto de melhor qualidade e investindo em uma taxa mais justa, o que de uma forma geral, refletirá no crescimento social, uma vez que investimentos em fatores como tempo e dinheiro serão poupados (OBRADOVIC,2000). A Figura 8 ilustra alguns dos elementos principais para se realizar uma previsão de demanda.

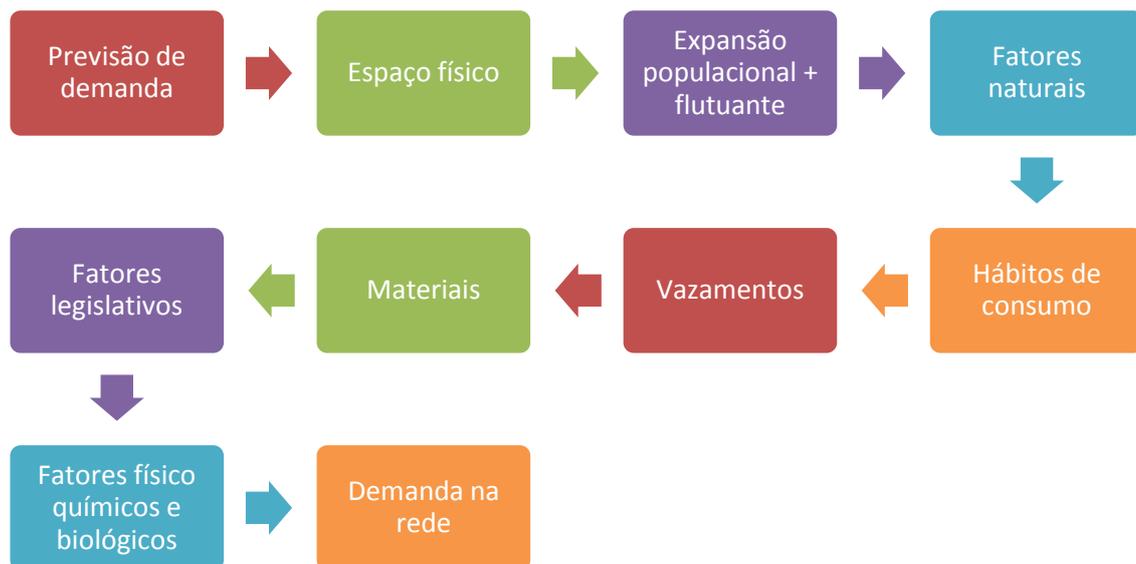


Figura 8 – Fluxograma ilustrando fatores necessários para previsão de demanda de água na rede de distribuição.

Prever a demanda de água para os diversos usos em uma sociedade necessita de um nível de sensibilidade avançado em um abrangente conhecimento dos fatores e parâmetros que regem o funcionamento do sistema, que implicam tópicos (estes que se subdividem em sub tópicos) como espaço físico, ciências naturais, tempo, conhecimentos antropológicos, materiais, processos estruturais, legislativos, físico-químicos, biológicos, e muitos diversos, estes que por fim, compostos em harmonia, possibilitarão uma projeção futura que fornecerá em um alto grau de confiabilidade a futura necessidade de consumo de água, energia, mão obra, materiais e afins para um dado sistema.

O espaço físico implica no local onde será implantado o sistema com seus diversos componentes que compõe a rede distribuidora de água e coletora de esgotos, conhecendo o espaço onde o sistema será implantado junto aos seus limites físicos por onde se desenvolverão expansões da cidade ou município em questão.

As ciências naturais contribuem com percepções do espaço natural original e seus fenômenos regionais, destas percepções destacam-se a morfologia do local, podendo se tratar de um local de uma altitude variável e também de sua localização geográfica ao longo do globo terrestre, que implicará em formações rochosas distintas.

Acessos a corpos da água através das inúmeras linhas de drenagem que se delinearão pela geomorfologia que vem sendo mudadas através de intempéries diversas em todo o planeta, estas sendo definidas pelo clima, com fatores diretamente ou indiretamente influenciáveis como:

- índice de radiação solar local;
- medições anemométricas;
- pluviosidade;
- fenômenos climáticos;
- formação rochosa;
- tipo de solo;
- tipo de bacia;
- trecho no talvegue onde se encontra o ponto de captação (podendo este basicamente situar-se no trecho superior, médio ou inferior);
- declividade dos trechos por onde escoam as principais linhas de drenagem.

Além destes fatores existem também fenômenos hidráulicos, estes todos que por fim convergirão em informações que identificará o potencial do corpo aquático, restando por fim apenas o uso racional e bem distribuído deste recurso de vital necessidade.

O tempo que levou a desenvolver o histórico antropológico presente, que define a expansão ou contração de um sistema de distribuição de água até o estado do sistema atual. Geralmente se tratando de um processo de expansão, basicamente de classe urbana, com aumento da impermeabilidade do solo devido a transformações na ocupação do solo, passando do solo florestado, com alto grau de retenção hídrico.

Além do uso do solo para pavimentação, o que aumenta o escoamento superficial sobrecarregando os corpos d'água, o que causa diversos problemas tanto no sistema de distribuição de água e coleta de esgotos como em prejuízos materiais a sociedade em regiões da cidade ou município mais suscetíveis a enchente, visto que, em função do crescimento desordenado e desenvolvido sobre obras e estruturas quais muitas já não suportam a capacidade atual, necessitando de reabilitações no setor de drenagem e distribuição de água potável por vez.

Outra problemática comum é a influência das cargas exercidas sobre o conjunto de tubulações pelos veículos de diversos portes, mas em especial os de médio porte, estes quais transitam dentro dos centros urbanos e possuem um peso exercido sobre o solo o suficiente para causar uma ruptura nas tubulações ou comprometer as juntas, o que num somatório contribui significativamente para o aumento do índice de perdas.

Geralmente essas rupturas e vazamentos nas juntas são em suma o grande problema do sistema de distribuição de água, já que estes além de serem mais difíceis de serem detectados, também exigem maior investimento em sua correção em comparação aos vazamentos grosseiros que levam um curto espaço de tempo para serem detectados, já que, de alguma forma, ele pode ou refletir na queda da pressão de serviço nas residências ou até mesmo se manifestar como um aumento drástico na conta de uma economia (não necessariamente uma residência, mas sim um hidrômetro). O

dimensionamento na região e as características dos materiais influenciam diretamente as rupturas e vazamentos. Uma vez que, um projeto fora ordenado a abastecer certa quantidade de pessoas e houver um tempo de usufruto dessa estrutura, a mesma vai se comprometendo: a vida útil vai se esgotando, o que leva ao baixo rendimento do equipamento, podendo retirar a potabilidade da água inclusive por inserção de sinistros dentro do sistema de distribuição.

Muitas tubulações, já com idade avançada e da composição diferente da tecnologia de produção atual, ou seja, das tubulações de ferro às de PVC, tendem a se romper mais facilmente com altos níveis de pressão, estes altos níveis de pressão gerados por mal planejamento na estrutura, uma vez que tem-se como desafio constante acompanhar o avanço da sociedade e realizar correções e prevenções em sistemas como este, que costumam exigir técnicas cada vez mais avançadas e mão de obra qualificada (BIEUPOUDE et al, 2012).

A perspectiva legislativa é um interessante parâmetro a influenciar a eficiência de um sistema de distribuição de água. Esta, junto a diversos documentos técnicos e normas provêm por lei direitos e deveres aos consumidores e fornecedores de água potável (por exemplo, as normas voltadas ao sistema de abastecimento de água segundo a NBR), o que pode ser uma ferramenta no auxílio a catalisar os processos de prevenção e correção do sistema.

Dados tantos fatores e parâmetros que influenciam as demandas passadas, presentes e futuras, pode-se utilizar de tais informações para se obter previsões de demanda de água e energia cada vez mais apuradas, manipulando técnicas que aperfeiçoem a estruturação do sistema.

3.5 Ferramentas computacionais para processamento de dados

A modelagem implica na construção de uma “maquete”, onde esta possua um limite na escala onde permita que sejam analisadas como seria um esboço final do projeto, sendo uma forma mais econômica no que confere a tomada de decisões, pois antes de qualquer reforma estrutural esta entra com o papel de simular um ambiente funcionando em estado real. A modelagem matemática, qual será utilizada nos sistemas de distribuição de água, desempenha tal papel, sendo uma ferramenta de grande importância estratégica. Um banco de dados onde são inseridos dados espaciais (altitude, coordenadas) possuem características hidráulicas também a serem determinadas no banco dados além de dados como localização dos reservatórios, incluindo suas cotas além de sua capacidade, comprimento das tubulações e suas características diversas como diâmetro e rugosidade (OBRADOVIC, 2000).

A ferramenta de interesse, EPANET, tem a capacidade de realizar simulações que incluem dados de demanda de água e energia elétrica, além de todos os dados suficientes para que se realize uma modelagem virtual da real estrutura física, permitindo testar diversos cenários (por exemplo, horário de ativação de bombas, possíveis localizações para novos reservatórios) inferindo assim em novas estratégias para implantação de sistemas possuindo maior eficiência energética buscando pleno funcionamento do setor, com um mínimo de custo para elaborar seu planejamento.

A modelagem em conjunto com o conhecimento local fornecem uma ampla visão no que se refere à gestão dos sistemas, uma vez que um setor seja nitidamente conhecido, incluindo suas particularidades, soluções mais amplas apareceram com maior facilidade com apoio de uma ferramenta de modelagem.

Basicamente no caso das redes de distribuição de água, existe a problemática dos altos níveis de pressão em pontos em particular na rede de acordo com a sua estruturação, havendo maiores tendências a rupturas nas tubulações e consequentes vazamentos no local em questão, ou então, o inverso, haver níveis baixos de pressão na rede fazendo com que haja pouca energia para que ocorra o transporte da água ao local de destino final.

De forma ampla, quando estruturada a rede como na modelagem matemática, pode-se compreender de forma mais geral, o funcionamento da rede como um todo, resultando em uma melhor compreensão de onde haverão maiores e menores níveis de energia concentrados através dos nós na rede e conseqüentemente compreendendo-se a energia dissipada através de todo o sistema, buscando um maior equilíbrio e evitando desperdício de energia que geralmente se dissipa na tubulação acarretando rupturas e vazamentos.

Além da distribuição de energia simulada na rede como um todo, também há a simulação de micro vazamentos nas tubulações utilizando formas de modelagem matemática que trabalham com estruturas e mecânica dos fluidos, como é o caso do CFD, que estuda o escoamento a partir da solução numérica de equações diferenciais parciais eventualmente acopladas com modelos de turbulência.

Este software, por vez, pode fornecer importantes dados de estimativas no que se refere às perdas de cargas não calculadas, gerando um valor complementar a tais níveis de perda gerando um incremento na tentativa de se encontrar a justificativa para os índices de perdas que, no Brasil, comumente atingem níveis superiores a 40%, representando grandes prejuízos no setor.

A modelagem computacional fluido dinâmica de pequenos vazamentos possuindo 100 mm de diâmetro tem sido executada com valores reais de pressão e velocidade utilizando um modelo de fluxo turbulento de um código em CFD previamente testado (BEN-MANSOUR et al, 2011).

Ainda, segundo os estudos realizados por BEN-MANSOUR et al (2011, p. 1) em simulações, foi percebido que

“A condição firme nas tubulações tem mostrado uma assinatura clara na pressão e na variação do gradiente ao longo da tubulação, mas para vazamentos considerados muito pequenos (abaixo de 1 L/min) esta assinatura não é muito forte na variação de pressão, mas muito nítido no gradiente de pressão.”

De forma complementar, além de se fazerem possíveis a realização de modelagens matemáticas computacionais dos sistemas presentes e também a modelagem de alguns cenários específicos para dados, pode-se também utilizar de técnicas de busca, processadores computacionais que operam com rapidez arranjos onde são estabelecidos parâmetros diversos, sendo encontrada a forma otimizada de operação do sistema por meio destes. Estas se dividem basicamente em três classes, algoritmos genéticos, redes neurais artificiais e lógica fuzzy (AFSHAR, 2006).

3.6 Novos simuladores computacionais

Os simuladores computacionais tem ampliado cada vez mais as funcionalidades como ferramentas no auxílio de uma rede de distribuição de água. Seus desempenhos são cada vez mais direcionados, fazendo com que cada vez mais a informação a se trabalhar na rede seja mais precisa. As Tabelas 7 e 8 listam uma grande quantidade de

simuladores computacionais voltados a redes de distribuição e listam de uma forma muito bem seccionada seus fins e propósitos.

Software	Base	Hidrologia Hidráulica Poluição Tratamento Impactos a jusante Comportamento do reservatório Consumo de água Interação de águas subterrâneas Inundação	Transporte de água na rede Plantas de estações de tratamento Tecnologias Descentralizadas Corpos receptores de água Ambiente construído	Avaliação do reuso da água Operação e controle Avaliação de risco e impacto Implicações sociais Economia Implicações ecológicas Projeto conceitual Planejamento estratégico
		Processos da rede de distribuição	Componentes da rede de distribuição	Tipos de aplicações do modelo
BSM2				
EPANET				
Stimela				
InfoWorcs CS				
SIMBA				
SWMM				
SYNOPSIS				
WEST				
CALVIN				
CityDrain				

⁶PETER M. B., WOLFGANG R., PETER S. M., DAVID T. M., ANA D. (2014) A critical review of integrated urban water modeling – Urban drainage and beyond

Software	Base	Hidrologia Hidráulica Poluição Tratamento Impactos a jusante Comportamento do reservatório Consumo de água Interação de águas subterrâneas Inundação	Transporte de água na rede Plantas de estações de tratamento Tecnologias Descentralizadas Corpos receptores de água Ambiente construído	Avaliação do reuso da água Operação e controle Avaliação de risco e impacto Implicações sociais Economia Implicações ecológicas Projeto conceitual Planejamento estratégico
		Processos da rede de distribuição	Componentes da rede de distribuição	Tipos de aplicações do modelo
Aquacycle				
City Water				
Balance				
MUSIC				
MIKE URBAN				
UVQ				
UrbanCycle				
UrbanDeveloper				
DAnCE4Water				
ReVisions				
Vibe				

3.7 Indicadores aplicados aos sistemas de abastecimento de água

3.7.1 Correlação entre custos e consumos

Segundo LAMOGLIA (2013), a seguinte metodologia foi desenvolvida para o cálculo do custo da energia elétrica consumida pelos setores de estudo:

Determinação do custo parcial mensal de energia elétrica dos bairros estudados na captação e ETA;

$$C_{ETA_MB} = \frac{C_{ETA_MT} \times V_{CMB}}{V_{CAP}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

C_{ETA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da captação e ETA (R\$);

C_{ETA_MT} - Custo mensal total na captação e ETA (R\$);

V_{CMB} - Volume de água consumido pelos bairros (m³);

V_{CAP} - Volume de água mensal captado e tratado na ETA (m³).

Determinação do custo parcial mensal dos bairros estudados na EEA:

$$C_{EEA_MB} = \frac{C_{EEA_MT} \times V_{CMB}}{V_{Dist}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

C_{EEA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da EEA (R\$);

C_{EEA_MT} - Custo mensal total na EEA (R\$);

V_{CMB} - Volume de água consumido pelos bairros (m³);

V_{dist} - Volume de água mensal total distribuído (m³);

Determinação do custo total para cada bairro:

$$C_{TMB} = C_{ETA_MB} + C_{EEA_MB} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

C_{TMB} - Custo total mensal dos bairros estudados (R\$);

C_{ETA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da ETA (R\$);

C_{EEA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da EEA (R\$);

Determinação do custo total unitário referente aos bairros estudados:

$$C_{UVC} = \frac{C_{TMB}}{V_{CMB}} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

C_{UVC} - Custo unitário dos bairros estudados com base nos volumes de água consumida pelos bairros (R\$/m³);

C_{TMB} - Custo mensal total dos bairros estudados (R\$);

V_{CMB} - Volume de água mensal total consumido (m³).

3.7.2 Custo do volume perdido

Ainda segundo LAMOGLIA (2013), a metodologia para a determinação do custo do volume perdido nos setores em estudo consiste na utilização de um valor médio de vazão diária na entrada do sistema e, com base nos dias dos meses, calcula-se o volume mensal abastecido no sistema.

$$V_{EMB} = N_{DM} \times Q_{Méd\ Diária} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

V_{EMB} - Volume de entrada mensal nos bairros estudados (m³);

N_{DM} - Número de dias dos meses;

$Q_{Méd\ Diária}$ - Vazão média diária de entrada nos bairros estudados (m³/h)

Analogamente, pode-se realizar os cálculos da determinação do custo parcial mensal dos bairros estudados na captação e ETA:

$$C_{ETA_MB} = \frac{C_{ETA_MT} \times V_{EMB}}{V_{Cap}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

C_{ETA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da captação e ETA (R\$);

C_{ETA_MT} - Custo mensal total na captação e ETA (R\$);

V_{EMB} - Volume de água mensal abastecido na entrada a partir da vazão medida (m³);

V_{cap} - Volume de água mensal captado e tratado na ETA (m³).

Determinação do custo parcial mensal dos bairros estudados na EEA:

$$C_{EEA_MB} = \frac{C_{EEA_MT} \times V_{EMB}}{V_{Dist}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

C_{EEA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da EEA (R\$);

C_{EEA_MT} - Custo mensal total na EEA (R\$);

V_{EMB} - Volume de água mensal abastecido na entrada a partir da vazão medida (m³);

V_{Dist} - Volume de água mensal total distribuído (m³).

Determinação do custo total unitário referente aos bairros estudados:

$$C_{UME} = \frac{C_{ETA_MB}}{V_{Cons}} + \frac{C_{EEA_MB}}{V_{Dist}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

C_{UME} - Custo unitário dos bairros estudados do volume de entrada (R\$/m³)

C_{ETA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da captação e ETA (R\$);

V_{Cons} - Volume de água mensal total consumido (m³);

C_{EEA_MB} - Custo mensal dos bairros estudados proporcional ao custo total da EEA (R\$);

V_{Dist} - Volume de água mensal total distribuído (m³).

Determinação do volume de água perdido dos bairros estudados:

$$V_{PMB} = P_P \times V_{EMB} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

V_{PMB} - Volume de água perdida mensal nos bairros estudados
(m^3);

P_P - Porcentagem de perdas (%);

V_{EMB} - Volume médio mensal de entrada nos bairros estudados
(m^3).

Determinação do custo do volume perdido dos bairros estudados:

$$C_{VPMB} = C_{UME} \times V_{PMB} \quad \text{Equação 16}$$

Onde

C_{VPMB} - Custo do volume perdido dos bairros (R\$);

C_{UME} - Custo unitário dos bairros estudados do volume de
entrada (R\$/ m^3)

V_{PMB} - Volume de água perdida mensal nos bairros estudados
(m^3).

3.7.3 Índice de perdas

O índice é um fator muito importante que onde mostra o desempenho da rede.

Para obter-se esse índice tem-se a equação:

$$IDP = \frac{V_{Dist} - V_{Util}}{V_{Dist}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

- IDP - Índice de perdas;
- V_{dist} - Volume distribuído (m³);
- V_{util} - Volume utilizado (m³);

3.7.4 Fator de pesquisa

O fator de pesquisa trata-se de um indicador onde é feita a correlação entre a vazão mínima noturna e a vazão média diária. Este indicador mostra uma forte relação sobre a existência de vazamentos na rede, de forma que quando o valor mostra-se elevado, há grandes possibilidades de se encontrar vazamentos através de detecção acústica, e quando os valores mostrarem-se baixos, haverá necessidade de maior pesquisa para se encontrar os vazamentos (COSTA et. Al., 2011).

A equação do fator de pesquisa é mostrada abaixo:

$$FP = \frac{Q_{\min not}}{Q_{\text{méd diária}}} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

- FP - Fator de pesquisa (adimensional);
- Q_{min not} - Vazão mínima noturna encontrada nas horas de vazão mínima, entre 3 e 4 horas (m³/h);
- Q_{méd diária} - Vazão média diária (m³/h).

3.7.5 Vazão mínima noturna

Indica uma vazão de vazamentos no horário de consumo mínimo do sistema, sendo o período noturno. A vazão mínima noturna faz relação direta com as pressões na rede de distribuição, de modo que a associação é feita através da medição de vazão no horário mínimo de consumo e a sua associação com a variação de pressão no sistema ao longo do dia, o que fornece o perfil diário de perdas reais no sistema (SOUZA, 2011).

As equações que expressam esses valores é mostrada a seguir:

$$Q_{perdas} = (Q_{\min not} - Q_L) \times FND \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

Q_{perdas} - Vazão média das perdas reais diárias (m³/dia);

$Q_{\min not}$ - Vazão mínima noturna média do período amostrado (m³/h)

Q_L - Vazão de usos ou consumos legítimos médio no horário da mínima noturna (m³/h);

FND - Fator correção ou fator noite/dia.

O fator de correção é dado pela seguinte equação:

$$FND = \Sigma \left(\frac{PPMSi}{PMNS_{3-4}} \right)^{N_1} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$PPMS_i$ - Pressão média horária do setor, durante o período de dias de amostragem, da hora “i” do dia (mca).

$PMNS_{3-4}$ - Pressão noturna média no setor, obtida no horário entre 3:00 e 4:00 horas, correspondendo à pressão média de todos os dias no horário da vazão mínima noturna (mca).

N_1 - Expoente que depende das características dos materiais das tubulações (adimensional).

Os valores de N_1 apresentam variações baseados de acordo com as características dos materiais da rede de distribuição e ramais (Motta, 2010). Os valores são mostrados na Tabela 9:

Tabela 9 – Relação entre valores de N_1 e material da tubulação na rede de distribuição.

N_1	Material da tubulação
0,50	Ferro fundido e aço
1,00 – 1,15	Mistura de materiais
1,50 – 2,50	PVC e PEAD

Fonte: Motta, 2010.

3.7.6 Correlações entre pressão em redes e vazamentos

De acordo com estudos realizados por SILVA (1999, apud NEGRISOLLI, 2009), uma descrição do comportamento da ocorrência dos vazamentos é realizada, onde a redução de pressão na rede diminui significativamente a ocorrência de vazamentos.

De acordo com a equação matemática descrita pelo autor, utilizada para tubos metálicos, a vazão perdida (Q) é uma função proporcional á raiz quadrada da carga hidráulica (H), conforme a equação 20:

$$Q = f(H^{\frac{1}{2}}) \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

Q - Vazão perdida na rede de distribuição (m³/s);

H - Carga hidráulica (m);

f - Função proporcional à raiz quadrada da carga hidráulica.

Em função desta equação, a Tabela 10 representa para valores de reduções de cargas, as consequentes diminuições nos índices de perdas, para o caso de tubulações metálicas:

Tabela 10 - Relação de redução de carga X redução de perdas.

Redução de carga (%)	Redução de perda na rede (%)
20	10
30	16
40	23
50	29
60	37

Fonte: SILVA⁷ (1999, apud NEGRISOLLI, 2009)

⁷ – Silva et al., Indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água. 2. Ed., Brasília: SEPURB, 70 p, 1999.

Ainda verifica-se que, para tubulações em materiais plásticos (PVC), a redução das perdas com controle de pressão tem apontado coeficientes maiores que os apresentados pela tubulação metálica, o que implica em uma maior redução de perdas.

Na Figura 9 pode-se observar que a perda aumenta com o aumento da pressão média, com a curva acentuando para pressões mais altas. Existe uma grande vantagem na redução das pressões na rede, pois além de se diminuir significativamente o índice de suas perdas, também é um fator de fácil controle (NEGRISOLLI, 2009).

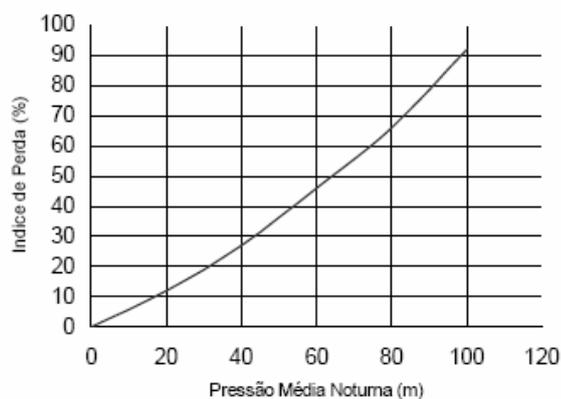


Figura 9 – Relação entre índice de perdas e pressão. Fonte: NEGRISOLLI, 2009.

4 Materiais e métodos

4.1 Etapas da realização do estudo

O estudo foi realizado a partir de 3 etapas básicas, que consistem em estabelecer um contato com a companhia responsável pela distribuição de água, a utilização de equipamentos para aquisição de dados e simulações computacionais e calibração, como mostra a Figura 10. Na Tabela 11 também são listadas etapas importantes para a realização da pesquisa.

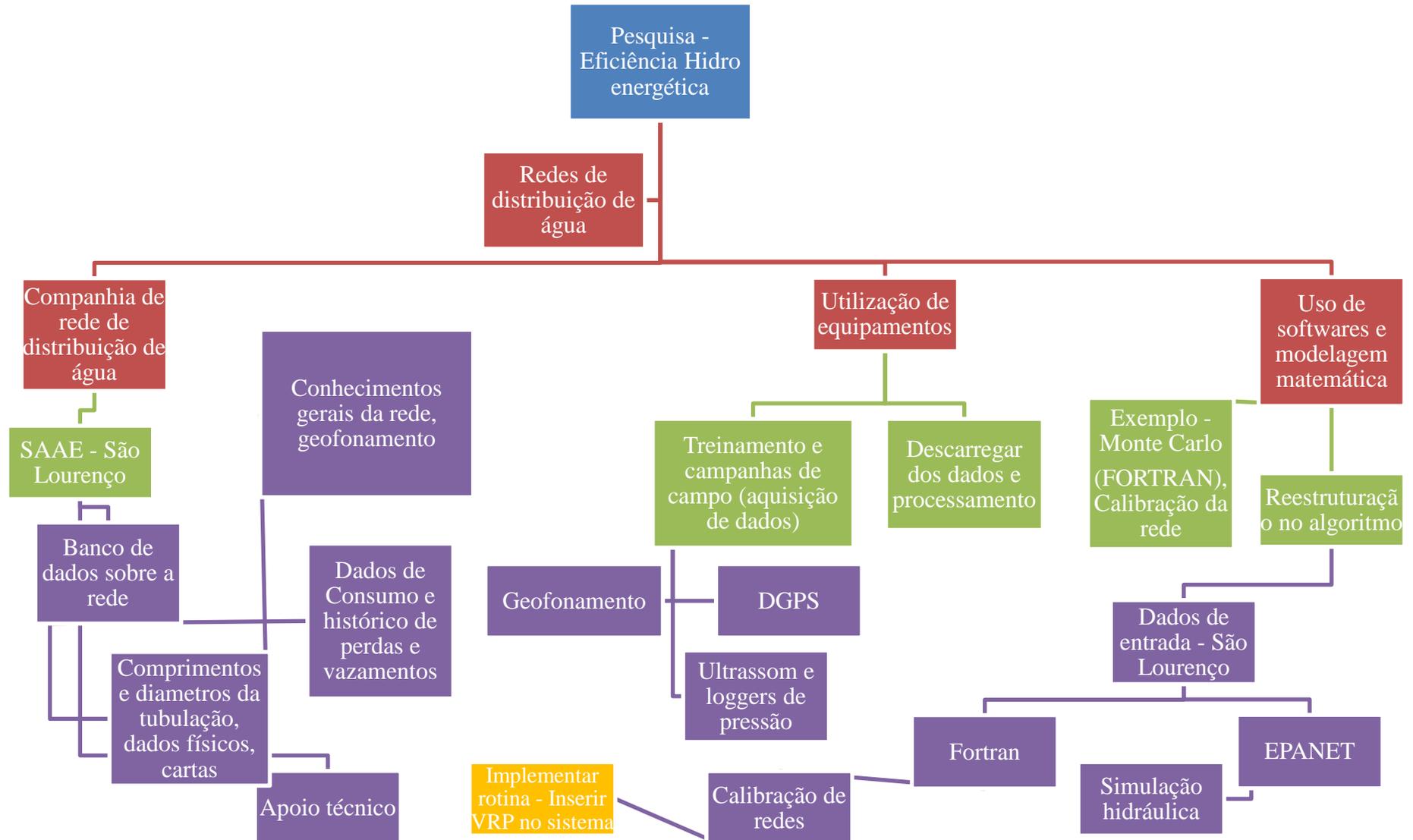


Figura 10 – Fluxograma básico da pesquisa.

Tabela 11 – Etapas da metodologia

Fases	Ações	Finalidades
Primeira etapa	Seleção do município e dos setores	
	Contato com a empresa – SAAE	Dados de projeto do sistema
	Treinamento: software e equipamentos	
Segunda etapa	Trabalho de campo	
	Implementação dos dados no EPANET	
	Simulação computacional	
	Análise dados de pressão e vazão	Dados de funcionamento do sistema
	Cálculos das perdas de água	
Terceira etapa	Cálculos dos custos das perdas	
	Análise do comportamento do sistema	Processamento de dados
	Análise de perdas e custos	

Fonte: Adaptado de Lamoglia⁸ (2013)

⁸ Lamoglia H. A., (2013) Estudo da correlação entre perdas de água e energia para setores do sistema de abastecimento de água da cidade de São Lourenço

4.2 Rede de estudo

4.2.1 Informações dos setores estudados do município

Para a realização do estudo foi necessária uma quantidade considerável de dados registrados. Primeiramente foi necessária a seleção de um município propício à pesquisa, cujos critérios são o setor possuir em seu sistema entradas e saídas conhecidas ao longo de todo o sistema para que se possa mensurar de forma estratégica estes dados ao longo da rede para que a manipulação de dados adquiridos pelas campanhas de campo forneçam resultados processados pelo algoritmo que esclareçam e demonstrem de maneira mais factível o comportamento da rede.

As redes de distribuição focadas no estudo pertencem ao município de São Lourenço-MG, nos bairros Vale dos Pinheiros e Moradas da Serra e ao município de Carmo de Minas, no bairro Palmela, este último bairro também pertencente à rede abastecida pelo SAAE de São Lourenço, devido à sua localização propícia ao abastecimento pela companhia, necessitando não de comprimentos muito extensos da tubulação para que a rede ampliada pudesse operar satisfatoriamente. A Figura 11 mostra a sua localização.



Figura 11– Localização dos bairros do setor de estudos.

Fonte: Google Earth (2013)

O município de São Lourenço - MG localiza-se no sul de Minas Gerais, faz parte do circuito das águas e possui atualmente uma população de aproximadamente 41,6 mil habitantes segundo IBGE (2013). Sua população flutuante implica em uma parcela significativa, visto que a infra estrutura da cidade faz do espaço um local propício a tal, por muitos motivos destaca-se o parque das águas.

A localidade de São Lourenço em relação ao município de Itajubá também é um fator que influenciou a escolha do município para a pesquisa. Passando pelas cidades de Maria da Fé, Cristina e Carmo de Minas, o município localiza-se a 64,6 km ou a 93,2 km de Itajubá passando pelas cidades de Piranguinho, São José do Alegre e Pedralva.

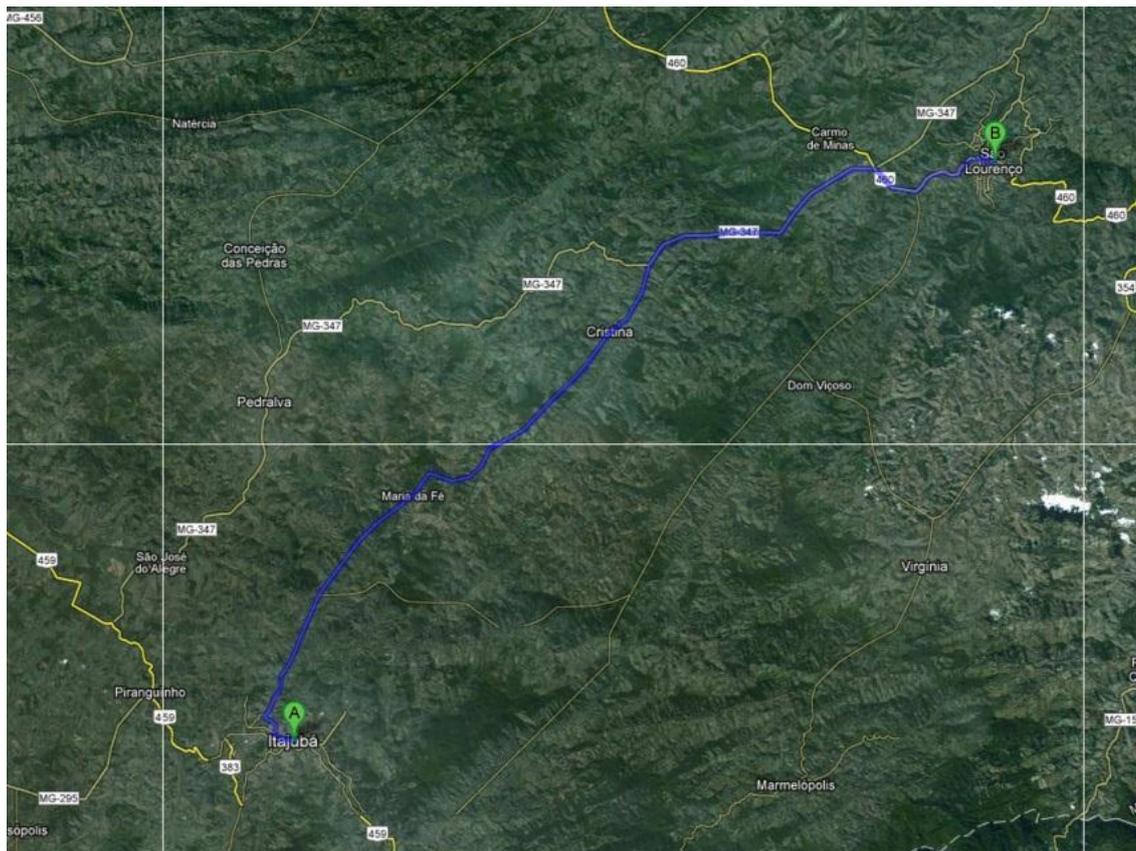


Figura 12– Distâncias entre o município de Itajubá e São Lourenço.

Fonte: Google Earth (2013)

Muitos dados somente podem ser obtidos com ajuda da companhia responsável pela rede, como a própria planta da mesma e parâmetros referentes à tubulação, dados imprescindíveis para o estudo. A pesquisa realizada contou com o Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) da cidade de São Lourenço – MG, e a Tabela 12 mostra as características que fazem propício o estudo do setor.

Tabela 12– Lista de características necessárias ao estudo

Características propícias ao estudo
<p>Setor isolado sem influência de outras partes da rede, com as entradas e saídas conhecidas para o volume de controle.</p> <p>Rede cadastrada com informações já registradas dando maior confiabilidade ao estudo.</p> <p>Auxílio e suporte dos técnicos do SAAE de São Lourenço – Auxílio em instalação de equipamentos, contato com moradores e todo conhecimento disponível sobre a rede necessário ao estudo.</p>

4.2.2 SAAE São Lourenço

Órgão Público municipal, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) foi criado em 15 de outubro de 1979, por intermédio da lei municipal n 1.181, tendo como objetivo ser a extensão das ações deliberadas pela prefeitura no sistema de água e esgoto local e solucionar definitivamente problemas relacionados ao abastecimento de água e esgotamento sanitário. No início contava com a Prefeitura Municipal e a Fundação SESP. Após o rompimento com a Fundação SESP, hoje renomeada Fundação Nacional da Saúde (órgão do Ministério da Saúde), reestruturou o órgão passando a ter Diretor Presidente, Diretor Adjunto e Diretor Administrativo Financeiro, nomeados pelo chefe do poder Executivo (SAAE, 2013a)

O SAAE cobre as atividades voltadas ao sistema de água, abastecimento e esgoto, implantando e organizando estruturas no sistema de água com o objetivo de proporcionar melhores condições sanitárias para a população. Basicamente as atividades para o abastecimento de água dão-se aos processos de captação, tratamento e

distribuição, focando a quantidade e qualidade de acordo com os padrões de potabilidade determinados pelo Ministério de Saúde (SAAE, 2013)

4.3 Dados de projeto do sistema

A captação de água é dada no Rio Verde, este principal rio pertencente ao município, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Grande. Sua qualidade é monitorada pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão de Águas) e possui classe apropriada ao consumo humano após tratamento adequado.

4.3.1 Abastecimento municipal

O setor estudado encontra-se no bairro Solar dos Lagos, este abastecido com água tratada fornecida por bombeamento até um reservatório através de um conduto adutor localizado na estação elevatória Vila Nova, que além de abastecer o bairro onde se encontram os setores de estudo, abastece os demais bairros de todo o município por intermédio de mais 3 adutoras, que abastecem os reservatórios e posteriormente se distribui ao longo de todo o município, como ilustra a Figura 13:

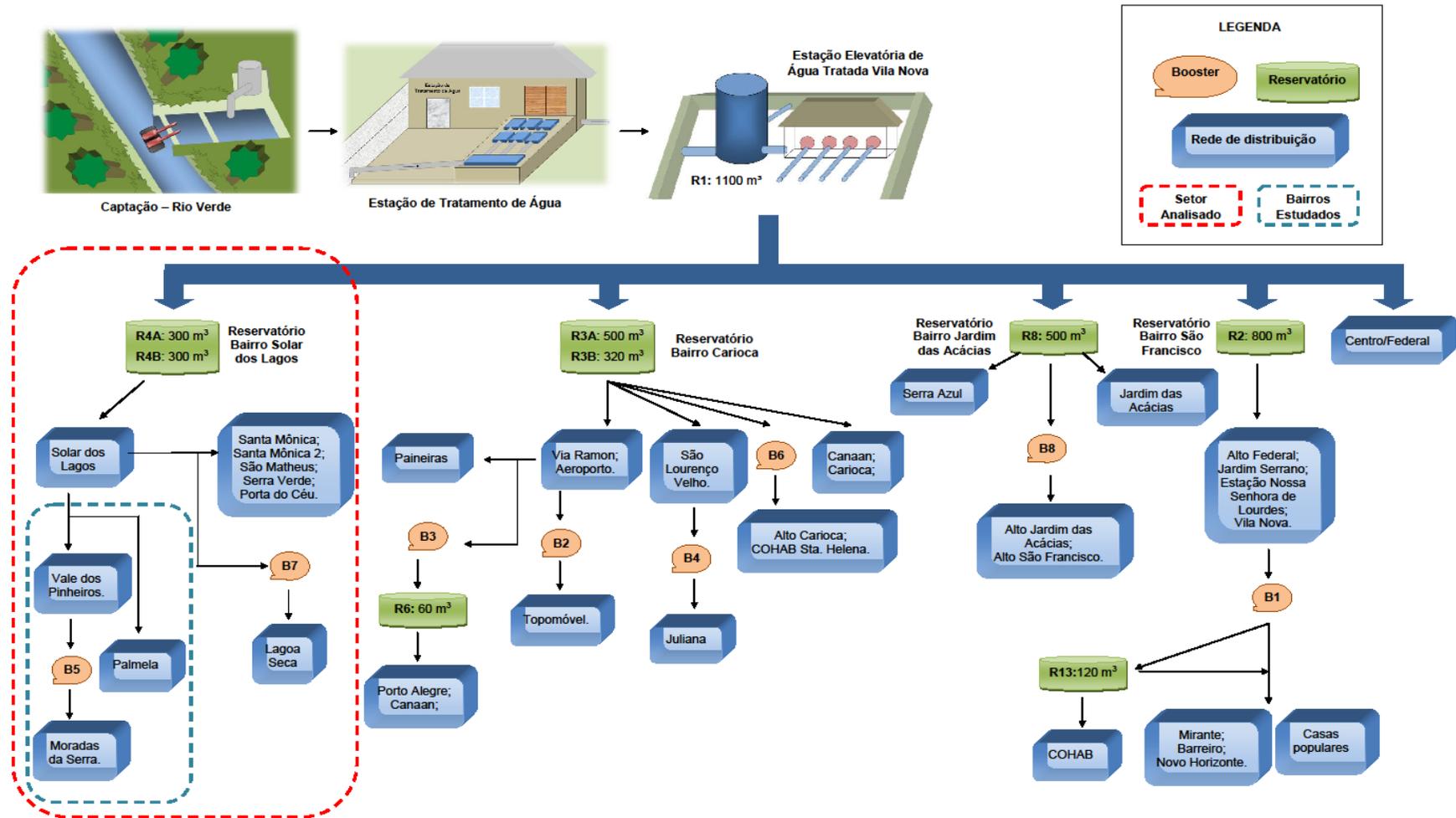


Figura 13– Esquema de todo o sistema de abastecimento do município. Fonte: Lamoglia (2013)

As localidades dos componentes principais do sistema de distribuição são mostradas na Figura 14:

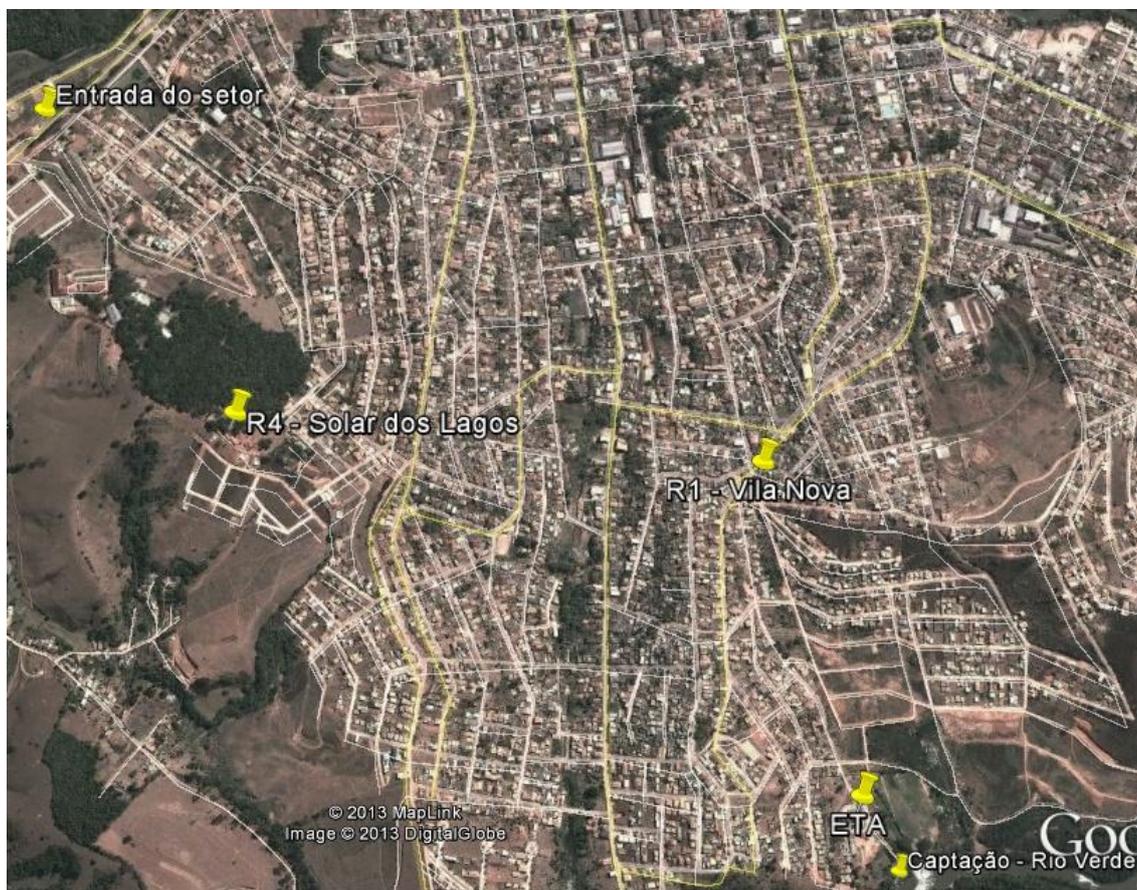


Figura 14– Localização dos componentes principais da rede de distribuição.

Fonte: Google Earth (2013)

Segundo VIANA (2010), Lamoglia (2013) e SAAE (2013) o sistema de distribuição de água do município de São Lourenço pode ser descrito através da sequência de seus componentes:

4.3.2 Captação

A captação dada no Rio Verde que corre as margens do município é dada através de um sistema de balsas, implicando na captação de água bruta de forma que a variação do nível de água do rio não altere sua capacidade de captação. A água captada é bombeada para a estação de tratamento através de um sistema de elevatória composta

por 3 conjuntos moto bombas, operando com a estratégia de manter 2 conjuntos operantes enquanto 1 é mantido como reserva. Uma visão aproximada da captação pode ser vista na Figura 15 e os 3 conjuntos moto bomba podem ser vistos na Figura 16.



Figura 15– Localização do ponto de captação de água bruta – Rio Verde.

Fonte: Google Earth (2013)



Figura 16 – Sistema de captação de água bruta.

Fonte: Lima et al.(2012, apud Lamoglia, 2013)

A água bruta então é recalçada até a estação de tratamento fluindo pelas tubulações compostas de PVC e ferro fofo, todas com o diâmetro de 300 mm. Estas operam em média 12 horas/dia, iniciando sua operação entre as 5:30 – 6:00 horas, com o horário fixo de desligamento de uma delas as 20:00 horas enquanto a outra bomba continua em operação até 1:00 ou 2:00 horas. Na Tabela 13 estão escritas suas características nominais.

Tabela 13– Dados nominais dos conjuntos moto bomba na captação

Bombas		Motores	
n [rpm]	1750	N [rpm]	1770
Q [m ³ /s]	432	I [A]	97
H [m]	18	V [V]	220
ϕ_r [mm]	249	Pe [cv]	40
D _s [mm]	275	Fabricante	EBERLE B 200 M4
D _r [mm]	254	N	296/0995
Potência [cv]	40	η [%]	92
Fabricante	IMBIL 150-260		

Fonte: SAAE (2014)

4.3.3 Estação de tratamento de água (ETA)

A água bruta conduzida através do sistema de captação recebe o tratamento convencional, tendo sua localização aproximada mostrada na Figura 17.



Figura 17– Localização da ETA. Fonte: Google Earth (2013)

A água depois de recebido o tratamento adequado à potabilidade, é então bombeada através de três conjuntos moto bombas para alimentar o reservatório principal (R1) encontrado na estação elevatória Vila Nova. Deste conjunto, dois bombeiam água para o reservatório aproximadamente 14 horas/dia, enquanto um fica inoperante em reserva. O desligamento de um dos conjuntos dá-se em torno das 21:00 horas e o outro às 2:00, sendo ambos religados em torno de 5:30 – 6:00 horas. As características nominais dos conjuntos são mostradas na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados nominais dos conjuntos moto bomba na ETA.

Bombas		Motores	
n [rpm]	1750	N [rpm]	1785
Q [m ³ /s]	-	I [A]	353
H [m]	-	V [V]	220
ϕ_r [mm]	-	Pe [cv]	150
D _s [mm]	200	Fabricante	WEG 280 S/M
D _r [mm]	175	η [%]	92
Potência [cv]	150		
Fabricante	MARK-PEERLEES		

Fonte: SAAE (2014).

4.3.4 Reservação

Ao longo de todo o sistema de abastecimento do município de São Lourenço, 9 reservatórios estão ligados a tubulações ramificadas que distribuem água para todo o município. Existe um reservatório matriz localizado na estação elevatória localizada no bairro Vila Nova, sendo seu material constituído de concreto e possuindo capacidade de

armazenamento de 1200 m³(Figura 18a). A partir deste reservatório toda a água tratada irá ramificar-se ao longo da rede abastecendo todo o município por gravidade em locais com altitudes inferiores e bombeando para locais de altitudes superiores, além de abastecer os demais reservatórios, como o principal fonte de abastecimento do setor isolado em estudo representado pela Figura 18b.



Figura 18a – Localização do reservatório da estação elevatória Vila Nova Fonte: Google Earth (2013).



Figura 18b – Reservatório Solar dos Lagos

4.3.5 Estações Elevatórias de água (EEA)

A água armazenada no reservatório Vila Nova é bombeada para os demais reservatórios através de 4 estações elevatórias que vão para os 4 bairros principais e de lá, realizando seu completo espalhamento disponibilizando água tratada para toda a cidade. O bairro onde encontra-se o setor de estudo chama Solar dos Lagos, e a água que chega até esse reservatório é transportada através de dois conjuntos moto bomba que operam isoladamente em torno de 10 a 12 horas/dia e possui as características nominais apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados nominais dos conjuntos moto bomba na EEA que abastece o bairro Solar dos Lagos.

Bombas		Motores	
n [rpm]	3500	N [rpm]	3540
Q [m ³ /s]	142,27	I [A]	138
H [m]	60,2	V [V]	220
ϕ_r [mm]	186	Pe [cv]	60
D _s [mm]	121	Fabricante	EBERLE B 200 L2
D _r [mm]	108	η [%]	91
Potência [cv]	50		
Fabricante	IMBIL 80-200		

Fonte: SAAE (2014).



Figura 19 – Conjunto moto bomba que abastece o bairro Solar dos Lagos. O primeiro conjunto moto bomba (azul escuro) encontra-se desativado.

4.3.6 Rede de distribuição de água

Redes basicamente ramificadas abastecem a cidade, com a qualidade pré estabelecida pela portaria vigente devido ao controle realizado nas etapas de captação, dos reservatórios e da distribuição. É importante ressaltar que os valores de perda apresentam-se bem abaixo da média nacional devido a ações estratégicas adotadas pela empresa, que em uma pequena e eficiente parte consiste na pesquisa de macro vazamentos, ou seja, vazamentos grosseiros, detectados através da geofonia ou da notificação de um consumidor através de um serviço bem eficaz, tendo esta estratégia uma forma mais rápida de se corrigir vazamentos antes que estes tomem grande proporção acarretando em grandes perdas em volume de água potável e aumentando o índice de desperdício.

4.3.7 Setores estudados

Através da Figura 20, pode-se observar em maiores detalhes os setores onde foram realizados as medições e estudos:

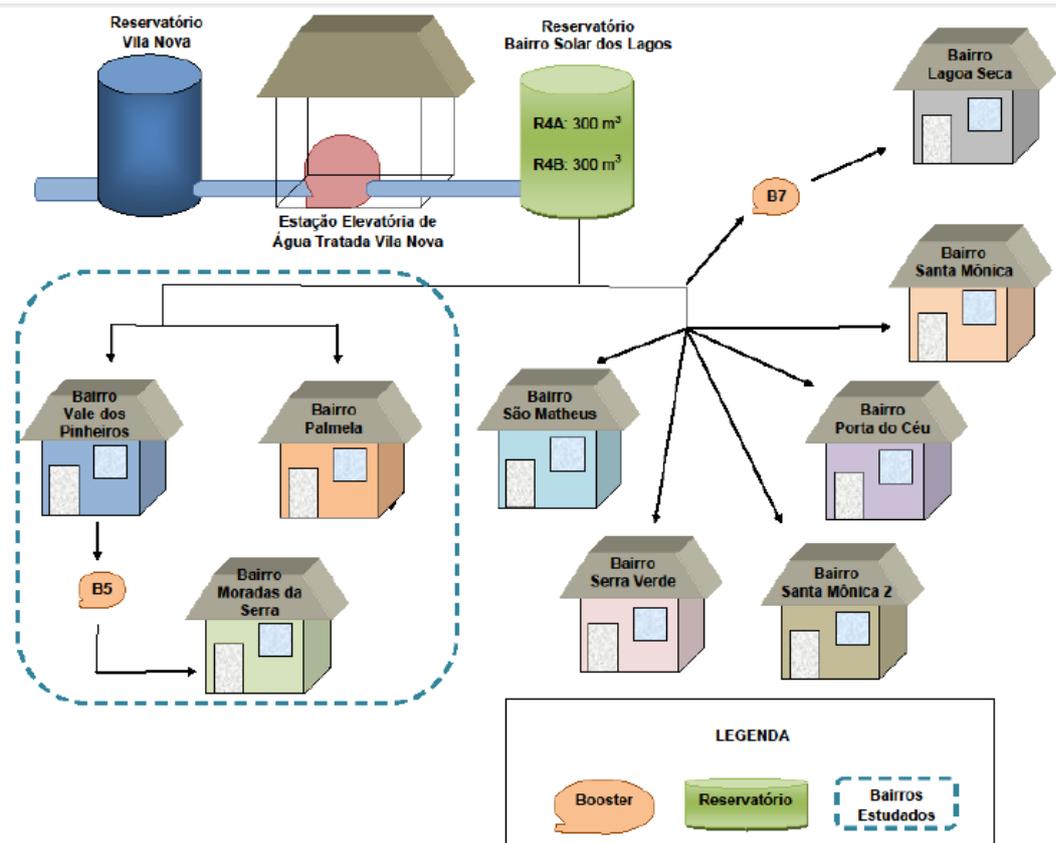


Figura 20– Esquema dos setores estudados.

Fonte: LAMOGLIA (2013).

Então, a água tratada saindo da estação elevatória é utilizada para abastecer o reservatório do bairro Solar dos Lagos, que de lá, abastece 9 bairros listados na Tabela 16.

Tabela 16– Bairros abastecidos e setores estudados.

Bairros abastecidos pelo reservatório	Bairros – setores de estudo
Lagoa Seca	
Santa Mônica	Vale dos pinheiros
Santa Mônica 2	
Porta do Céu	
Serra Verde	Moradas da Serra
São Matheus	
Vale dos Pinheiros	
Moradas da Serra	Palmela
Palmela	

A Tabela 17 lista os parâmetros necessários para a realização da calibração de redes e sua otimização no sistema instalando uma VRP para dissipar energia se necessário além de parâmetros que somente conseguirão ser obtidos através de trabalho de campo:

Tabela 17: Dados disponíveis por intermédio do SAAE e mensurados em campo

SAAE	Trabalho de campo
Planta da rede de distribuição	Cotas altimétricas
Localização dos nós	Pressão nodal
Comprimento e diâmetro da tubulação	Vazão de entrada do setor
Volume total consumido pelas economias	Vazão de saída da estação elevatória
Volume total bombeado ao setor de estudo	Detecção de vazamentos em macro-escala
Poço de visita para a tubulação de entrada do setor	Energia consumida pela bomba na estação elevatória
Localização de válvulas	Energia consumida pelo booster no setor
Local de captação de água bruta	

A planta da rede de distribuição fornece a estrutura do setor, e ao realizar uma rápida análise já se depara com o critério satisfeito para o estudo, que é o isolamento do sistema para que se possa fazer o balanço completo no sistema, tratando-se as perdas que pertencem somente ao setor analisado.

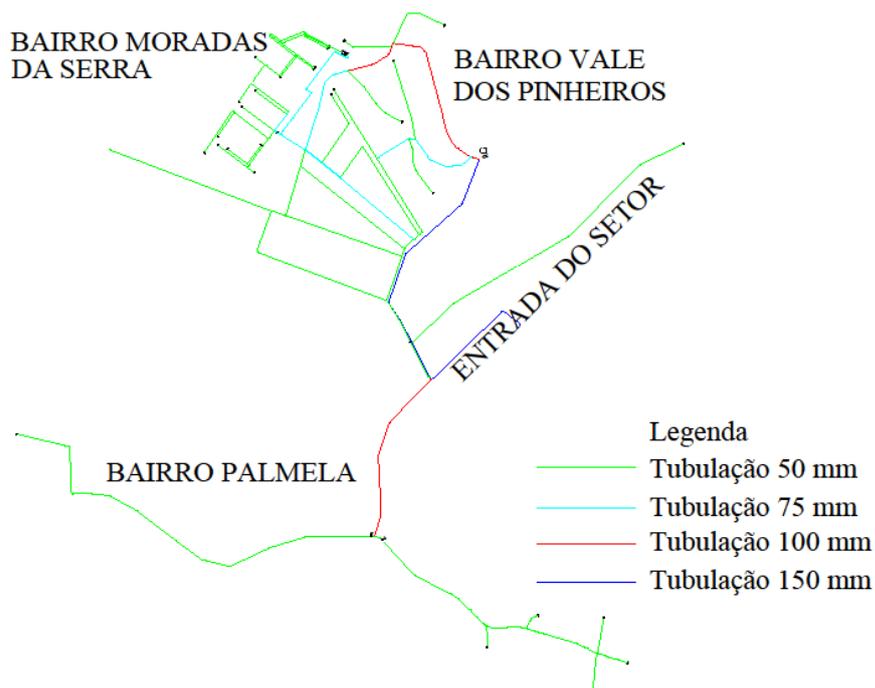


Figura 21– Setor estudado da rede de distribuição de água de São Lourenço/MG.

Encontrado o setor de interesse ao estudo com a ajuda do SAAE então houve a necessidade primária de obter-se dados referentes aos parâmetros da tubulação, como comprimento das tubulações, junções dos trechos (nós), comprimento dos trechos e diâmetros. Além destes dados também estão disponíveis os valores de consumo de água nas residências, que são utilizados para fornecer o valor de consumo nodal.

4.4 Equipamentos

Para a realização da modelagem matemática da estrutura física da rede resta então somente os valores de cota altimétrica dos nós e valores de vazão medidos em campo junto a loggers de pressão espalhados estrategicamente ao longo dos setores em estudo.

4.4.1 Differential Global Positioning System

Estes valores foram obtidos através do Differential Global Positioning System (DGPS), realizado em trabalhos de campo. Existe um empecilho singular em questão a aquisição de dados com o DGPS, porque a base do equipamento deve se posicionar em um ponto homologado pelo IBGE, ponto este que possui as coordenadas e cotas com alto grau de precisão. Só que, na cidade não foram encontrados pontos homologados, possuindo um ponto homologado somente na cidade vizinha a aproximadamente 15 km do ponto de coleta na rede de distribuição, Carmo de Minas-MG. A base, uma vez que instalada a tal distância, refletia na necessidade de se obter 20 minutos de aquisição de dados por ponto (nó), o que dificultava a logística do trabalho de campo, visto que a rede toda possui 110 nós. Então, com a ajuda de um técnico responsável pôde ser realizada a transposição da base do ponto homologado em Carmo de Minas-MG para a entrada do Setor, onde a Tabela 18 mostra a diferença entre o ponto de Carmo de Minas e da entrada do setor para a aquisição de dados, o que tornou a campanha muito mais ágil e eficiente. Na entrada do setor, foi inserido um marco feito com uma estaca de madeira e um prego no centro como mostrado na Figura 22, onde o DGPS teve um tempo de aquisição de dados de 5 horas contínuas, com a base instalada no marco do IBGE localizado e o móvel no marco inserido próximo da entrada do setor. Esta operação teve que ser realizada para que a transposição das bases pudesse ser viabilizada.

Tabela 18: Tempo para aquisição de dados com a base do DGPS em diferentes localidades

Local da base do DGPS	Tempo necessário para aquisição de dados [min]
Carmo de Minas (12 km da entrada do setor)	20
Entrada do setor	5



Figura 22– Inserção de uma base (estaca de madeira e prego no centro) na entrada do setor.

Com a redução do tempo necessário a coleta de dados, tornou-se mais ágil, quadruplicando a velocidade da coleta dos pontos. Esse ganho no tempo é de suma importância, pois as datas de coleta de dados estavam em estado de dificuldades devido a temporadas de chuvas, o que impossibilitava as medições. A Figura 23 mostra os DPGS base e móvel, próximos da entrada do setor.



Figura 23– DGPS base e móvel.

Pôde-se então gerar um arquivo de entrada contendo os dados altimétricos que foi posteriormente utilizado no algoritmo contendo os valores altimétricos referentes a cada nó. Dos parâmetros, resta ainda o consumo nodal, obtido através da relação entre os volumes de água consumidos pelas economias pelo nó correspondente na rede.

4.4.2 Geofonamento

O geofonamento trata-se de um método acústico, sendo um equipamento elétrico ou não, que através da haste de um material metálico tocando o solo no local onde se desconfia de um vazamento, ocorre um fenômeno de ressonância entre a haste e as ondas emitidas através da água que escapa da tubulação e se propaga através do solo, sendo assim possível a detecção do vazamento, desde que haja um ouvido devidamente treinado para se manusear o equipamento.

A Figura 24 mostra o uso de um geofone na rede estudada.



Figura 24 – Uso do geofone na rede em estudo.

4.4.3 Loggers de pressão

O próximo passo consiste em obter os valores de pressão para determinados nós da rede, através de um logger de pressão. Esse logger é instalado a uma torneira situada mais próxima a um cavalete que receba água direto dos condutos, ou seja, água vinda direta da rua que não entra na caixa d'água de uma residência, o que causaria grandes distorções nos valores de pressão. Para o trabalho de campo, existem disponíveis 12 loggers de pressão, que cobrem aproximadamente 15% do espaço amostral do setor estudado. Este equipamento registra pulsos de pressão em intervalos de 10 minutos, tendo um banco de dados satisfatório com registros de 24 horas contínuas, no mínimo. Estes valores de pressão foram utilizados posteriormente na calibração da rede além de outras análises. As Figuras 25 e 26 mostram alguns dos equipamentos utilizados na campanha. A Figura 27 ilustra o aplicativo utilizado para descarregar os dados.



Figura 25 – Datalogger instalado em torneira residencial



Figura 26 – Datalogger instalado em caixa residencial

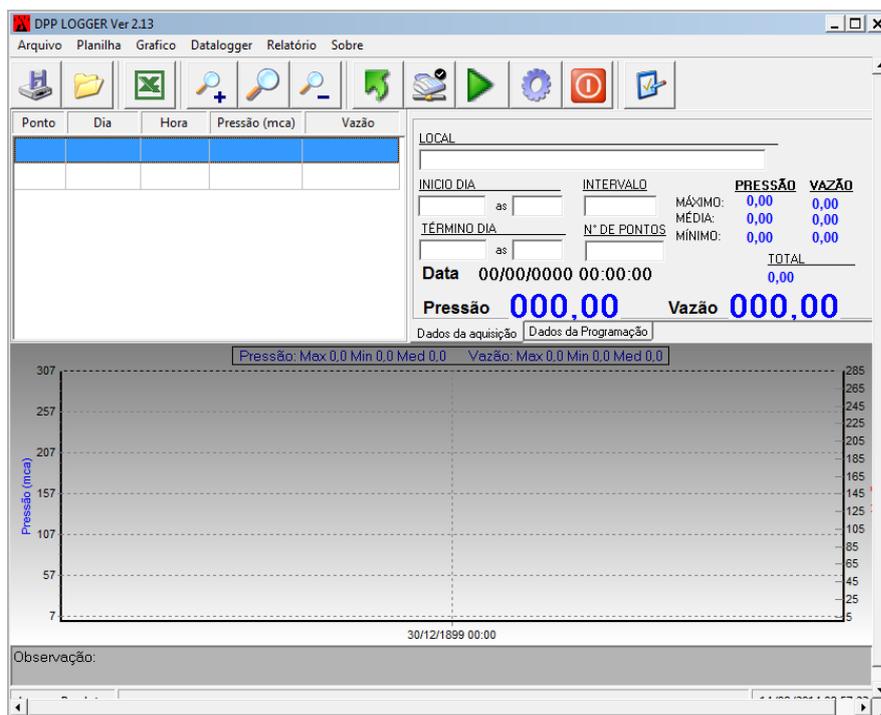


Figura 27 – Software aplicativo para retirada de dados

4.4.4 Medidor ultrassônico de vazão

Simultaneamente, foram medido os valores de vazão de entrada no setor e na saída da estação elevatória, ambas medidas com um ultrassom de vazão:

Os medidores ultrassônicos utilizam do efeito doppler para se determinar a velocidade do fluxo de água, e também para se quantificar o volume em um intervalo de tempo, através do mesmo processo, pelas ondas emitidas por um sensor à jusante que se deslocam até um ponto do tubo, continuando seu caminho até um segundo sensor receptor a jusante (deslocamento em 'V'), onde este ao receber a frequência e mandar os sinais de volta ao logger então permite calcular os valores de vazão e velocidade do fluxo, além de outros parâmetros.

Para a calibração de redes foram instalados simultaneamente dois medidores, um na saída da EEA Vila Nova que abastece o reservatório do bairro Solar dos Lagos e outra na entrada do setor de estudo mostrados na Figura 28 e 29.



Figura 28 – Medidor ultrassônico instalado na Estação Elevatória Vila Nova



Figura 29 – Medidor ultrassônico instalado na Entrada do Setor em Poço de Visita

4.5 Consumo de água nos bairros

O SAAE de São Lourenço – MG disponibilizou diversos dados de consumo referentes ao sistema de abastecimento, dados estes de suma importância para que se

possa estimar os consumos nodais na rede de distribuição, levantamento do índice de perdas, etc.

4.5.1 Vale dos Pinheiros

A seguir, na Tabela 19, a relação de economias (hidrômetros) e o volume contabilizado para o bairro:

Tabela 19– Número de economias e volume medido para o bairro Vale dos Pinheiros.

Meses	Economias	Volume (m ³)	Meses	Economias	Volume (m ³)
			Out/12	223	5461
Mai/12	222	4190	Nov/12	225	4570
Jun/12	222	3579	Dez/12	224	3977
Jul/12	221	4183	Jan/12	225	6044
Ago/12	221	4550	Jan/13	225	4838
Set/12	221	4934	Média	223	4620

Fonte: SAAE (2013, APUD LAMOGLIA, 2013).

4.5.2 Moradas da Serra

A seguir, na Tabela 20, a relação de economias (hidrômetros) e o volume contabilizado para o bairro.

Tabela 20– Número de economias e volume medido para o bairro Moradas da Serra.

Meses	Economias	Volume (m ³)	Meses	Economias	Volume (m ³)
			Out/12	82	2420
Mai/12	81	2129	Nov/12	82	1979
Jun/12	81	1973	Dez/12	82	2067
Jul/12	81	1813	Jan/12	82	2253

Ago/12	82	2264	Jan/13	82	2330
Set/12	81	2334	Média	82	2159

Fonte: SAAE (2013, APUD LAMOGLIA, 2013).

4.5.3 Palmela

A seguir, na Tabela 21, a relação de economias (hidrômetros) e o volume contabilizado para o bairro

Tabela 21 – Numero de economias e volume medido para o bairro Palmela.

Meses	Economias	Volume (m ³)	Meses	Economias	Volume (m ³)
			Out/12	198	2980
Mai/12	199	2664	Nov/12	199	3173
Jun/12	198	2595	Dez/12	199	3055
Jul/12	197	2368	Jan/13	199	3716
Ago/12	197	3130	Fev/13	200	4326
Set/12	199	3469	Média	198	3116

Fonte: SAAE (2013, APUD LAMOGLIA, 2013).

4.6 Volumes de água do sistema de abastecimento

Os volumes contabilizados ao longo do sistema são de suma importância para se identificar em qual trecho as perdas ocorrem e de quanto é a perda equivalente no trecho. Na Tabela 22, existem volumes quantificados em setores importantes do sistema, que serão utilizados como dados base para os cálculos e estimativas de perdas, assim como os valores apresentados na Tabela 23, onde são mostrados os custos na ETA e na EEA, o que ajuda a quantificar o valor da água distribuída no sistema.

Tabela 22– Volumes de água em todo o sistema.

Volumes [m ³]	Meses				
	Mai/12	Jun/12	Jul/12	Ago/12	Set/12
Total produzido	375149,6	380993,1	386579,9	392038,9	380077,2
Tratado na ETA	375149,6	380993,1	386579,9	392038,9	380077,2
Distribuído	368812,1	373943,1	379087,4	385731,4	374152,2
Real	240136,0	248117,0	222449,0	263565,0	280618,0
Faturado – Medido	359318,0	365261,0	351915,0	376132,0	385976,0
Consumido na ETA	6337,5	7050,0	7492,5	6307,5	5925,0

Volumes [m ³]	Meses				
	Out/12	Nov/12	Dez/12	Jan/13	Fev/13
Total produzido	424217,8	412832,9	439793,9	429334,8	404142,8
Tratado na ETA	424217,8	412832,9	439793,9	429334,8	404142,8
Distribuído	417032,8	404965,4	432278,9	421527,3	398187,8
Real	267790,0	286769,0	248382,0	300988,0	282156,0
Faturado – Medido	379728,0	393021,0	365545,0	400950,0	390165,0
Consumido na ETA	7185,0	7867,5	7515,0	7807,5	5955,0

Fonte: SAAE (2013, APUD LAMOGLIA, 2013).

Tabela 23– Gasto mensal da estação de tratamento de água e da estação elevatória de água.

Meses	Gasto mensal do ano 2012 [R\$]	
	ETA _{total}	EEA
Abril	53828,21	27300,99
Maio	49649,72	26224,59
Junho	54882,52	28347,05
Julho	49533,15	26026,80
Agosto	57405,57	28257,15
Setembro	59660,39	31344,91
Outubro	52127,27	29024,18
Novembro	64228,58	31181,95
Dezembro	59649,04	28930,09

Meses	Gasto mensal do ano 2013 [R\$]	
	ETA _{total}	EEA
Janeiro	56887,26	28700,51
Fevereiro	46603,81	24589,20

Fonte: SAAE (2013, APUD LAMOGLIA, 2013).

Também tem-se o valor do custo unitário para os bairros estudados de acordo com a Tabela 24:

Tabela 24– Custo unitário para os bairros estudados

Mês	Custo (R\$/m ³)	Mês	Custo(R\$/m ³)
		Out/12	0,19
Mai/12	0,20	Nov/12	0,23
Jun/12	0,22	Dez/12	0,20
Jul/12	0,20	Jan/13	0,20
Ago/12	0,22	Fev/13	0,18
Set/12	0,24	Média	0,21

Fonte: SAAE (2013).

4.7 Índices e vazões de perdas

Os valores são mostrados na Tabela25 de acordo com a Equação 16:

Tabela 25– Índices de perdas calculados.

Meses	IPD (%)	Meses	IPD(%)
		Out/12	35,79
Mai/12	34,89	Nov/12	29,19
Jun/12	33,65	Dez/12	42,54
Jul/12	41,32	Jan/13	28,60
Ago/12	31,67	Fev/13	29,14
Set/12	25,00	Média	30,85

No cálculo do fator de pesquisa, há necessidade de se fazer um levantamento dos valores de vazão ao longo do período estudado. A Tabela 26 mostra esses valores, valores máximos, mínimos e médios, valores compreendidos entre as 3 e 4 horas, horário esse onde o consumo é mínimo na rede.

Tabela 26– Valores de vazão utilizados no fator de pesquisa

Tipo de vazão	Vazão (L/s)
Mínima diária	2,71
Média diária	6,24
Máxima diária	10,24
Mínima às 3 hs	2,99
Mínima às 4 hs	2,85

Utilizando os valores da Tabela 26 tem-se o fator de pesquisa às 3 horas e às 4 horas, mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 – Fator de pesquisa as 3 e às 4 horas.

FP	Valor (adimensional)
3 h	0,48
4 h	0,46

Em sequência tem-se a Tabela 28, onde são mostrados dados diversos de grande importância para o estudo da rede, inclusive o de vazão de perdas, dado de suma importância no estudo.

Tabela 28– Vazão de perdas e dados adjacentes.

Dados	Valores
P_{3-4} (mca)	88,9
N_1	2
FND (horas/dia)	23,43
Q_L (L/s)	0
$Q_{min\ not}$ (L/s)	2,90
$Q_{min\ not}$ (m ³ /h)	10,44
Q_{perdas} (m ³ /dia)	244,65
Q_{perdas} (L/dia)	244655,3

Então, estima-se que para o setor em estudo, exista em média uma vazão de perda de aproximadamente 244,65 m³/dia, alcançando quase 250 mil litros de água perdidos por dia.

5 Resultados e discussão

5.1 Relação de proporção entre o sistema e o setor de estudo

No trabalho de Lamoglia (2013), foram gerados dois gráficos onde são mostradas as porcentagens de dois bairros em relação ao custo da captação e tratamento e outro em relação ao custo da estação elevatória, mostrados nas Figuras 30 e 31:

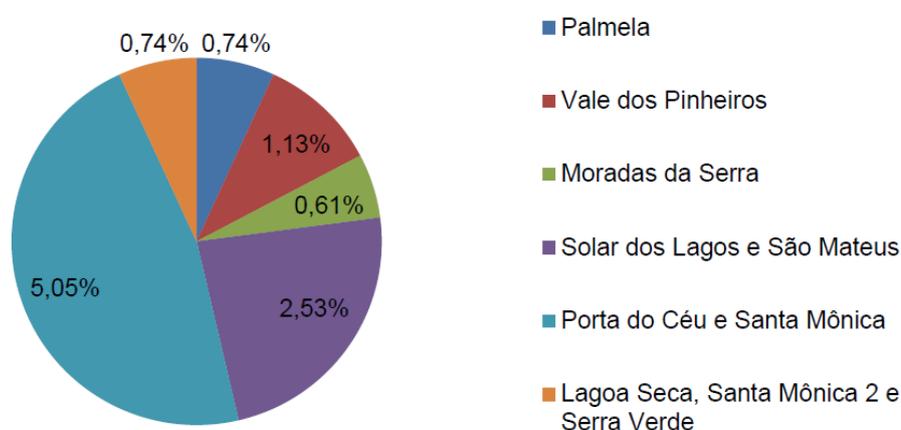


Figura 30– Porcentagens referentes ao custo de captação e tratamento de água.

Fonte: Lamoglia (2013)

O gráfico da Figura 30 indica que o setor estudado representa 4,72% de toda a rede de distribuição não contando os demais bairros abastecidos pelo reservatório Solar dos Lagos, o que significa que, se no setor estudado são perdidos aproximadamente 250 m³/dia, na rede de distribuição toda devem ser perdidos 5239 m³/dia, algo em torno de 5 milhões de litros de águas perdidos ao dia, se os índices de perdas e outros fatores forem de mesma intensidade ao longo da rede.

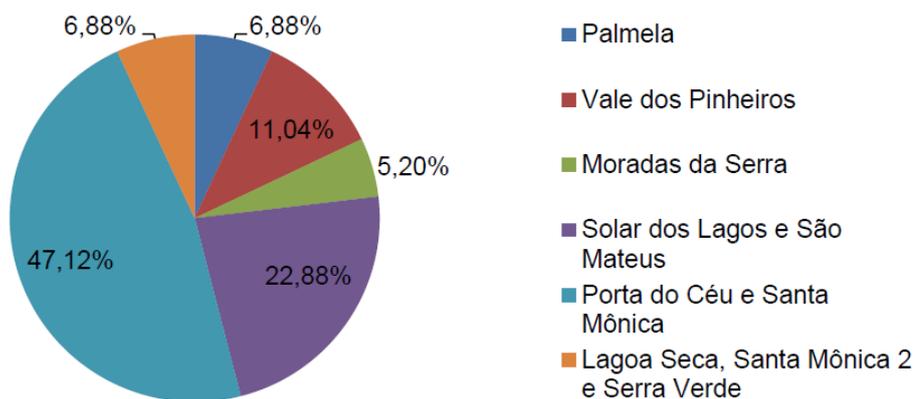


Figura 31– Porcentagens referentes ao custo da estação elevatória nos bairros.

Fonte: Lamoglia (2013)

Em posse de todos os dados até então pode-se chegar a ter noção de perdas de recursos naturais e financeiros acometidos pelas perdas ao longo da rede de distribuição, mostrados na Tabela 29 e uma representação gráfica mostrada nas Figuras 32 e 33:

Tabela 29– Volume perdido e seu custo mensal.

Dados	Setor estudado	Rede de distribuição total
	Volume perdido (m ³)	
Diário	244,65	5238,79
Mensal	7584,15	162401,50
Anual	89297,25	1912147,00
	Custo perdido (R\$)	
Diário	51,38	1100,14
Mensal	1592,67	34104,31
Anual	18752,42	401550,80

Nas Figuras 32 e 33 são mostradas a relação volume de água perdido no sistema de distribuição e custo da perda. O ideal é minimizar esses valores com o intuito de se poupar recursos naturais e financeiros, podendo iniciar-se em uma menor escala do tamanho do setor estudado, por exemplo, e posteriormente para o sistema todo, tendo o primeiro como um piloto, para que depois de dominado esse primeiro modelo, as mesmas aplicações se apliquem em uma escala maior e mais complexa.

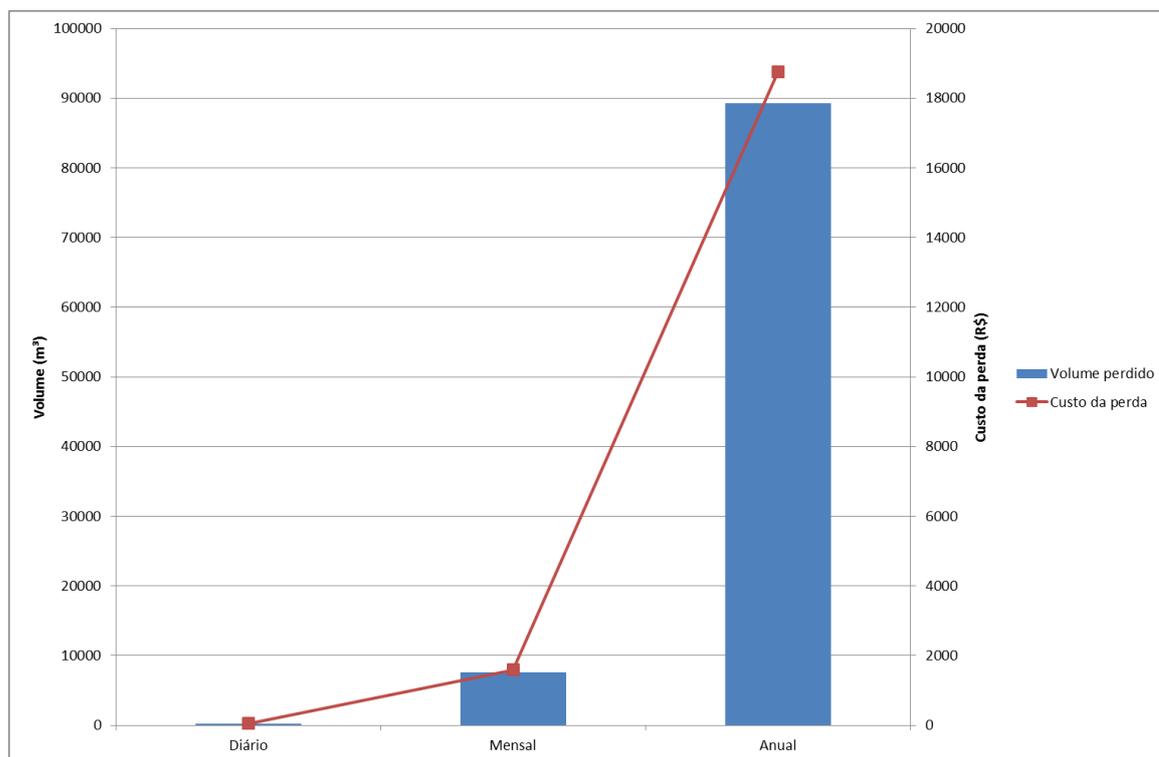


Figura 32 – Estimativa das perdas e seus custos para o setor estudado.

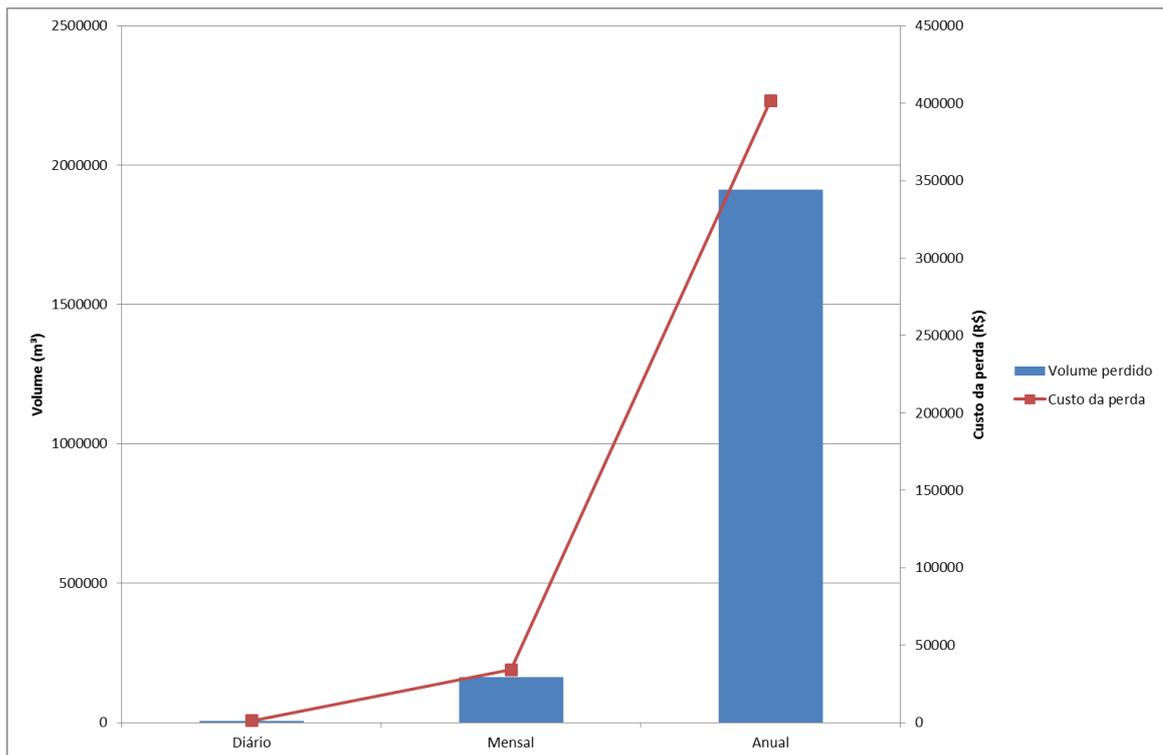


Figura 33– Estimativa das perdas e seus custos para toda a rede de distribuição.

5.2 Cálculo do consumo nodal

O cálculo dos consumos nodais fornece dados importantes para se utilizar na calibração da rede e também para a simulação hidráulica da rede, com seu valor de consumo afetando diretamente a pressão nodal.

Primeiramente, solicitou-se o histórico de consumo das economias localizadas no setor de estudo, valores representando cada economia (residência) em m³/mês. Um histórico com valores mensais do ano de 2013 foi utilizado no estudo.

Então, a próxima etapa consistiu em encontrar o valor total consumido por rua. Os valores obtidos são mostrados nas Tabelas 30, 31 e 32. Então, com os valores médios de consumo mensal pôde-se estimar o volume dos consumidores finais da rede em litros por segundo, que será utilizada no arquivo de entrada, fornecendo o consumo para cada nó no código para a calibração da rede:

Tabela 30– Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 no bairro Palmela.

Rua	Consumo mensal médio [m ³ /mês]	Consumo [L/s]
BR 460 Rodovia São Lourenço	683,38	0,264
Sebastião Ribeiro da Silva	459,56	0,177
Da Bomba	61,50	0,024
Hélio Junqueira da Silva	134,60	0,051
Jardim Nirvana	922,67	0,356
Estrada Pedra Preta	1,88	0,001
Vicente Guerra	349,90	0,135
Otávio Luiz Pereira	74,80	0,029

Tabela 31– Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 no bairro Vale dos Pinheiros.

Rua	Consumo mensal médio [m ³ /mês]	Consumo [L/s]
Pedro Ribeiro Arantes	264,69	0,10
Alameda das Orquídeas	404,43	0,16
Alameda dos Lírios	32,90	0,01
Alameda das Alamandas	378,99	0,15
Avenida B	0	0
Alameda das Hortências	25,90	0,01
Alameda das Camélias	290,68	0,11
Alameda dos Pinheiros	273,16	0,11
Alameda Lótus Lagoa	79,80	0,03
Alameda das Tulipas	43,60	0,02
Alameda das Rosas	149,22	0,06
Alameda das Margaridas	593,34	0,23
Alameda das Azáleas	352,57	0,14
Alameda das Primaveras	494,06	0,19
Alameda das Violetas	163,77	0,06
Alameda das Petúnias	15,6	0,01
Alameda dos Ipês	398,44	0,15

Como observado na Tabela 31, os valores da Avenida B mostraram-se nulos por não haver tubulações secundárias abastecendo consumidor algum ao longo do traçado da rede nos trechos referentes, sendo que esta apenas realiza o transporte da água para um ponto mais alto da rede.

Tabela 32– Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 no bairro Moradas da Serra.

Rua	Consumo mensal médio	
	[m ³ /mês]	Consumo [L/s]
Alameda Morena	221,2	0,085
Alameda da Mantiqueira	364,9	0,141
Alameda da Canastra	108,5	0,042
Alameda Boa Esperança	231,4	0,089
Alameda das Araras	401,5	0,155
Alameda Ibitipoca	215,2	0,083
Alameda do Cipó	242,4	0,094
Rua Projetada	27,3	0,011

Partindo destes valores, pode-se calcular o consumo mensal médio dos três bairros e a sua totalidade, listados na Tabela 33:

Tabela 33 – Valores médios de consumo mensal para o ano de 2013 dos bairros estudados.

Bairro	Consumo mensal médio [m ³ /mês]
Palmela	2715,34
Vale dos Pinheiros	3696,45
Moradas da Serra	1812,42
Total	8224,22

Após obtidos os consumos por rua, busca-se a distribuição do consumo para os nós contidos na rua. Como não foi possível obter a localidade exata de cada consumidor, esta distribuição representa de maneira estatística o consumo nodal, através da equivalência entre o comprimento total da rua e o comprimento de um trecho compreendido entre dois nós consecutivos contidos na mesma rua, calculando-se então consumo equivalente de cada trecho e distribuindo metade desse valor para cada nó.

O Anexo A esquematiza os trechos ao longo do traçado da rede e também o seu valor de consumo equivalente.

Então, por fim, obtém-se o valor do consumo nodal dividindo igualmente cada consumo do trecho para seus nós correspondentes, valores mostrados no Anexo B.

5.3 Pressões na rede

A rede oscila em momentos de maiores consumos de água, consumos mínimos dados no período da madrugada e consumos médios ao longo do dia. Pode-se observar que as pressões médias são atingidas praticamente em toda a rede ao mesmo instante (em torno das 17:09:00) assim como as pressões máximas (e torno das 03:09:00 enquanto poucos pontos atingem seu ápice as 05:59:00). O mesmo não acontece com as pressões médias, onde cada nó medido na rede atinge o seu valor médio em horários bem distintos uns dos outros, um comportamento comum. O importante a ressaltar é que ao se utilizar os dados como um arquivo de entrada no algoritmo, o mesmo horário é utilizado para todos os nós medidos ao longo da rede.

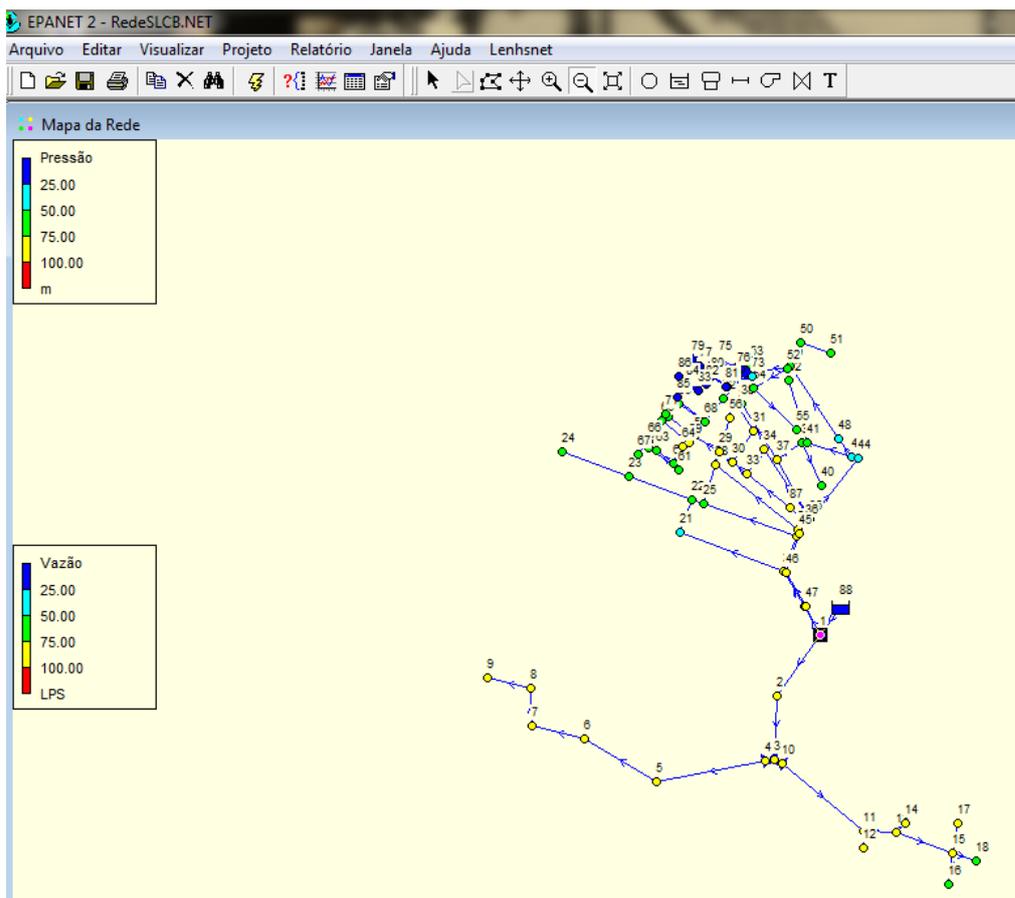


Figura 34 – Rede de distribuição dos 3 bairros estudados simulados no EPANET depois de coletados todos os dados de entrada necessários ao simulador.

Na Figura 35 é apresentado o traçado da rede com os pontos onde foram instalados os loggers de pressão e seus nós correspondentes, tendo também indicado na figura o local onde ocorreu o vazamento durante a campanha de campo onde foram mensuradas as pressões na rede:

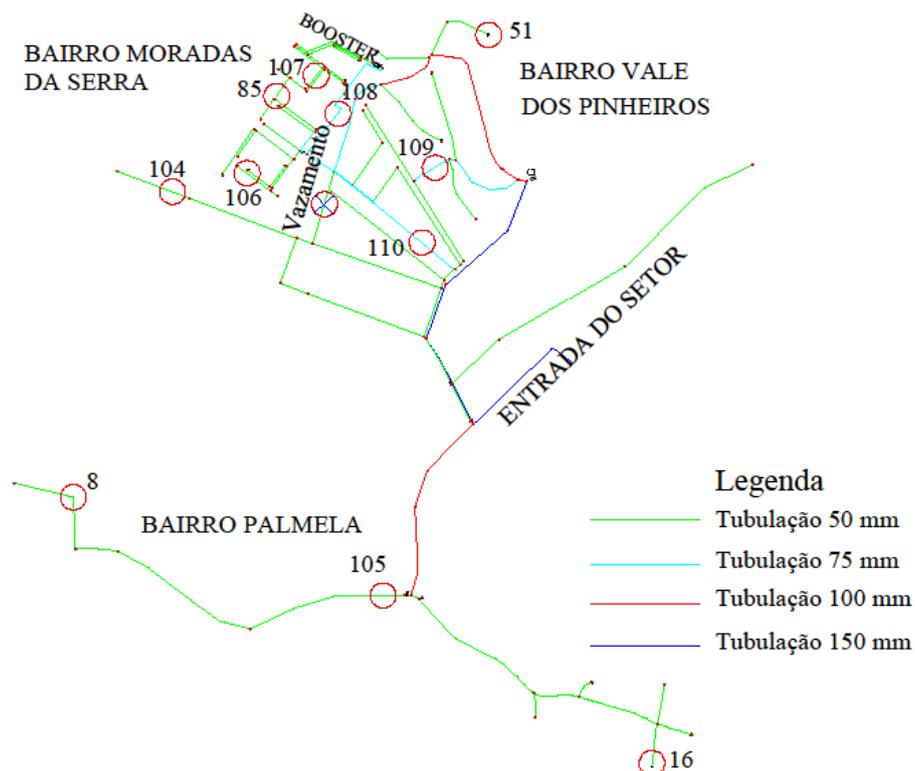


Figura 35 – Esquema do traçado da rede com os nós onde foram instalados os loggers e o local de vazamento.

Na Tabela 34 são mostrados os valores de pressão medidos na rede pelos loggers. Na tabela, são listados os valores de pressões médias, máximas e mínimas de cada logger, representando seu respectivo nó ao longo da rede. O interessante a se observar é que, para cada nó, as pressões médias, máximas e mínimas não ocorrem necessariamente no mesmo horário, mas existe uma predominância para cada um dos três padrões, o que definirá um horário fixo para cada padrão utilizado nos arquivos de entrada, tanto para o modelo de calibração quanto para o simulador hidráulico.

A Tabela 34 reflete o comportamento da rede em um período de 24 horas.

Tabela 34– Valores de pressões médias, máximas e mínimas medidas ao longo dos nós da rede e sua relação horária.

NÓS	P med [mca]	Horário	P máx [mca]	Horário	P min [mca]	Horário
PV	85,3	17:09:00	88,9	03:09:00	82	10:29:00
8	78,5	17:09:02	91,2	05:59:00	67,6	18:29:00
16	38,3	17:09:03	48,3	03:09:00	22,9	12:49:00
51	42,5	17:09:07	48	03:09:00	37,5	13:09:00
85	59,5	17:09:11	69,7	03:19:00	49	11:49:00
104	43,59	17:09:04	56,7	03:19:00	35,5	09:09:00
105	79,5	17:09:01	86	03:29:00	71,7	10:49:00
106	52,7	17:09:08	65,5	03:09:00	35,5	14:49:00
107	24,23	17:09:10	60,04	05:59:00	29,88	10:39:00
108	52,4	17:09:09	65,4	03:09:00	44,3	09:09:00
109	71,8	17:09:06	78	03:09:00	58,6	14:59:00
110	78,7	17:09:05	89,5	03:09:00	63,8	11:19:00

Na Figura 36 são mostrados os valores de pressão medidos ao longo da rede para os três padrões de consumo. É observado que, para a maioria dos nós, o limite de pressão é ultrapassado, ou seja, seus valores superam a faixa limite de 50 mca. Somente alguns nós específicos como o nó 16, possuindo uma cota elevada e localizado no final da rede, no bairro Palmela, o nó 51, localizado no ponto de maior cota do bairro Vale dos Pinheiros e o nó 107, localizado no bairro Moradas da Serra em um local também de cota elevada e após o booster não superam em nenhum dos três padrões a faixa limite de pressões, o que mostra que de forma geral, a média das pressões na rede tende a ter um valor superior ao limite permitido e suportado pelas tubulações.

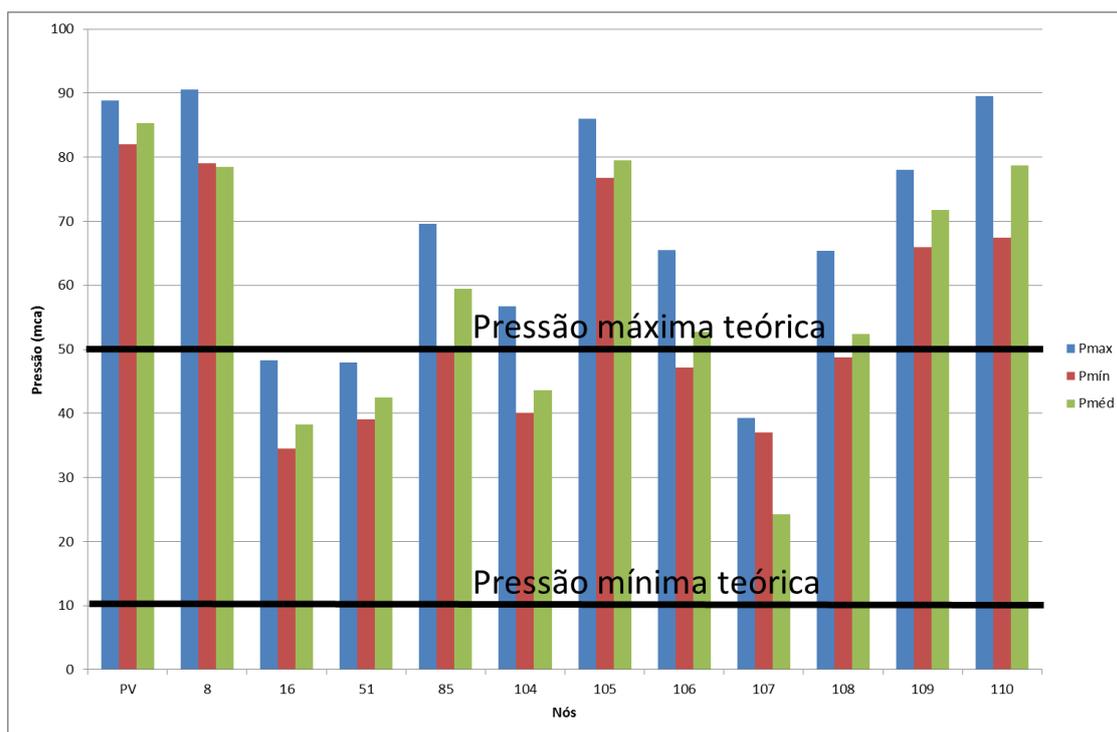


Figura 36– Pressões máximas, médias e mínimas dos nós monitorados na rede com o limite máximo estabelecido.

Com a instalação do medidor ultrassônico de vazão, foi obtida a curva que expressa a relação vazão x tempo para o período amostrado no estudo. Pode-se observar que houve uma queda brusca no início da medição, do período aproximadamente das

13:00:00 às 15:00:00. No momento dessa queda brusca, houve uma ruptura em um dos trechos da rede, mas por tratar-se de um valor a jusante do ponto de entrada o local onde houve a ruptura da tubulação, o esperado era que não houvesse alterações em seu aspecto quantitativo de vazão no ponto de entrada. A Figura 37 identifica com facilidade esse momento onde ocorre a queda súbita na vazão (horário em torno das 14:00:00 hr) e os aspectos da ruptura serão posteriormente discutidos.

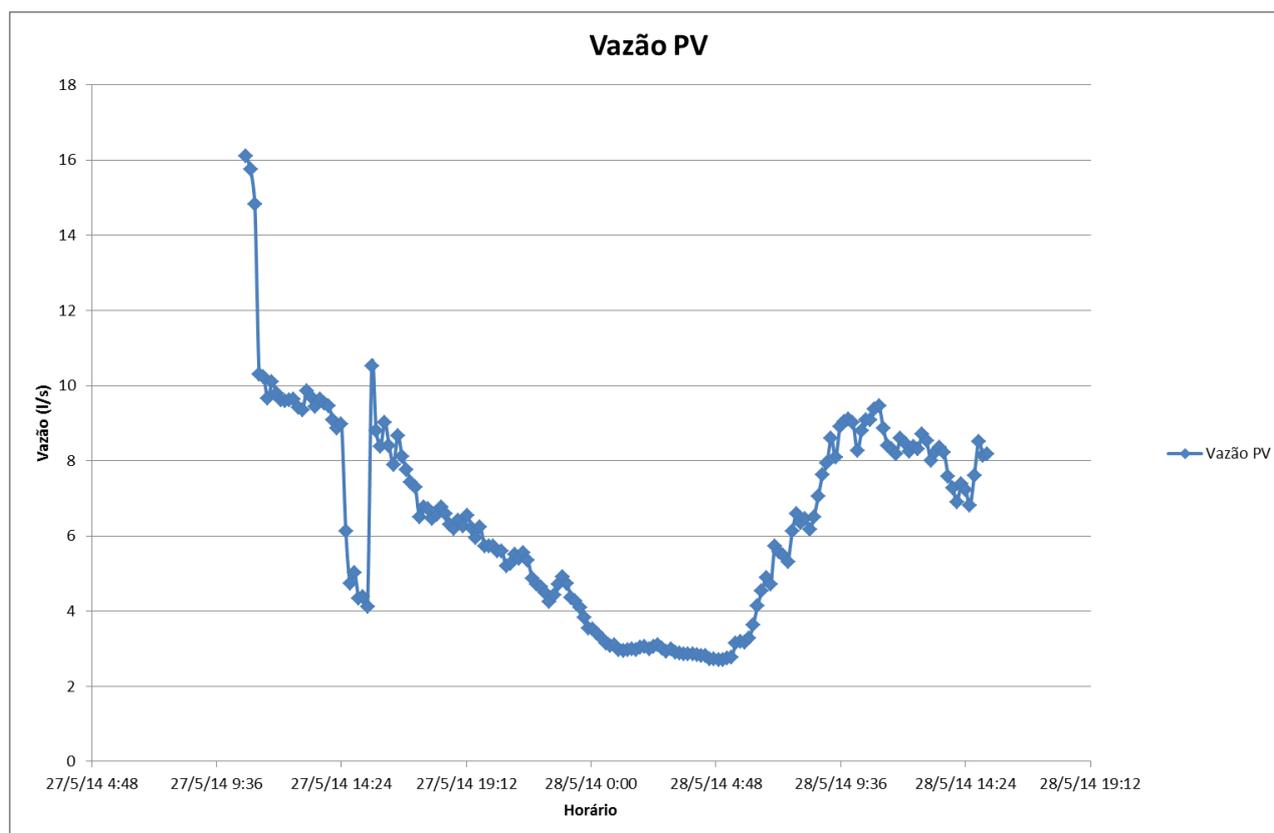


Figura 37 – Gráfico de vazão na entrada do setor.

5.3.1 Registros horários de pressão, rupturas nas tubulações e seus efeitos

Além dos dados tabelados de pressão, também é conveniente realizar uma análise gráfica dos dados medidos. Quando realizado o trabalho de campo, no início das medições houve um vazamento próximo ao nó 28, tendo início do vazamento aproximadamente as 13:00:00 e seu concerto finalizado em torno das 15:00:00. Ao observar-se o início das curvas de vários nós, nota-se uma queda subta e brusca de pressão, representando esse vazamento e seus efeitos ao longo de diversos nós da rede. A Figura 38 mostra o momento em que a equipe técnica do SAAE realizou os reparos na rede.



Figura 38– Vazamento ocorrido durante as medições.

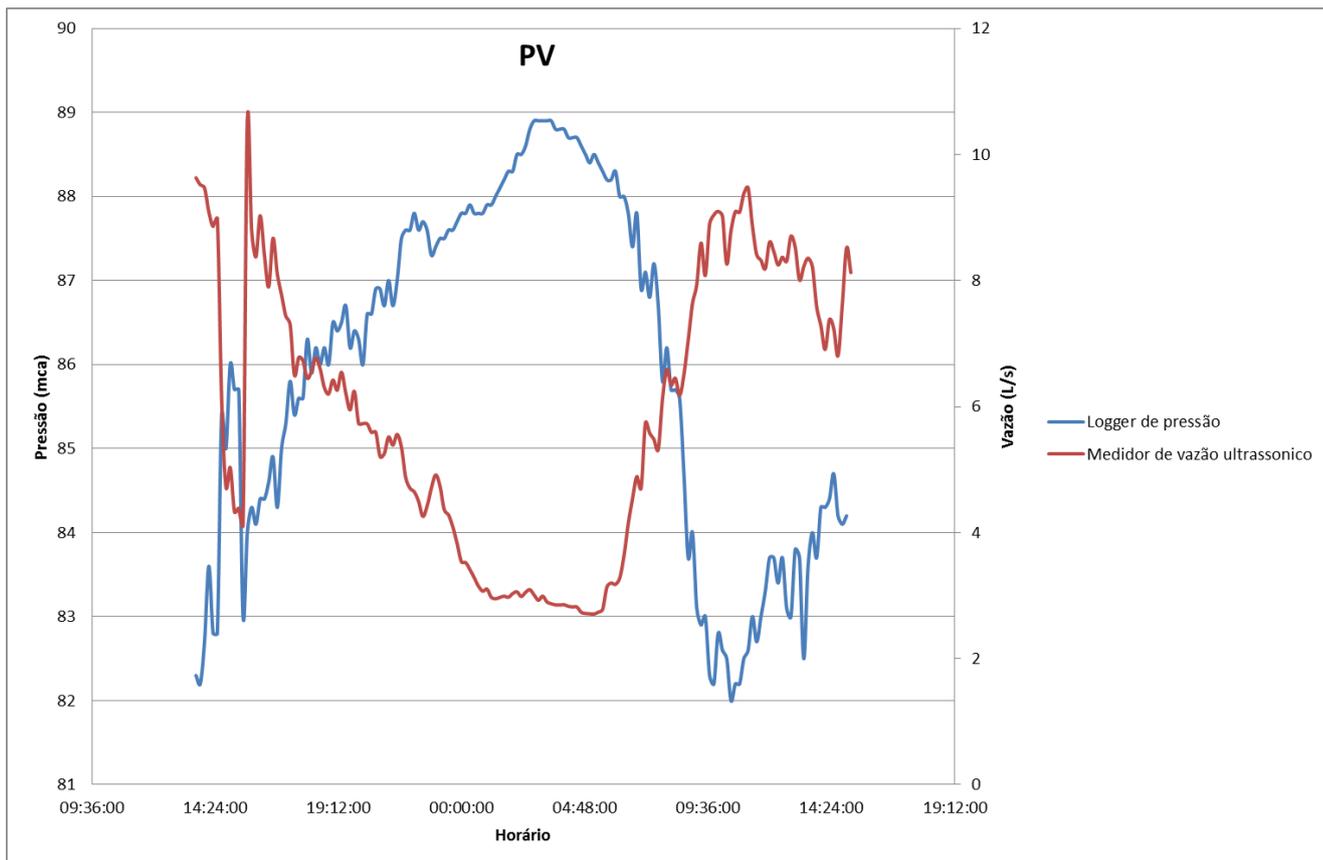


Figura 39– Registros de pressão e vazão na entrada do sistema (PV).

A Figura 39 mostra o comportamento vazão x pressão na entrada do setor durante um período de 24 horas. Percebe-se que existem oscilações nos valores de pressão em função dos padrões de consumo de rede, e também percebe-se um aumento de pressão no momento da ruptura (14:24:00), aumento de pressão esse causado por um possível refluxo na rede.

Nas Figuras 40 a 47 são mostrados graficamente os dados de pressão coletados para cada nó no setor estudado. De uma maneira geral, pode-se observar a oscilação no valor de pressão em função do horário, com todos os nós praticamente atendendo um padrão de comportamento muito semelhante, alguns apresentando uma oscilação menor e outros uma oscilação maior. O importante a ser observado é que todos os nós, independentes de sua posição na rede, foram afetados de alguma forma pelo vazamento,

que ocorreu no começo das medições, onde sua curva padrão é interrompida por uma queda brusca, de modo alguns nós mostram de forma mais explicita esse comportamento devido sua relação mais direta com o trecho onde ocorreu o vazamento.

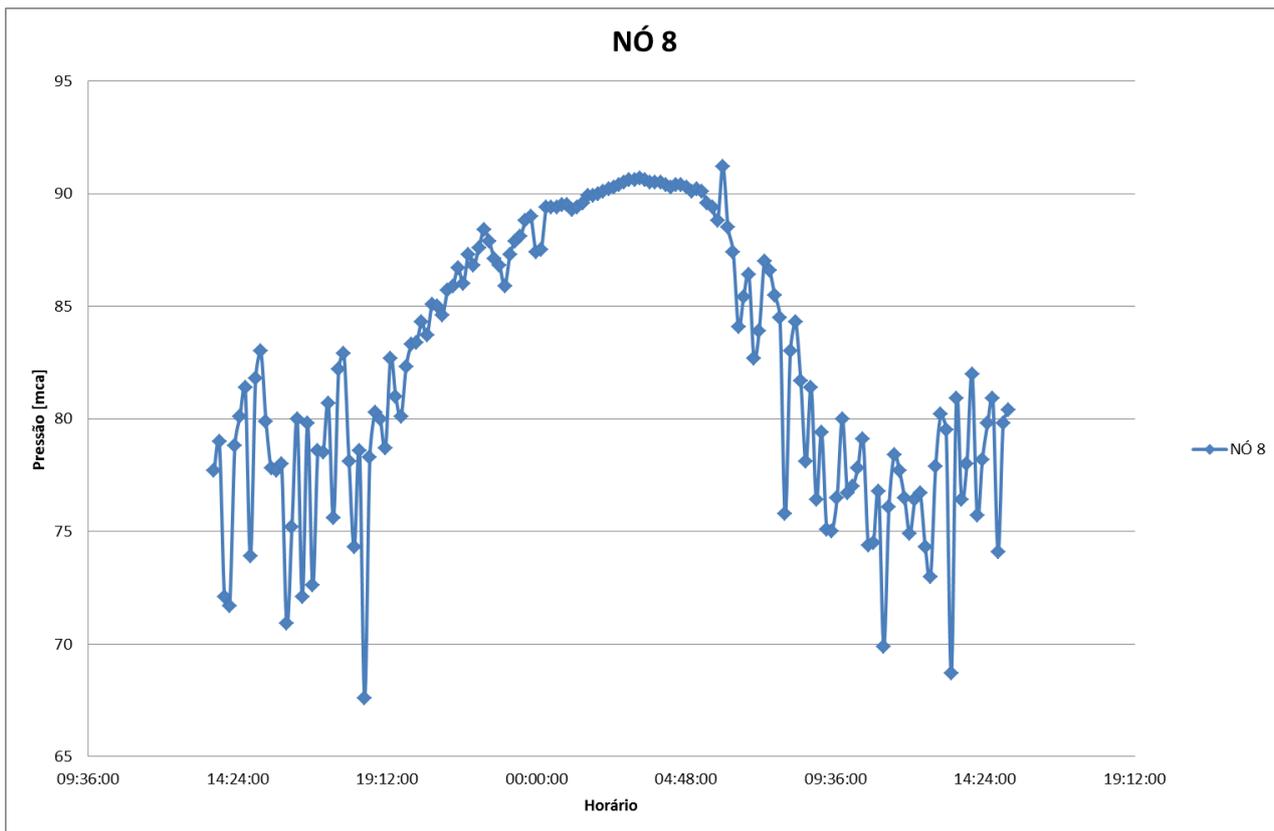


Figura 40– Registros de pressão, nó 8.

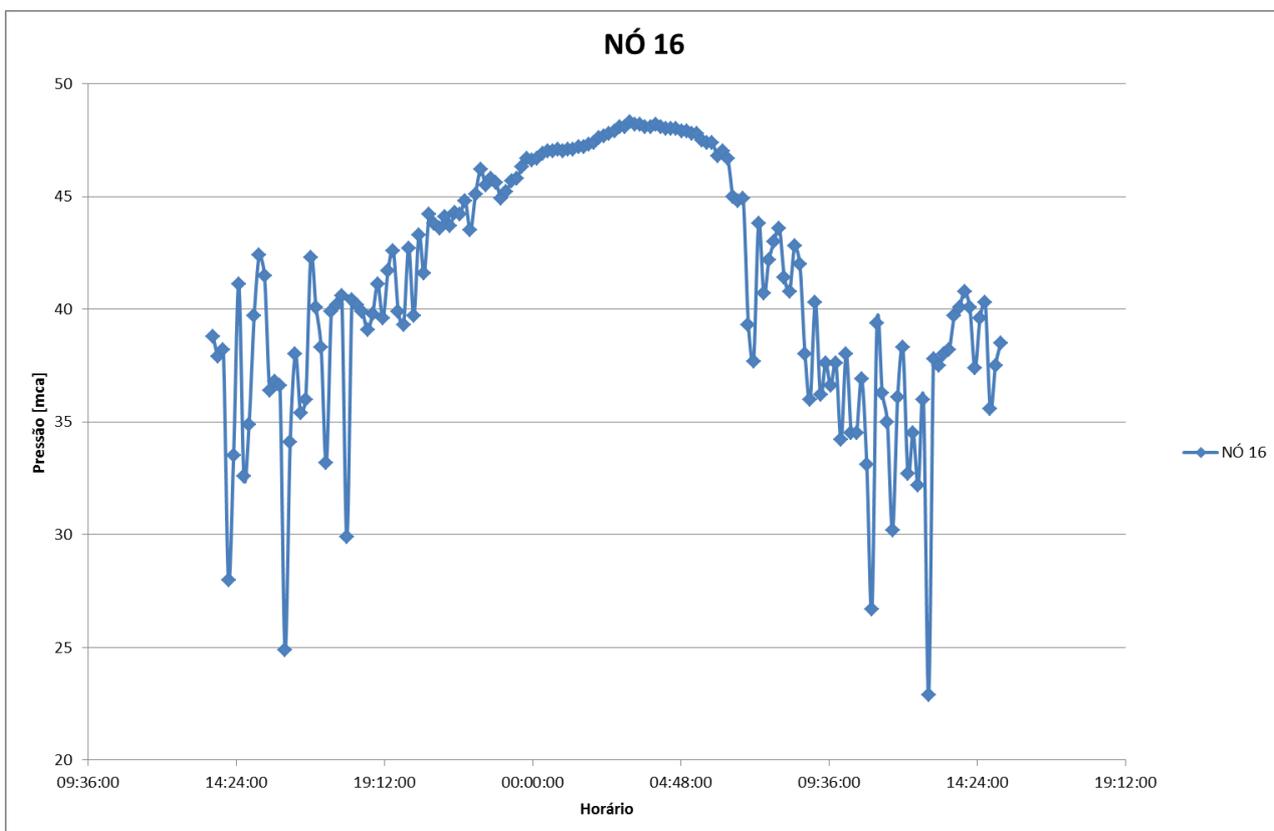


Figura 41– Registros de pressão, nó 16.

Para os nós 8 e 16, mostrados nas Figuras 40 e 41, a oscilação no seu nível de pressões mostra-se instável, durante o dia, com a possível causa desse fenômeno ser encontrada em golpes de ariete sucessivos ocorridos nesses trechos que se encontram nas pontas da rede de traçado ramificado localizada no tramo sul da rede estudada.

Ou seja, existe formação de grande quantidades de bolsas de ar nesses trechos finais em função do fluxo de água percorrer todo o trecho da rede até chegar nas extremidades, ocorrendo posteriormente uma estabilidade no que se refere a oscilação no nível de pressão para o período noturno.

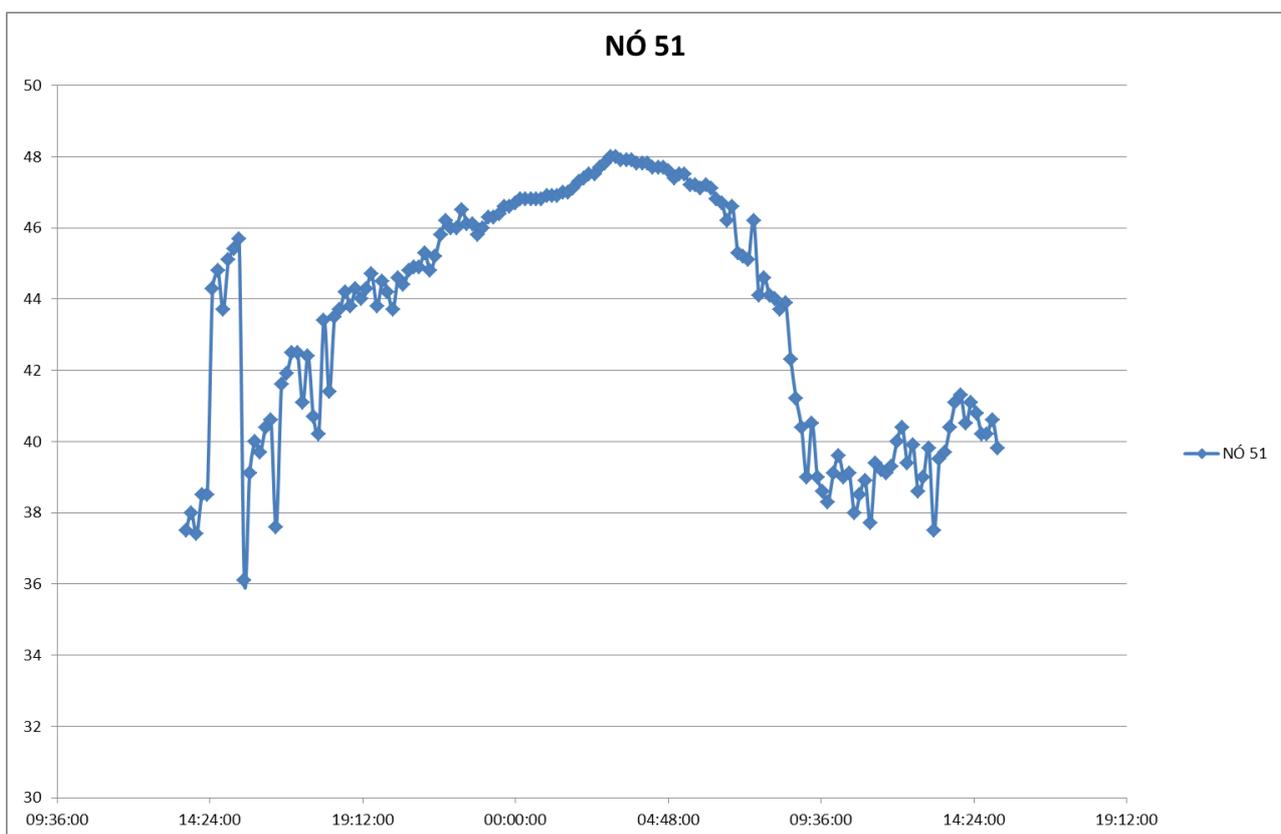


Figura 42– Registros de pressão, nó 51.

O nó 51, localizado no ponto mais elevado do bairro Vale dos Pinheiros foi um dos poucos pontos que mostra a faixa de pressões dentro dos limites estabelecidos pela ABNT. No caso desse nó, a sua pressão se mostrar abaixo da média dos demais pontos é justificado pelo fato desse ponto encontrar-se no local mais elevado da rede, conseqüentemente nó não

recebe uma grande quantidade de energia potencial gravitacional a montante como é o caso de locais onde ocorreu o vazamento por exemplo.

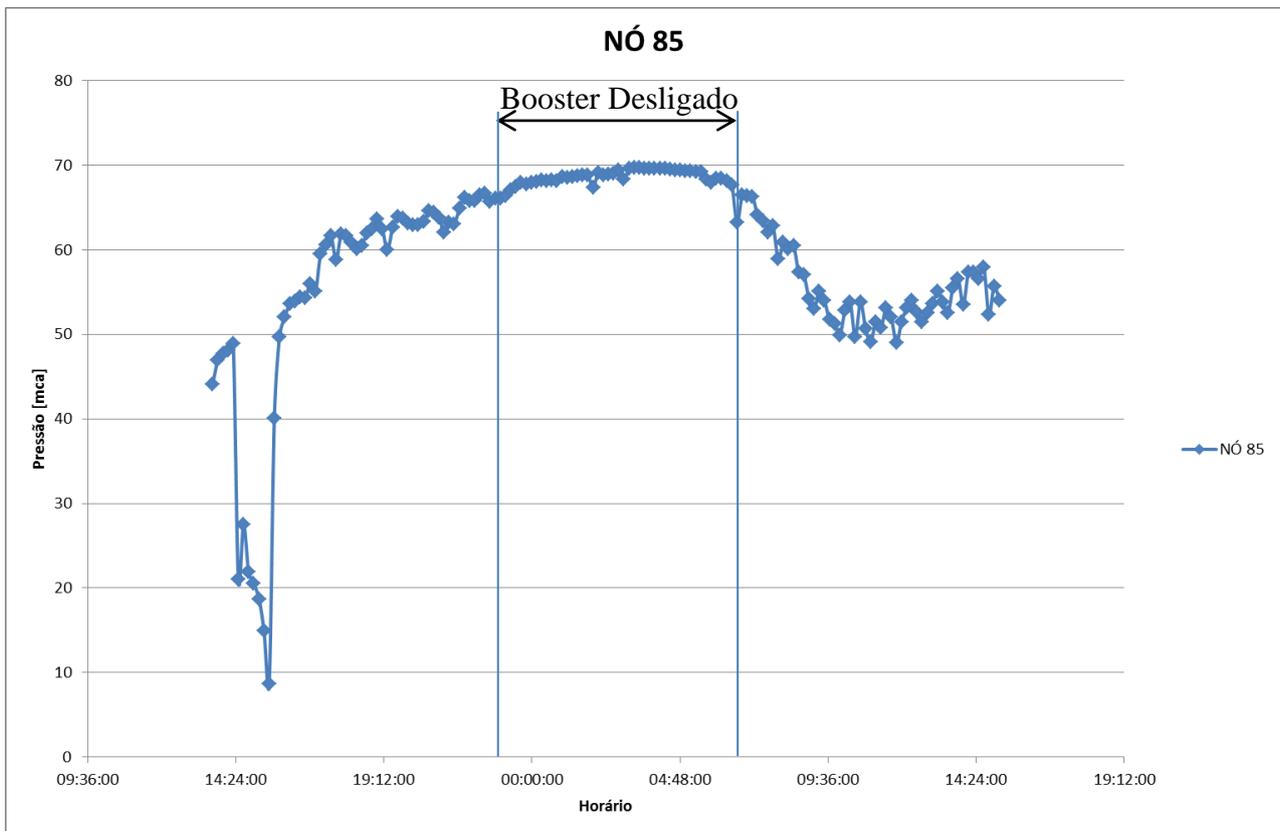


Figura 43– Registros de pressão, nó 85.

O nó 85 trata-se de uma ponta seca localizada no bairro Moradas da Serra em um traçado onde foi instalado o booster a 3 quadras acima do nó para gerar uma energia adicional ao sistema. Exceto no momento do vazamento, nota-se que a faixa de pressões mantém acima dos 50 mca.

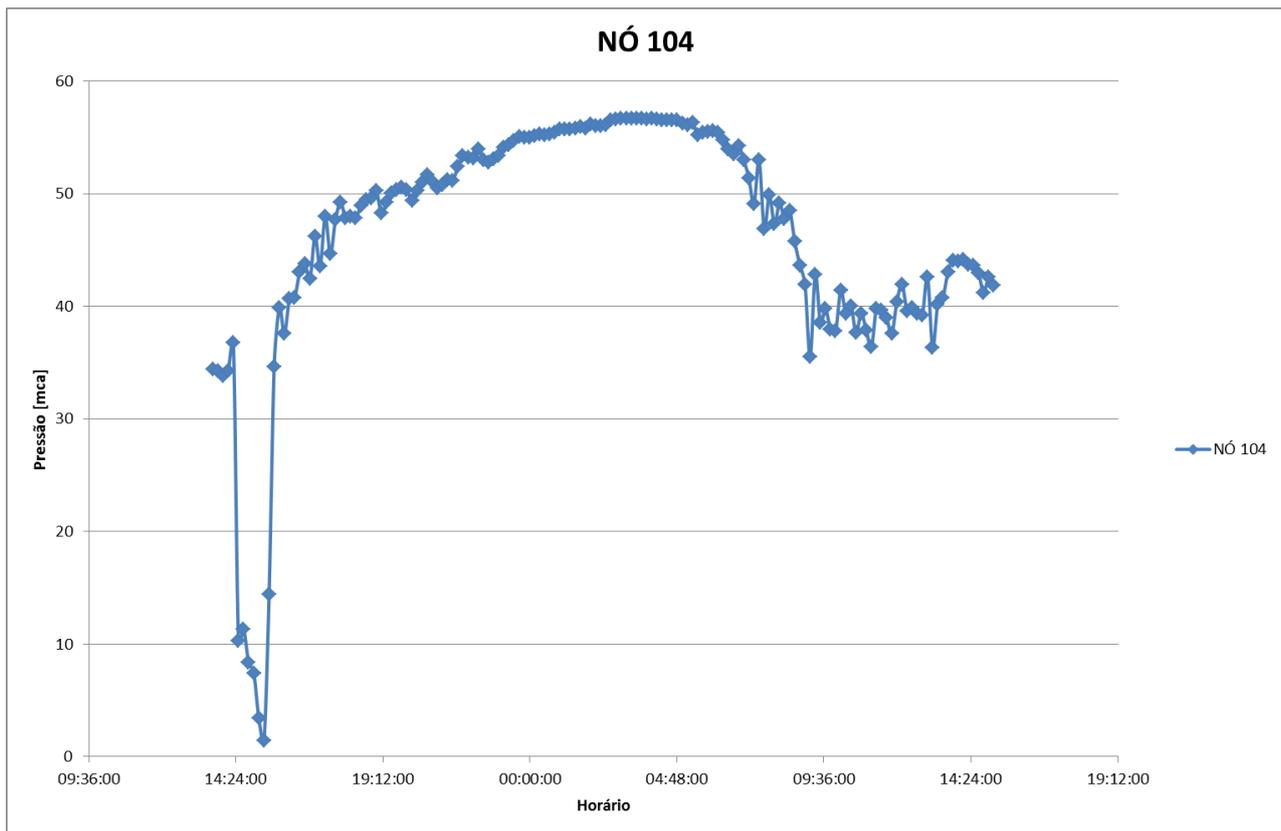


Figura 44– Registros de pressão, nó 104.

O nó 104 trata-se de um hotel pousada localizado próximo a uma ponta seca, no fim da rede do bairro Moradas da Serra. Sua faixa de pressões mostra-se superior a 50 mca somente no período noturno.

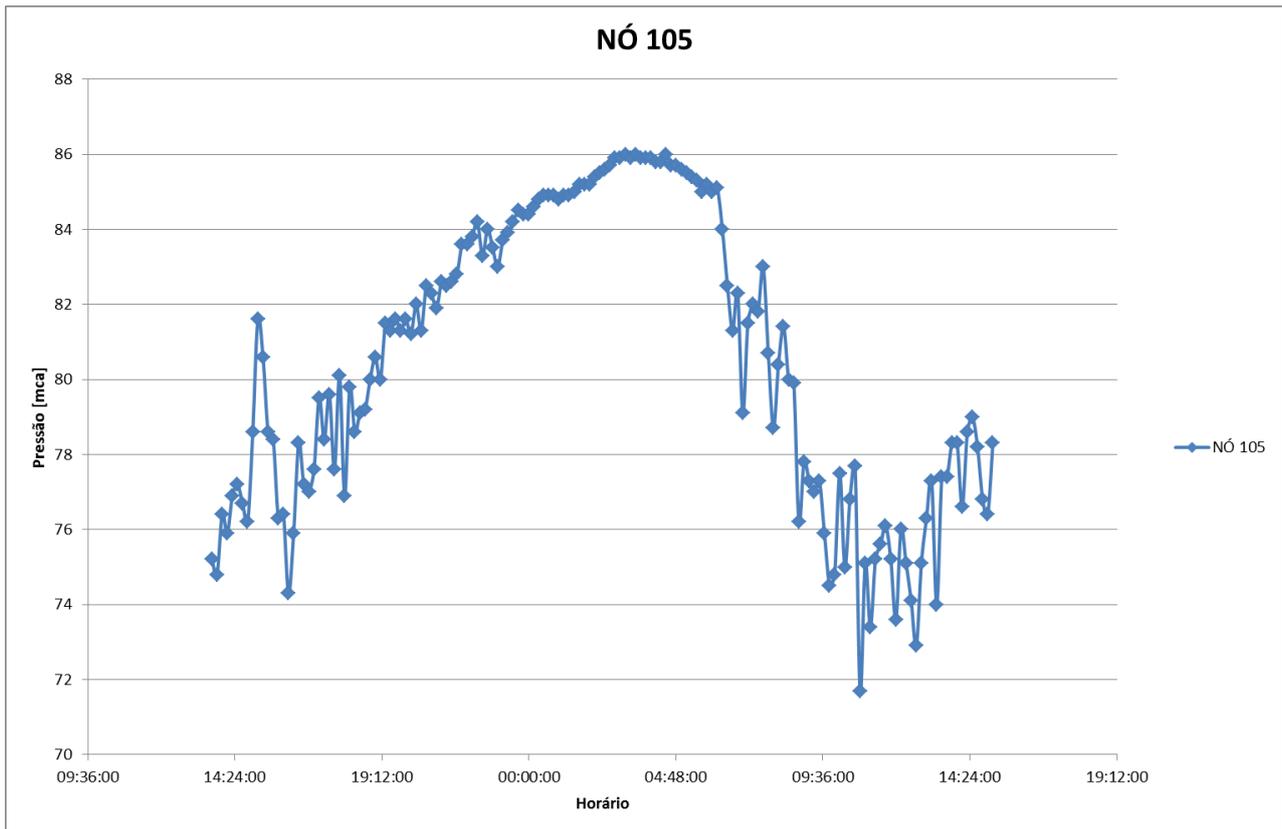
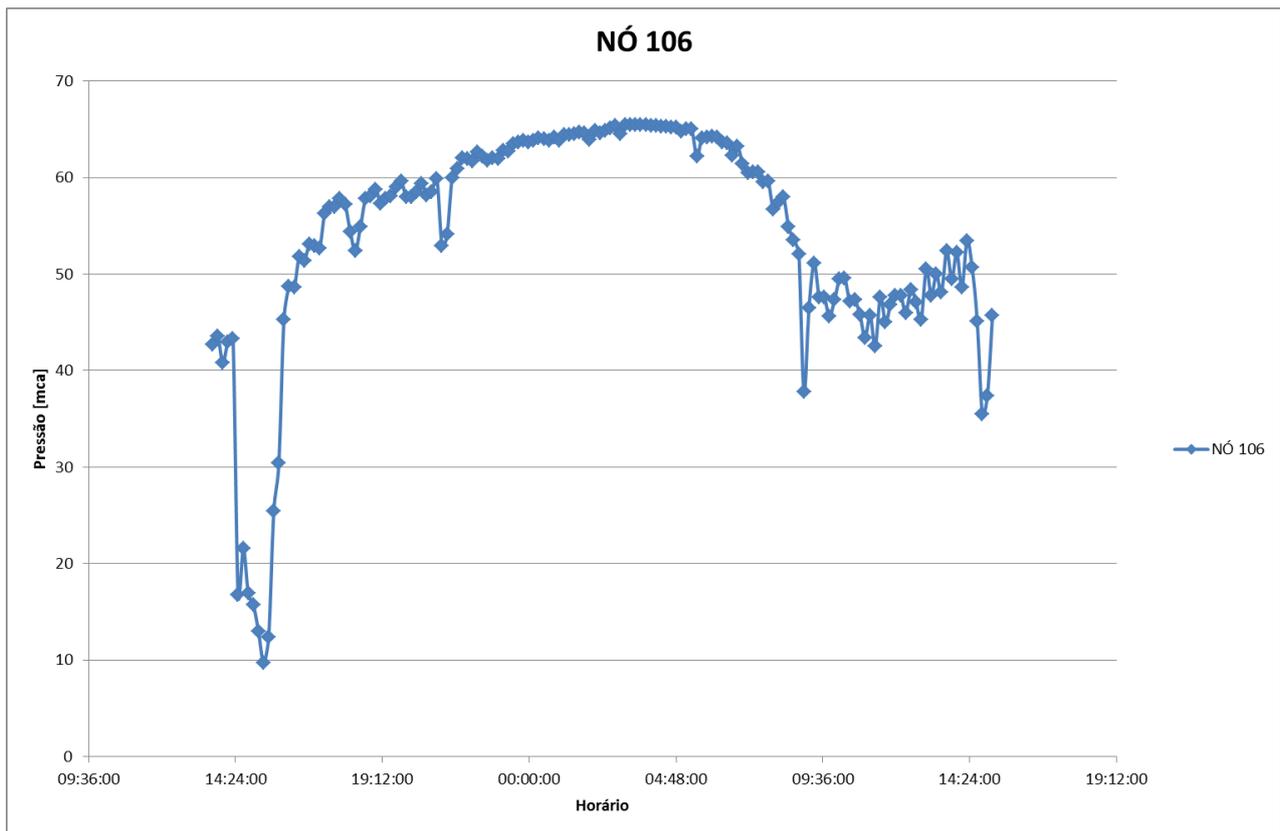


Figura 45– Registros de pressão, nó 105.

O nó 105, localizado no bairro Palmela, próxima a entrada do setor mostrou um comportamento reverso aos demais no momento do vazamento, podendo observar na Figura 45 o aumento súbito da pressão as 14:24:00. Também se pode observar que a pressão sofre grandes oscilações em curtos instantes de tempo, repetindo o mesmo o padrão de comportamento dos nós 8 e 16, havendo um fator em comum entre eles fazerem parte do traçado sul da rede, localizado no bairro Palmela.



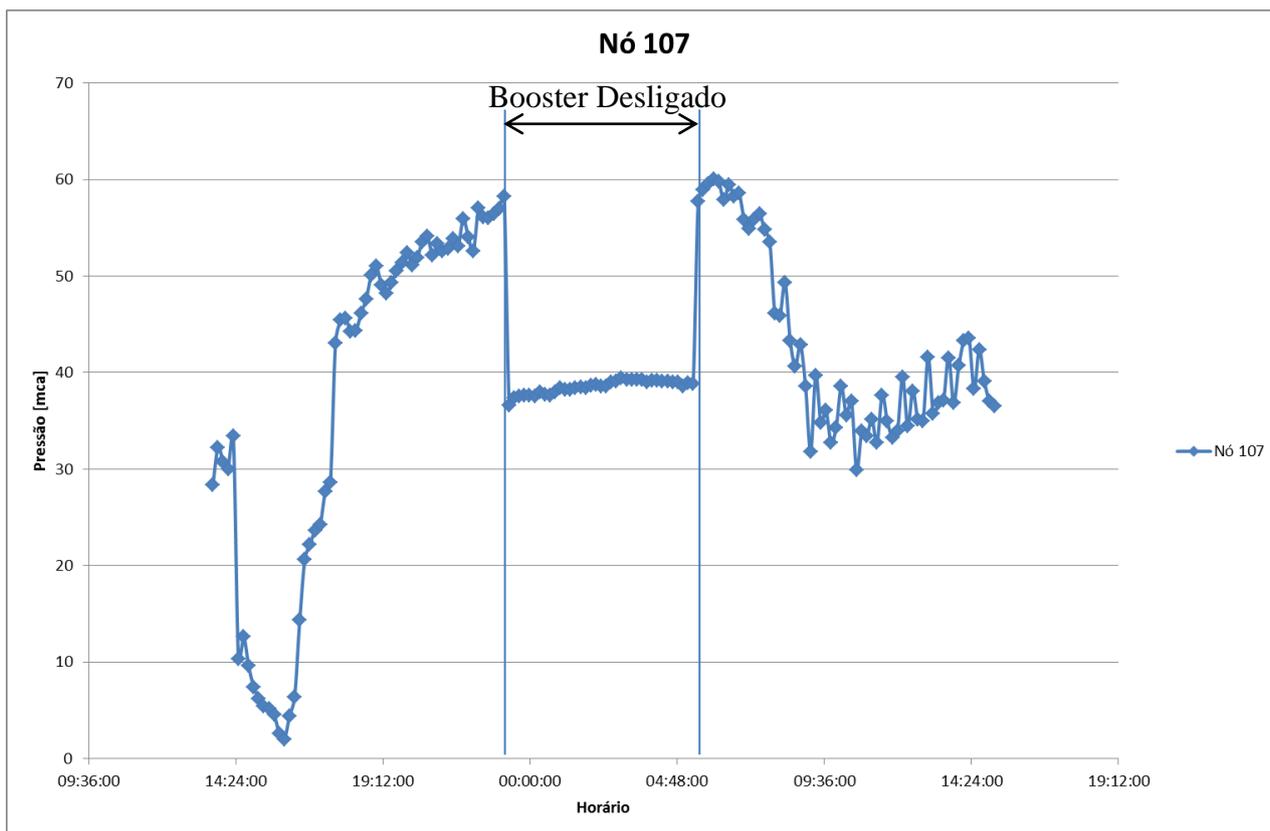


Figura 46— Registros de pressão, nó 107.

Observando-se a curva no nó 107 na Figura 47, nota-se uma queda brusca que se mantém constante no período da madrugada. Esta queda representada graficamente mostra o momento em que o booster é desligado (das 23:00 as 5:30) e deixa de inserir energia no sistema, causando uma queda de aproximadamente 22 mca no período noturno. Fator importante e de muita relevância, uma vez que, manter adições de energia na rede de distribuição em períodos de pressões máxima devido aos mínimos consumos acarreta em faixas superiores de pressão, as quais as tubulações não são capazes de manterem estabilidade devido à elevada quantidade de energia no sistema, levando então as rupturas nas tubulações ao longo de diversos trechos. O interessante ao se observar é que no nó 85 não ocorre o mesmo comportamento, sendo que o nó 85 na Figura 45 é o ultimo nó abastecido pelo booster e no período da madrugada não há alteração no seu estado de pressão que indique relação direta com o booster assim como o nó 107.

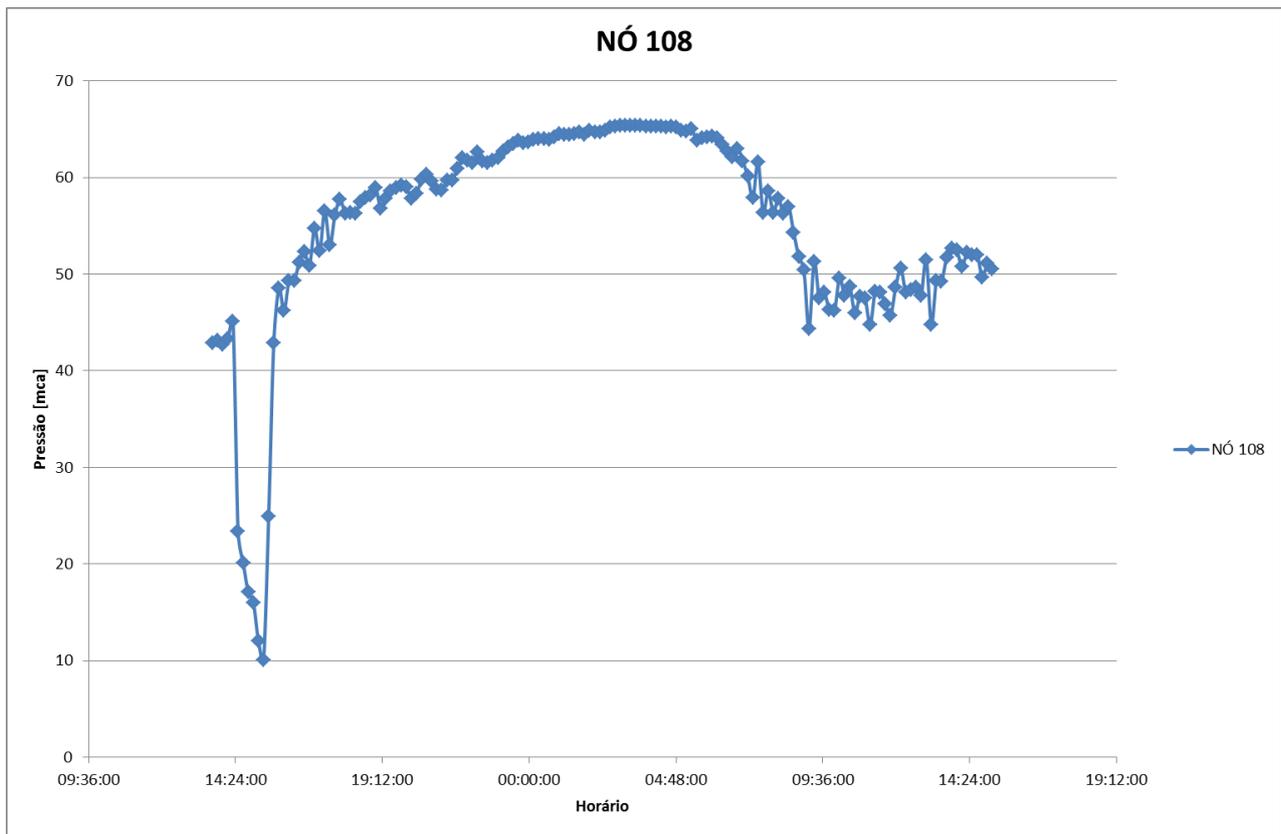


Figura 48– Registros de pressão, nó 108.

O nó 108, afetado pelo vazamento encontra-se em um trecho pouco a montante do booster. Porém, a pressão mínima atingida nesse ponto, o fluido ainda possui energia para alcançar o booster e chegar até o final do traçado da rede como pode ser observado no nó 107, que se localiza a jusante do nó 108.

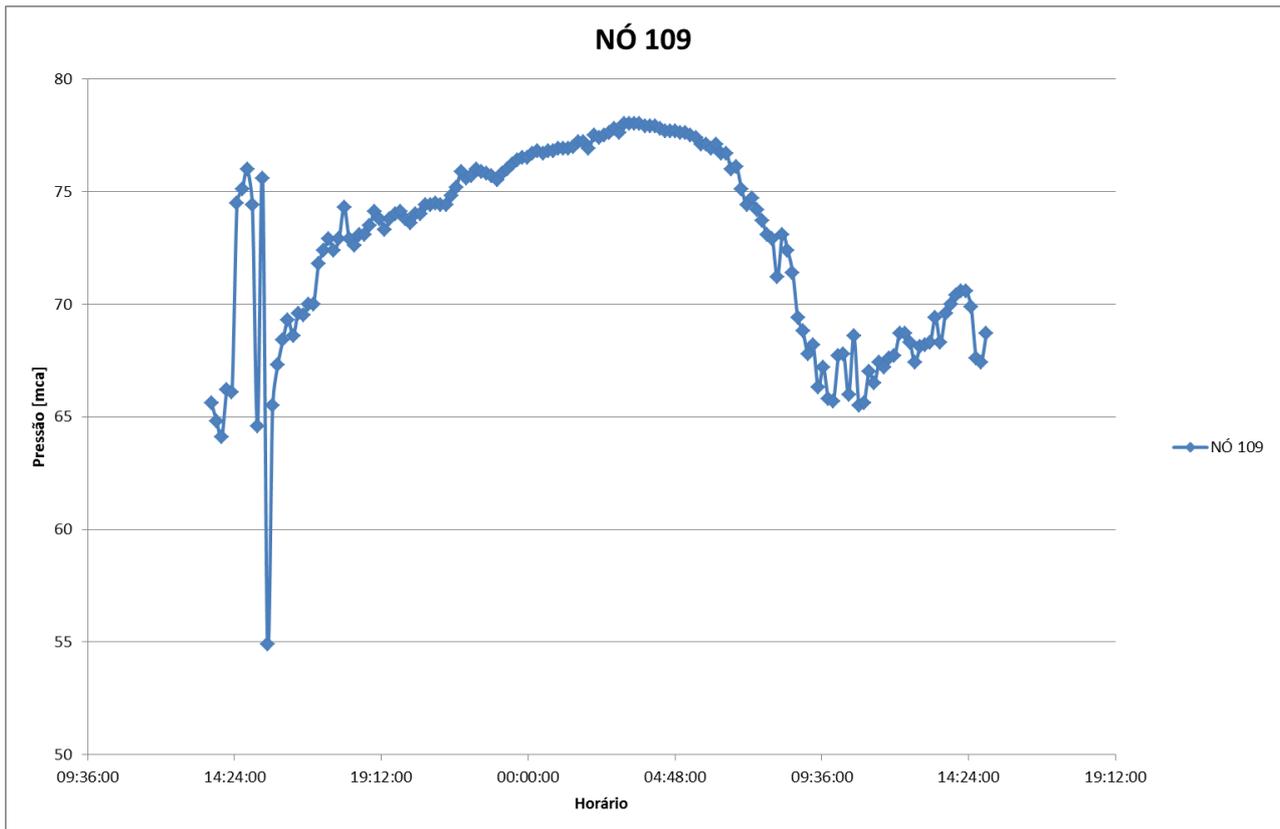


Figura 49– Registros de pressão, nó 109.

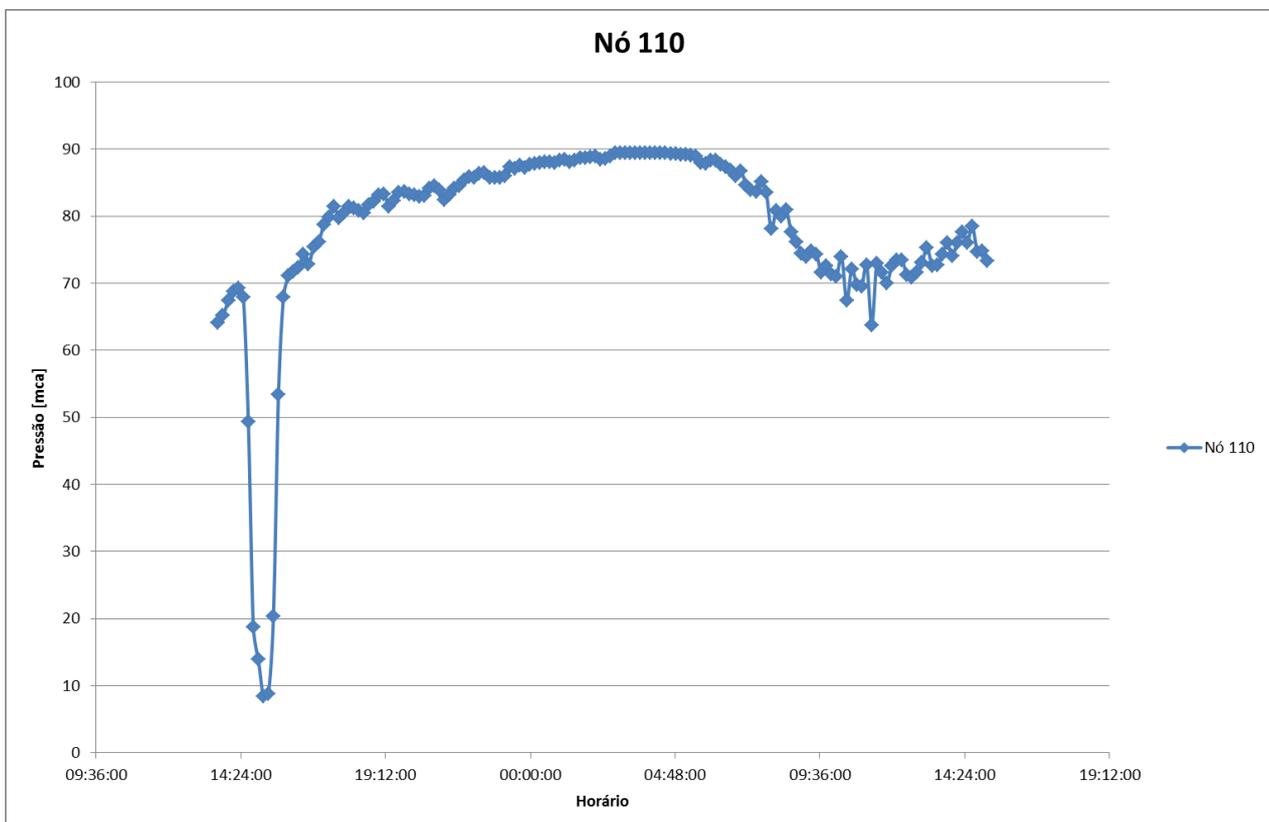


Figura 50– Registros de pressão, nó 110.

O nó 110, localizado muito próximo ao vazamento, é o nó que sofre maior queda de pressão durante o vazamento (de 70 mca para aproximadamente 10 mca), provavelmente pela localidade do nó. Tanto o nó 109 quanto o 110 mostram valores permanentes acima de 50 mca enquanto não há vazamentos. Os loggers cumprem essa importante tarefa de monitorar a pressão da rede de modo que pressões tão elevadas possam ser levadas em consideração como grandes causadoras de vazamentos, contribuindo assim para o índice de perdas da tubulação.

A figura 51 ilustra o booster instalado em caixa de setor em estudo.



Figura 51– Booster localizado no bairro Moradas da Serra.

5.4 Calibração de redes

A calibração de redes é realizada pelo modelo proposto por SILVA (2003), utilizando os dados adquiridos em campo e no SAAE (cotas, pressões, vazões, diâmetros e comprimentos da tubulação etc). A calibração funciona basicamente da seguinte forma, através da técnica de busca de soluções utilizando algoritmos genéticos simples (AGS) o modelo gera 30 soluções iniciais aleatórias, gerando um valor de rugosidade aleatório para cada trecho. Após lidos os dados de entrada que foram coletados na rede através de medições ou então cedidos pelo SAAE, o modelo de calibração então compara as pressões e vazões medidas em campo com as calculadas pelo próprio modelo. Os dados de entrada necessários tanto para o modelo de calibração quanto para o simulador hidráulico são listados a seguir:

Trechos:

- Nó a montante e nó a jusante;
- Comprimento do trecho (m);
- Diâmetro da tubulação (m);
- Material da tubulação (PVC, $f_o f_o$, etc),
- Nós:
- Cota;
- Carga;
- Consumo nodal;
- Pressões medidas em campo para os três padrões;

- Vazões medidas para os três padrões na entrada do setor;
- Quantidade de trechos e de nós na rede;
- Coeficientes de perda.

À medida que o valor calculado e o medido se aproximam, isso significa um aumento no valor da função de aptidão. Para isso, várias gerações de soluções são processadas, sempre selecionando a solução mais apta por geração e a utilizando para a próxima, onde estas soluções também passam por processos de cruzamentos e mutações, que consistem no cruzamento de uma alternativa com outra, onde há uma substituição no valor de rugosidade de um trecho pela alternativa que está sendo cruzada. Existe um momento na calibração onde a função de aptidão não terá aumento significativo mais por geração, o que significa que esta convergiu para o resultado final, o que pode ser observado na Figura 52, representando a quantidade de gerações pelo seu valor de aptidão a solução ideal, mostrando o padrão de consumo máximo durante o dia (10:30 hr e 17:10 hr) e o mínimo durante a noite (03:10 hr). O processamento dos dados para a calibração da rede levou em média 30 minutos.

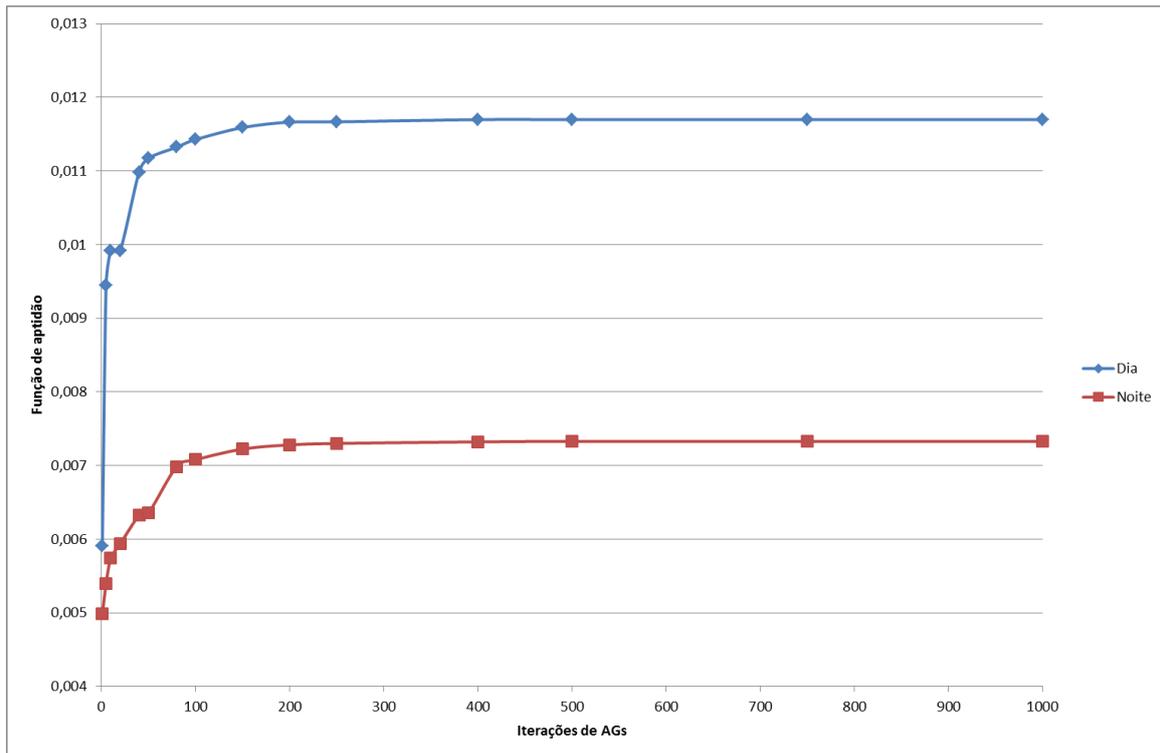


Figura 52– Evolução da função de aptidão ao longo das iterações dos AGS.

5.4.1 Populações e sementes aleatórias

Depois da convergência das funções de aptidão na calibração, uma técnica é utilizada para testar a consistência final dos seus valores de pressão e rugosidade, que consiste na técnica das sementes aleatórias.

As sementes aleatórias consistem em gerar populações iniciais distintas, pois a população inicial vem de um grupo aleatório, mas tende sempre a ser o mesmo, então, esses valores aleatórios são induzidos a gerarem outros valores aleatórios para as populações iniciais.

Pode-se então observar que os valores apresentados nas Figuras 53 a 57 mostram os valores de rugosidades relativos aos trechos estudados, demonstrando de forma geral que eles seguem padrões variando pouco dentro de uma média de valores.

A abordagem foi feita avaliando os valores de rugosidades em determinados trechos para várias sementes ou sequências aleatórias escolhidos com base em faixa de rugosidades.

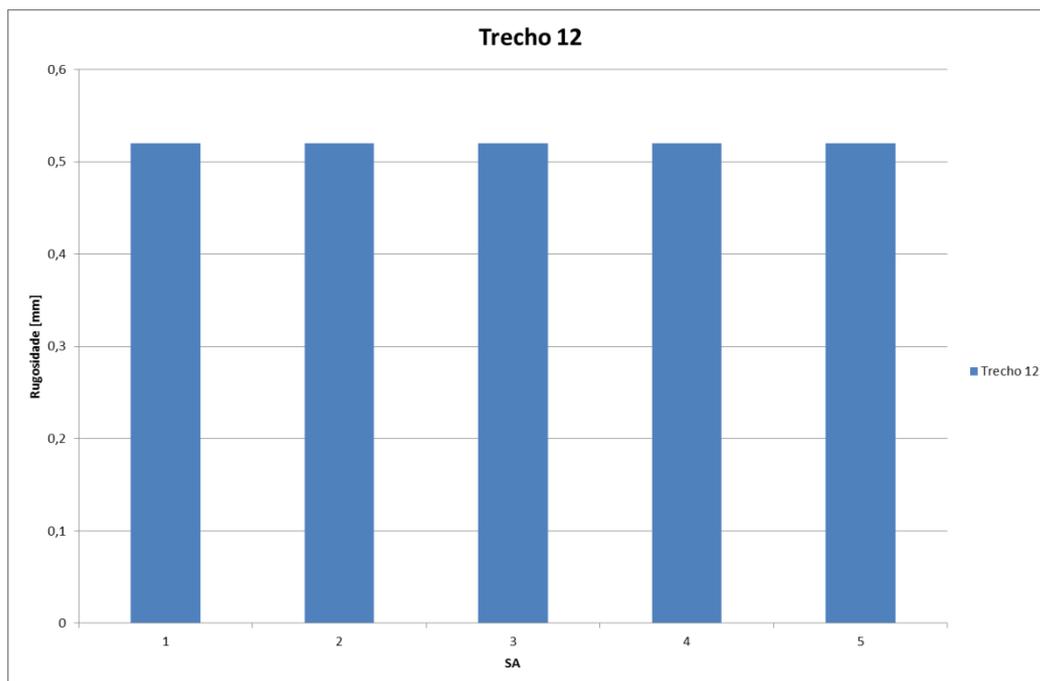


Figura 53– Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 12

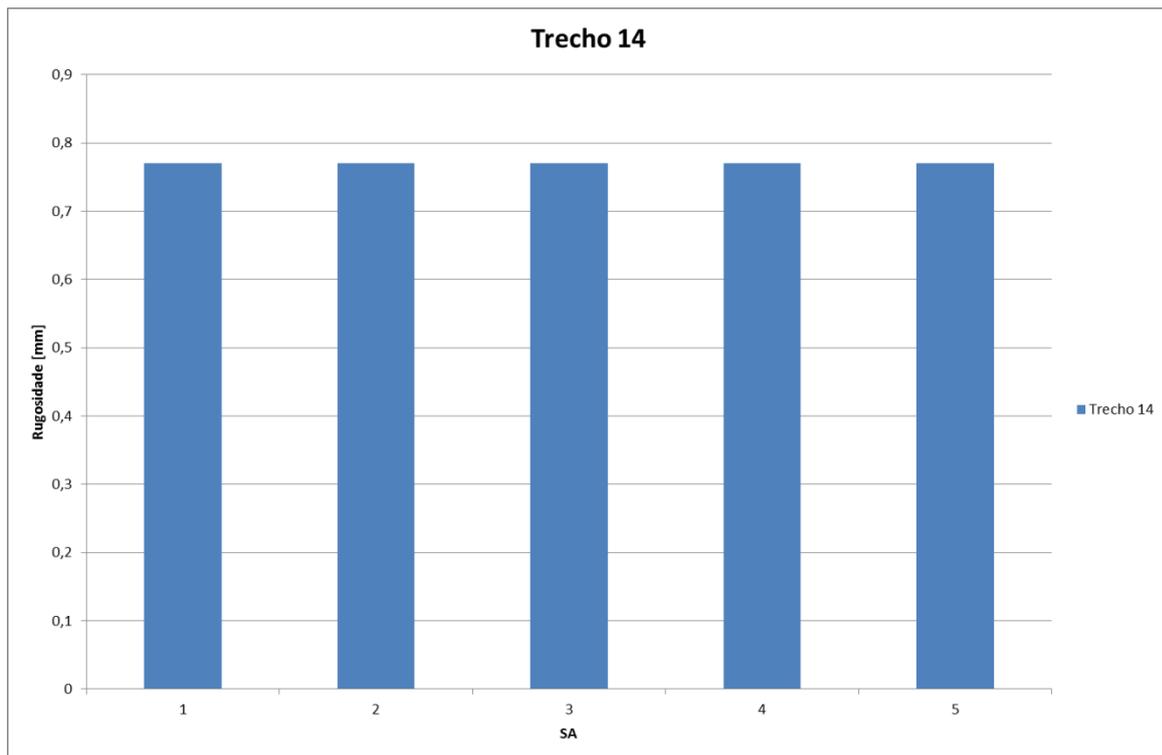


Figura 54– Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 14

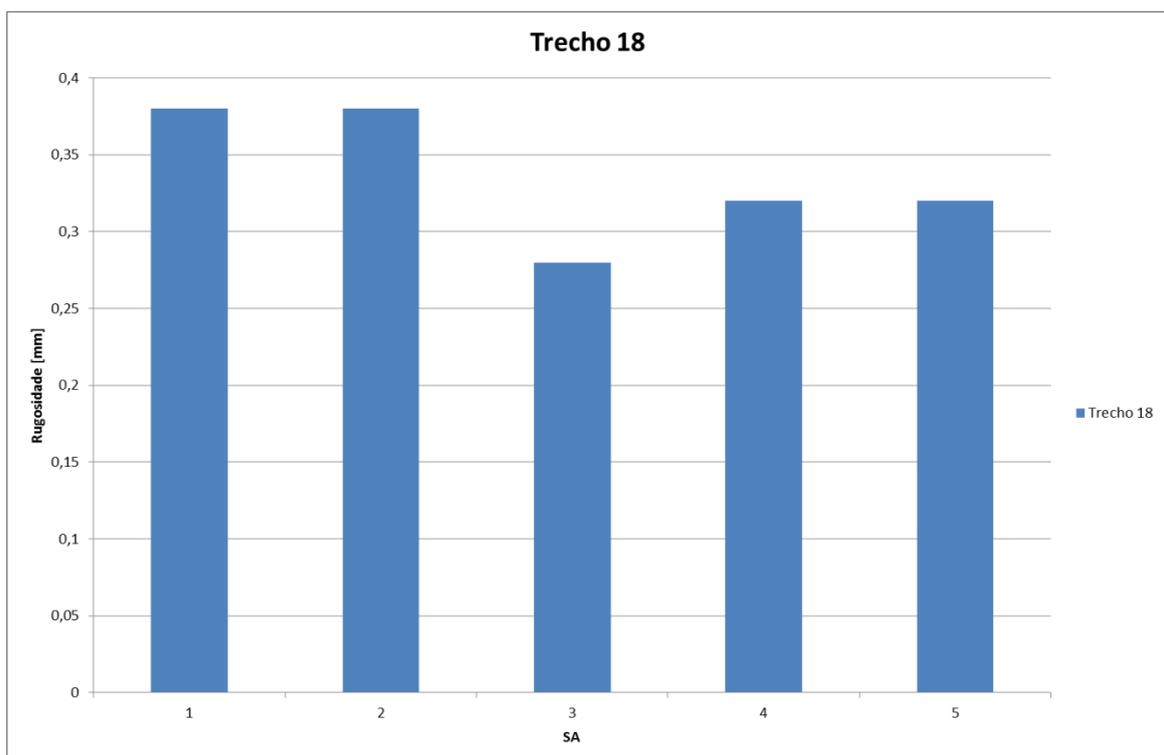


Figura 55– Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 18

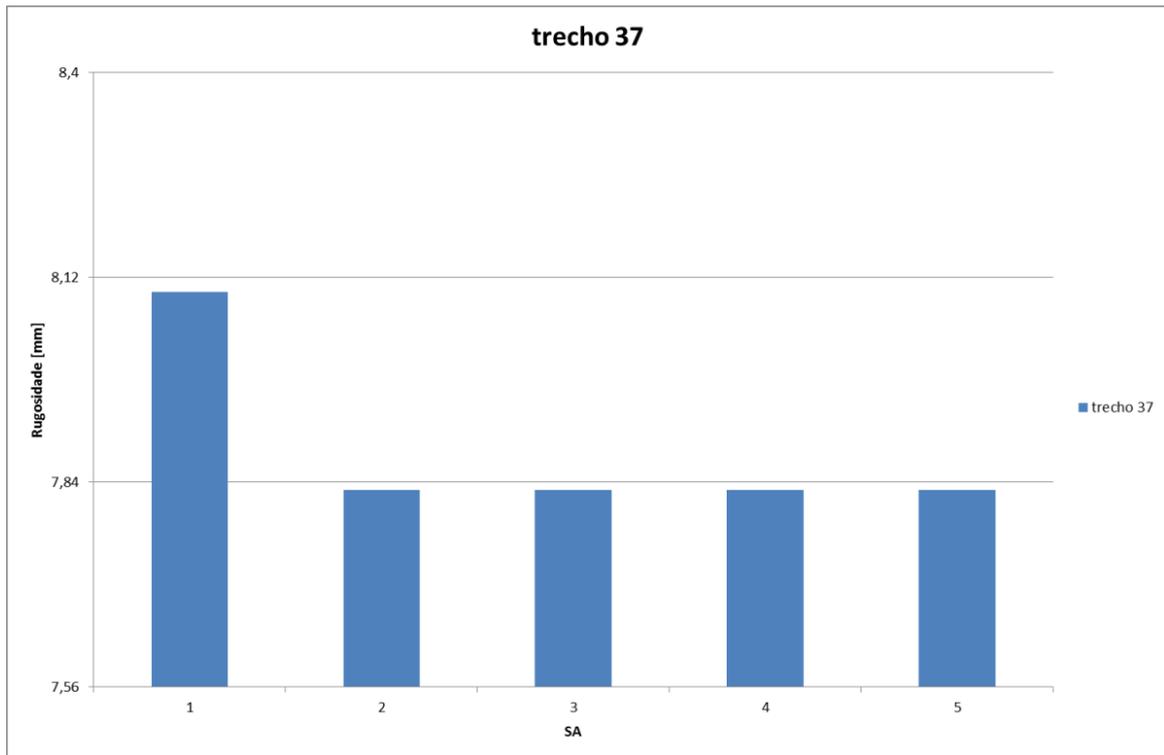


Figura 56– Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória – trecho 37

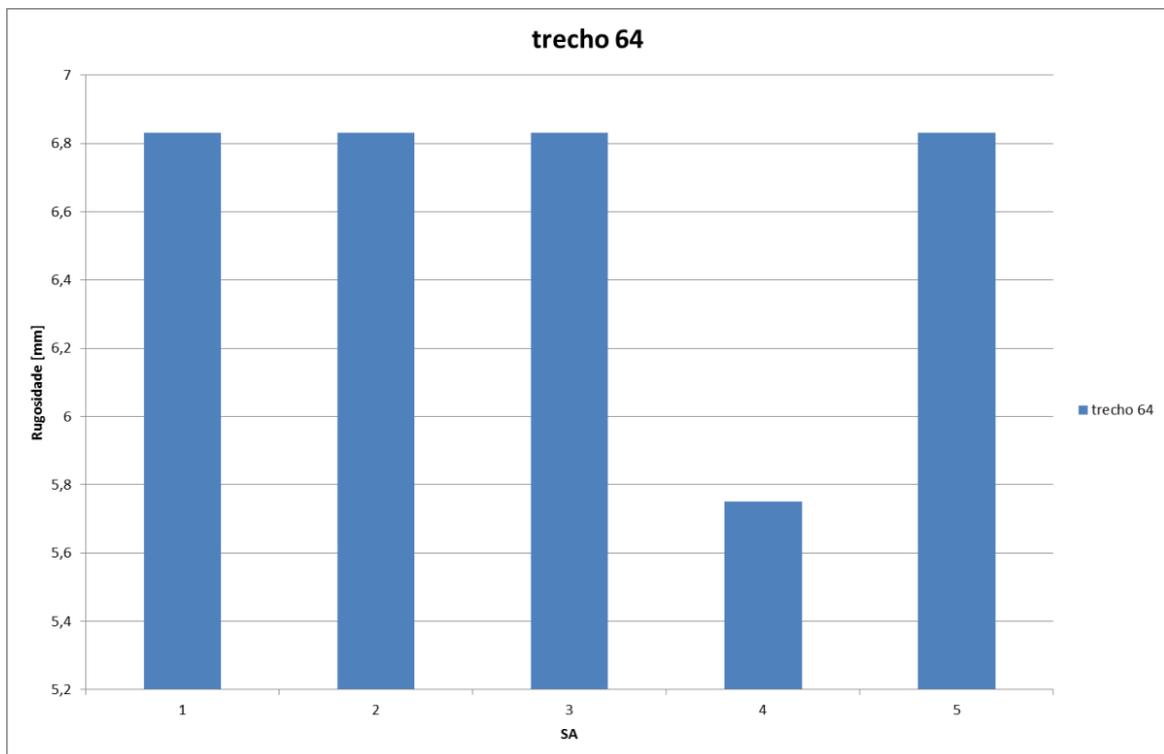


Figura 57– Valores de rugosidade do trecho para cada semente aleatória- trecho 64

Observando a seqüência de Figuras 53 a 57, observa-se que os valores para as alternativas aleatórias iniciais apresentam uma faixa de oscilação elevada enquanto que os valores de rugosidade nas sementes aleatórias praticamente não apresentam oscilações em seus valores, o que indicam uma probabilidade elevada de o valor de rugosidade indicada representar a realidade local. Esses trechos foram selecionados para representar outros demais trechos da rede que possui o valor de rugosidade bem definido.

Pela Tabela 35 também se pode observar alguns trechos que apresentam pequenas oscilações em seus valores de rugosidade, o que aumenta a probabilidade desse valor de rugosidade representar a realidade do local tomando como alguns exemplos os trechos 2, 6, 11 e também pode-se dizer que observa-se consistência na variação das sementes aleatórias.

Tabela 35– Comparação de valores de rugosidade para alguns trechos obtidos pelo modelo de simulação utilizando as sementes aleatórias.

Trecho	SA1 (mm)	SA2 (mm)	SA3 (mm)	SA4 (mm)	SA5 (mm)
1	4,7	6,81	0,24	0,35	6,92
2	9,67	9,67	9,67	9,67	9,67
3	7,91	7,91	7,91	7,91	7,91
4	0,4	0,34	0,65	3,71	0,44
5	9,26	9,26	9,26	9,26	9,26
6	0,23	0,28	0,27	0,23	0,2
7	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
8	0,42	0,3	0,42	0,27	6,65
9	5,71	5,71	7,18	5,71	0,65
10	0,18	0,33	0,33	0,33	8,1
11	0,41	0,07	0,41	0,41	0,59
12	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
13	0,19	0,13	0,29	0,26	0,15
14	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
15	0,15	0,3	0,31	0,15	0,25
16	0,62	5,59	0,62	0,62	0,34
17	0,28	0,28	0,14	0,19	0,28
18	0,38	0,38	0,28	0,32	0,32
19	0,31	0,75	0,75	0,31	0,57
20	5,25	0,3	0,3	0,29	0,29
21	0,49	0,38	0,38	0,69	0,69
22	5,84	5,84	6,71	6,71	5,84
23	9,63	0,56	9,63	9,63	9,63
24	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
25	0,74	0,74	0,74	0,36	0,36
26	1,75	0,77	1,75	2,25	0,36
27	0,4	0,15	0,22	0,19	0,39
28	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
29	0,78	0,7	0,46	0,31	0,31
30	7,79	7,79	0,8	0,45	5,9

Além dos valores de rugosidade, os valores de pressão também são analisados utilizando a técnica das sementes aleatórias. As pressões calculadas não apresentaram oscilações significativas em seus valores, com variações de poucos décimos, indicando que a calibração atingiu seu valor máximo de convergência o que garante um elevado grau de confiabilidade em seus valores.

As Figuras 58, 59 e 60 ilustram a convergência em seu valor final de pressão para os nós medidos em campo para os 3 padrões de demandas definidos como pressão máxima, média e mínima.

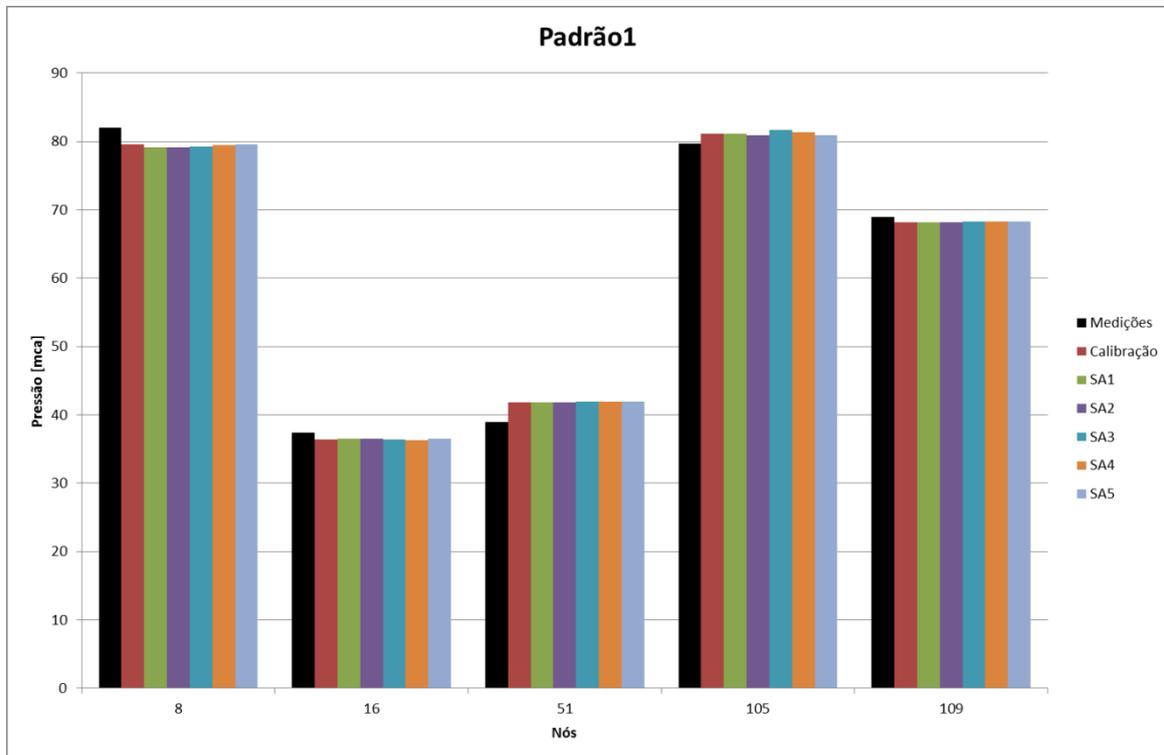


Figura 58– Variação nos níveis de pressão para cada nó com uso das sementes aleatórias.

Ao analisar os resultados, percebe-se que os valores provenientes das medições em campo não possuem a mesma similaridade que os valores de calibração e os valores das sementes aleatórias possuem entre si.

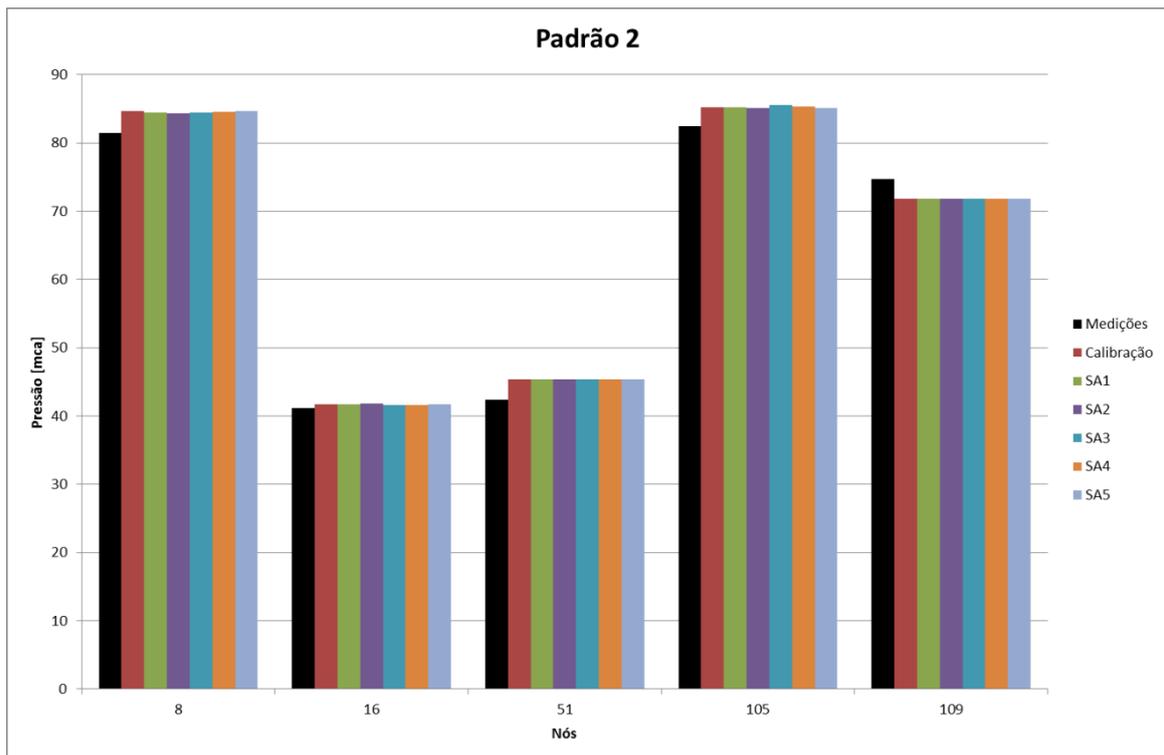


Figura 59– Variação nos níveis de pressão para cada nó com uso das sementes aleatórias.

No caso do segundo padrão, os valores medidos em campo mostram-se inferiores na maioria dos pontos que os calculados pelo modelo de calibração, mostrando também pouca similaridade do valor medido entre os valores calculados pelo modelo de calibração e as suas sementes aleatórias.

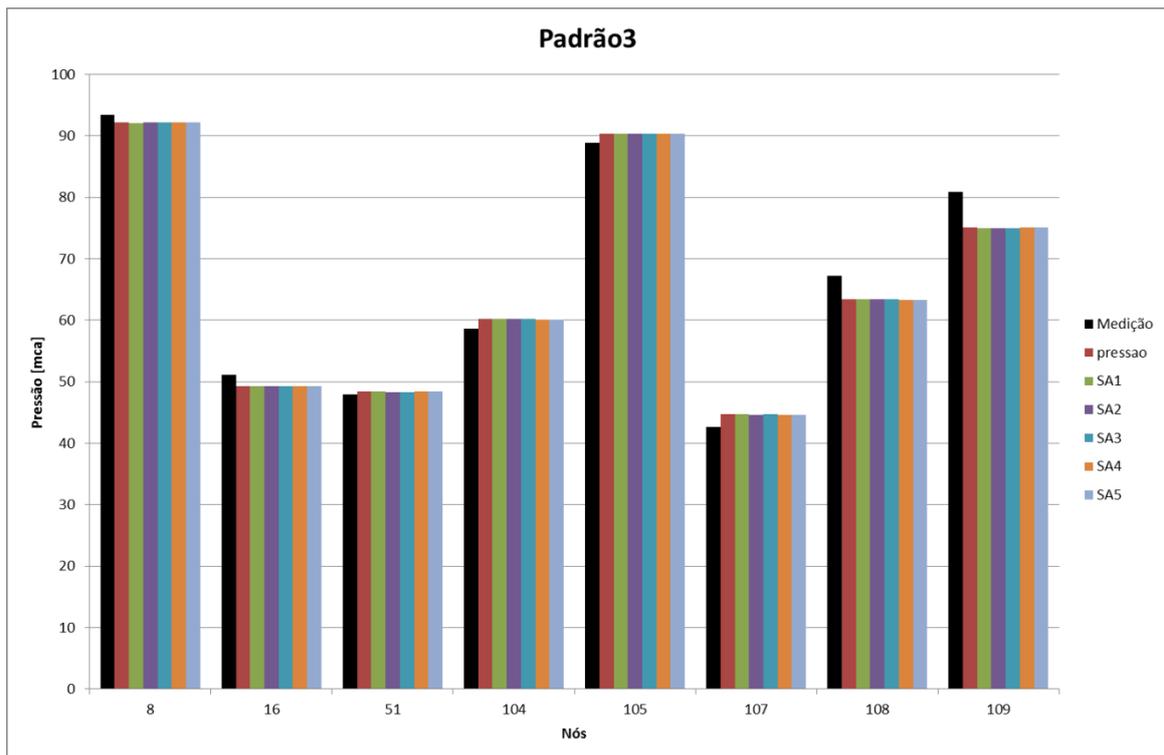


Figura 60– Variação nos níveis de pressão para cada nó com uso das sementes aleatórias.

Observando-se as Figuras 58, 59 e 60 então se pode observar que não importam os valores iniciais de rugosidades que os trechos assumirão, pois os valores finais de pressão tendem a convergir para o mesmo valor, assegurando o resultado pelo elevado numero de iterações. Porém, nota-se que os valores medidos em campo para o 3º padrão também não mostram-se tão similares as SA's, fato que influencia na qualidade da calibração da rede estudada.

Para se definir a qualidade de uma calibração, existe uma tabela com critérios de desempenho para modelos de calibração elaborados pelo Water Research Center (1989), onde esses critérios uma vez que satisfeitos estabelecem uma calibração de qualidade. A Tabela 36 estabelece os critérios necessários.

Tabela 36 – Critérios de desempenho de modelos de calibração segundo Water Research Center (1989, apud SILVA, 2003)

Vazão	Pressão
<p>$\pm 5\%$ de diferença entre os valores calculados e medidos de vazão, quando esta for maior que 10% da vazão total de alimentação do setor em estudo</p>	0,5 m para 85% dos pontos monitorados
<p>$\pm 10\%$ de diferença entre os valores calculados e medidos de vazão, quando esta for menor que 10% da vazão total de alimentação total do setor em estudo</p>	0,75 m para 95% dos pontos monitorados 2,00 m para todos os pontos monitorados

5.5 Correção dos dados de pressão

A coleta de dados de pressão dá sequência à formação de um arquivo de entrada utilizado no algoritmo e no EPANET, porém, antes das informações coletadas serem inseridas no banco de dado utilizado no algoritmo, é necessário realizar uma correção nos valores de pressão, pois a coleta de dados dá-se na primeira torneira após o cavalete de uma residência (hidrômetro), então, ao se coletar informações nesses pontos, há uma distorção no valor de pressão por dois fatores predominantes: a diferença de cotas entre a tubulação principal de abastecimento e o cavalete e, a perda de carga, o que pode acarretar em erros no balanço energético do sistema, tomando como exemplo, a energia potencial não ser equivalente ao local do ponto de medição e a dissipação de energia da

água ao longo da tubulação devido a força de atrito existente entre o fluido e o material da tubulação que é esquematizada na Figura 61.

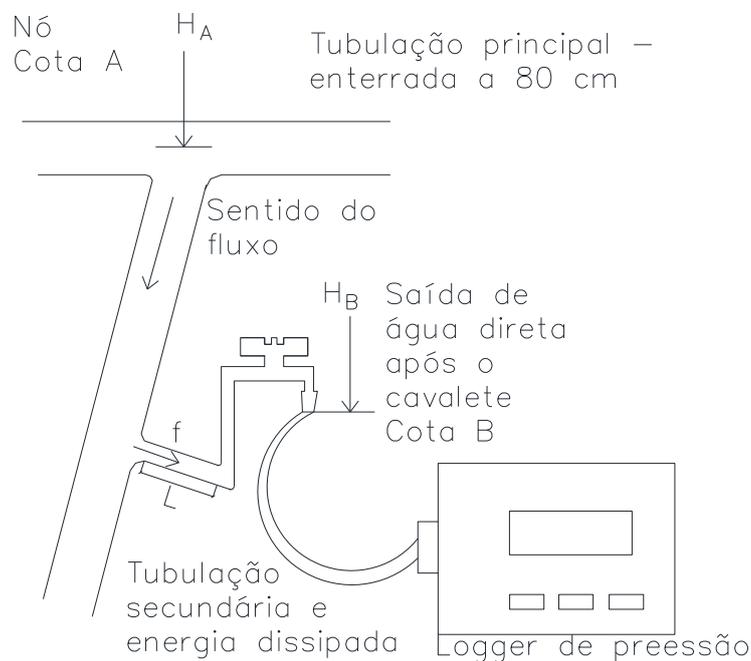


Figura 61– Esquema de perda de carga na rede e coleta de dados de pressão.

As parcelas de energia perdida na rede em função do atrito entre a água e a tubulação são calculadas em função das equação 2, sendo a primeira a se tratar de encontrar-se o valor do fator de atrito entre a tubulação e o fluido.

De maneira sucinta, o valor de pressão medido na torneira não é igual ao nó associado na rede devido à diferença de cota entre a torneira e nó e também à perda de carga desde o nó associado até o ponto da tomada de pressão, por isso deve-se calcular a diferença de energia entre os dois pontos para encontrar-se o valor real de pressão no nó.

Os resultados do cálculo da energia de pressão utilizada no algoritmo são mostrados na Tabela 38, onde através da equação do fator de atrito obtém-se o fator calculado e utilizado no cálculo da perda de carga de Darcy Weisbach (Equação 2).

Alem disso, é feito a correção no valor de pressão pela diferença de cotas do local onde foi feita a medição e a tubulação principal de forma que, se o local de medição encontrar-se em uma cota superior a tubulação principal, então essa diferença de cotas é somada a pressão medida, enquanto que, se o local de medição encontrar-se em uma cota inferior a tubulação principal, a diferença de cotas é subtraída do valor medido. A Tabela 37 mostra essa relação para cada nó:

Tabela 37 – Reajuste nos valores medidos de pressão.

Nós	8	16	51	85	104	105	106	107	108	109	110
Medição	(mca)										
(Logger)	90,6	48,3	48	69,6	56,59	86	65,5	39,24	65,4	78	89,5
Perda de carga (Tubulação 2 ^a)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Diferença de cota entre tubulação principal e 2 ^a *	1,8	1,8	-1,2	1,3	0,8	1,8	3,8	2,3	0,8	1,8	1,3
Valor de pressão ajustado	93,5	51,2	47,9	72	58,59	88,9	70,4	42,64	67,3	80,9	91,9

*O valor negativo implica na tubulação secundária encontrar-se em uma cota inferior a tubulação principal.

Sobretudo, dos valores simulados pelo modelo de calibração, com os mesmos dados de entrada foram feitas as simulações hidráulicas utilizando o software EPANET, onde além dos dados de entrada utilizados no modelo de calibração, o resultado da calibração também é utilizado no EPANET, ou seja, os valores de rugosidades assumidos na calibração são utilizados nos trechos do simulador hidráulico, o que implica em redes idênticas simuladas de maneiras distintas, uma por um modelo de calibração de redes e outra por um simulador hidráulico com os resultados da calibração de redes.

Tabela 38– Comparação entre valores de pressão medidos em campo, valores simulados através do algoritmo e através do simulador hidráulico EPANET para o padrão de consumo no período diurno para pressões mínimas.

Horário		Vazão Medida – 8,79 L/s		
10:29:00		Vazão simulada – 4,18 L/s		
Nó	Pressão medida em campo [mca]	Pressão calculada – FORTRAN [mca]	Pressão calculada EPANET [mca]	
87 – Entrada do setor	82,00	82,00	82,00	
8	82,00	79,61	78,15	
16	37,40	36,41	34,85	
51	39,00	41,87	35,94	
85	52,10	45,06	48,19	
105	79,70	81,11	79,74	
107	40,40	25,00	29,64	
109	68,90	68,19	61,21	

Alem dos valores de pressão utilizados na calibração também é interessante observar os valores de vazão que saem da estação elevatória em direção ao reservatório Solar dos Lagos e dos valores que entram no setor estudado, valores que quando observados em conjuntos pode-se definir a relação entre eles, mostrando-se o setor de estudo possuindo aproximadamente 21% do volume abastecido pelo reservatório mostrado na Tabela 39.

Tabela 39 – Valores de vazão na EEA e na entrada do setor em estudo.

Local (10:29:00)	Vazão [L/s]
Vila Nova	41,36
Entrada do setor	8,79

O mesmo procedimento é repetido para mais dois padrões de consumo, um tratando-se de um momento onde as pressões são médias na rede (horário da tarde) e o outro tratando-se de um momento onde as pressões são altas na rede, tratando-se do período noturno, observados nas Tabelas 40 e 41.

Tabela 40 – Comparação entre valores de pressão medidos em campo, valores simulados através do algoritmo e através do simulador hidráulico EPANET para o padrão de consumo no período diurno para pressões médias.

Horário	Vazão Medida –7,43 L/s		
17:09:00	Vazão simulada – 2,84 L/s		
Nó	Pressão medida em campo [mca]	Pressão calculada – FORTRAN [mca]	Pressão calculada EPANET [mca]
87 – Entrada do setor	85,30	85,30	85,30
8	81,40	84,69	87,56
16	41,20	41,66	44,77
51	42,40	45,42	44,15
85	61,90	45,07	62,97
105	82,40	85,19	86,00
107	27,63	25,00	45,45
109	74,70	71,78	70,43

Já na Tabela 41, no horário de consumo médio da rede, o setor em estudo representa em média 17% do volume abastecido pelo reservatório.

Tabela 41 – Valores de vazão medidos na EEA e na entrada do setor em estudo.

Local (17:09:00)	Vazão [L/s]
Vila Nova	41,97
Entrada do setor	7,43

Tabela 42– Comparação entre valores de pressão e vazão medidos em campo, valores simulados através do algoritmo e através do simulador hidráulico EPANET para o padrão de consumo no período noturno para pressões máximas.

Horário		Vazão Medida -2,99 L/s		
03:09:00		Vazão simulada – 2,99L/s		
Nó	Pressão medida em campo [mca]	Pressão calculada – FORTRAN [mca]	Pressão calculada EPANET [mca]	
87 – Entrada do setor	88,90	88,90	88,90	
8	93,50	92,16	91,48	
16	51,20	49,26	48,27	
51	47,90	48,45	48,17	
104	58,59	60,21	60,01	
105	88,90	90,35	89,74	
106	70,40	72,56	72,56	
107	42,64	44,74	44,66	
108	67,30	63,47	63,20	
110	80,90	75,12	74,60	

No período noturno, o setor estudado já apresenta um valor maior em relação ao reservatório, algo em torno dos 24%, o que significa que as perdas no setor são de grande incidência, uma vez que os consumos noturnos são considerados praticamente nulos e a sua relação de consumo com o reservatório aumenta no período da madrugada.

Tabela 43 – Valores de vazão medidos na EEA e na entrada do setor em estudo.

Local (03:09:00)	Vazão [L/s]
Vila Nova	12,25
Entrada do setor	2,99

Através das simulações hidráulicas utilizando o EPANET, na Tabela 44 pode se observar o consumo específico para cada bairro e sua porcentagem de consumo médio por setor.

Tabela 44– Vazão de entrada no sistema e vazão distribuída nos bairros para os três padrões de consumo pelo simulador hidráulico EPANET.

Vazão na entrada				
[L/s]	2,99	7,43	8,79	
Horário	03:09:00	17:09:00	10:29:00	Consumo médio por setor [%]
Bairro – Setor	Consumo [L/s]			
Vale dos pinheiros	1,33	3,30	3,90	44,42
Moradas da Serra	0,71	1,77	2,09	23,78
Palmela	0,95	2,36	2,80	31,80

5.5.1 Problemas estruturais e de simulação

Em geral os valores simulados e medidos dos parâmetros adotados para calibração tiveram resultados próximos, demonstrando boa calibração, entretanto ocorreram alguns pontos não muito bem ajustados. Algumas diferenças consideradas elevadas entre os valores medidos em campo e os simulados e modelados matematicamente, tanto pelo modelo de calibração quanto pelo simulador hidráulico. Basicamente, avalia-se que isso ocorre devido a incertezas na topologia da rede de distribuição de água e regras operacionais. A região do Bairro Moradas da Serra foi a

única região que demonstrou uma provável fragilidade de informações de traçado da rede e regras operacionais baseadas em resultados obtidos. Destaca-se, neste setor, um booster que funciona em alguns períodos diários.

A Figura 62 destaca a topologia da rede no Bairro Moradas da Serra.

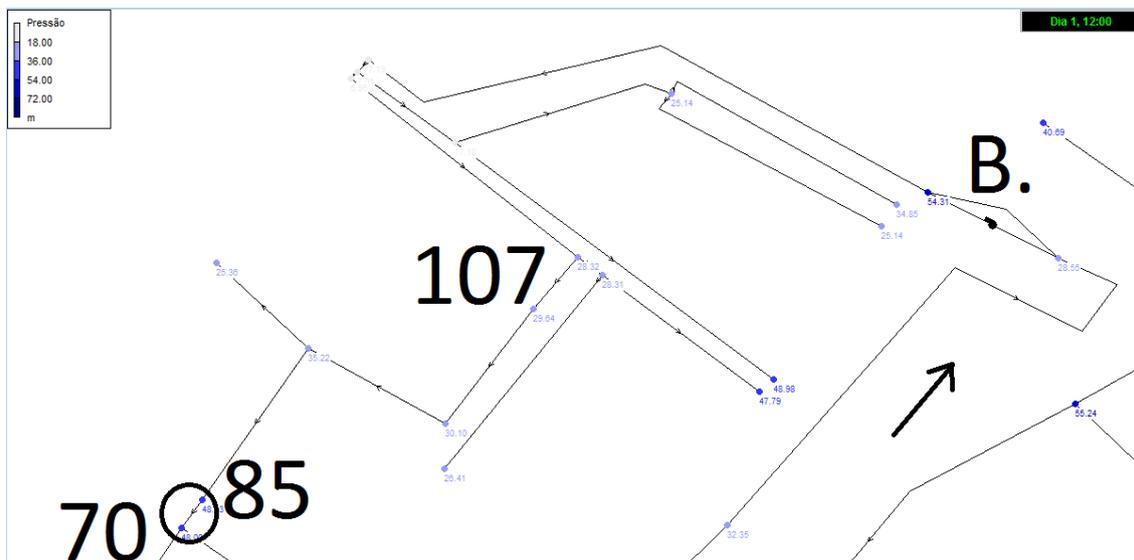


Figura 62– Traçado da rede no condomínio Moradas da Serra, desenhado sem seccionamento entre o nó 70 e 85.

Pelos resultados de simulações suspeita-se que o trecho da rede entre os nós 70 e 85 possa estar conectado, sendo o arranjo trabalhado como ponta seca no nó 85 de acordo com o material fornecido para esta pesquisa. Ou seja, o abastecimento ocorre de modo que fluido só alcança o fim da rede (nó 85) ao passar pelo booster, sendo assim o nó 85 é o último ponto a jusante desse setor da rede e de menor cota contando a partir do booster.

Então, a pressão tende a apresentar um valor elevado por não haver dissipação de energia através de outras conexões no sistema por onde o fluido e sua energia se espalhariam. Um fato interessante é que a simulação no EPANET, quando realizada de modo que exista uma conexão entre o nó 70 e 85 (sem seccionamento), a pressão medida em campo no nó 85 se mostra muito próxima a simulada no EPANET, enquanto

que nos valores simulados pelo algoritmo o nó 107 se mostrou mais próximo do valor medido em campo em qualquer dos três padrões de consumo. Outro fato interessante, é que, no período da madrugada, diferente do nó 107, o nó 85 não apresenta o mesmo comportamento de correlação direta com o booster assim como a queda de energia do nó 107, representando o desligamento do booster, o que deveria acontecer. Outro fato é que ao se observar as pressões medidas no nó 85, o vazamento fica facilmente perceptível enquanto que a montante, no nó 107, isso não ocorre. O fato é que, dentro do sistema de abastecimento em estudo, o setor Moradas da Serra se mostrou demasiado divergente em termos de informações obtidas na calibração, onde os dados perdem o grau de confiabilidade, pois os dados do simulador e do algoritmo mantem coerência entre si, enquanto que, outras vezes, os valores do algoritmo e das medidas em campo mantêm a coerência enquanto que o simulador hidráulico não, ou as medidas de campo manterem coerência com os valores gerados pelo algoritmo.

Existem dois fatos então que se colocam à frente da possibilidade de tais divergências:

- Os códigos do algoritmo não conseguem gerar, com devido grau de realidade, o comportamento do booster, pois o algoritmo utilizado trata-se da readaptação de um modelo de calibração feito por SILVA (2003), no qual a rede estudada não possuía sistema de recalque e elevação ao longo de seu traçado, o que leva a uma diferenciação na estrutura dos códigos, onde mesmo com a implementação no código, adicionando a energia equivalente do booster no sistema, não foi possível realizar uma calibração adequada àqueles trechos;

- O traçado da rede modelada não coincidir com o traçado real, pois existem duvidas sobre localidades de válvula e seccionamentos na tubulação, de modo que o

escoamento flua em outro arranjo no setor, acarretando em uma distinta resultante de forças no sistema, dando por fim em uma calibração de qualidade infiel a realidade, o que acha-se o mais provável.

5.6 Modelagem da eficiência do sistema de abastecimento

Na análise de dados de pressão da rede, foram realizadas simulações e os cálculos das perdas. O intuito então, em posse de todos os dados obtidos através da pesquisa era saber o quanto de água tratada pode ser poupada na rede através do controle de pressão. O sistema de abastecimento é regido por pressões em faixas muito elevadas, como é mostrado na Tabela 45.

Tabela 45– Valores médios de pressão na rede de distribuição simulados pelo EPANET para os três padrões de consumo.

Pressões (mca)		
Maior consumo	Consumo médio	Mínimo consumo
55,40	64,74	69,91
Média	63,35	

Os limites estabelecidos para as pressões máximas nas tubulações é de 50 mca de acordo com norma. O fato da média das pressões encontrarem-se acima dessa faixa para os três padrões na rede justifica boa parte do volume perdido. Uma das maneiras mais sofisticadas e de melhor investimento para a rede é a instalação de um regulador de velocidade conhecida como unidades de velocidade variável, equipamento qual se acopla no eixo do conjunto motor bomba, onde pode ser feito um controle de vazões mantendo um valor de pressão, ou um controle de pressões mantendo-se o valor de

vazão. No arranjo estrutural atual onde encontra-se o sistema em estudo que em geral tem elevada pressão esse equipamento poderia não alcançar melhorias no sistema.

Existem diversas quadras ao longo da rede em estudo onde as pressões encontram-se em faixas superiores a 70 mca. Uma maneira interessante é analisar e escolher esses núcleos de maior pressão e ali realizar instalações de válvulas redutoras de pressão, realizando essa operação ao longo de trechos na rede onde possuam maior série de pressões elevadas.

6 Conclusões e recomendações

A pesquisa realizada nos três bairros da rede de distribuição de água de São Lourenço – MG retrata a importância de constantes esforços voltados a essa direção, uma vez que apesar de relativamente alto, 31% (Lamoglia, 2013), este índice de perdas encontra-se abaixo da média do cenário brasileiro (aproximadamente 42%, SNIS, 2010), devido a equipe técnica que possui base suficiente para reparar danos nas tubulações, além do sistema de ligações, onde o SAAE ao se notificar de um vazamento, realiza o reparo de pronto atendimento, como o fato acompanhado durante a pesquisa.

O trabalho contribuiu para a realização de uma campanha de campo em sistemas isolados da Cidade de São Lourenço: Moradas da Serra, Vale dos Pinheiros e Palmela.

Tal trabalho experimental contribuiu para o conhecimentos destes sistemas pilotos, colecionando dados de pressão, vazão, características da rede, dados topográficos, dados de consumo de água entre outras informações de suma importância. Estes dados são importantes para o entendimento da operação e situação dos setores em estudo. Com isso gerou-se como produto um banco de dados rico para estas e futuras pesquisas.

Outro produto deste trabalho foi a modelagem realizada nestes sistemas isolada desde de montagem atual da rede de estudo, considerando a topologia do sistema, inserção de dados, comprimentos dos trechos, diâmetros, materiais, reservatórios e esquemas de entrada e saída.

Após a modelagem feita no simulador hidráulico EPANET, realizou-se o foco principal do trabalho que foi a aplicação do modelo de calibração proposto por SILVA

(2003) aplicado à rede de distribuição de água de São Lourenço-MG que proporcionou bons resultados de calibração, representados por valores medidos e simulados de pressões em diversos pontos, mesmo em alguns casos não atendendo critérios estabelecidos pelo Water Research Center (1989), principalmente no subsetor Moradas da Serra.

Avalia-se que tais diferenças são atribuídas a incertezas relacionadas ao traçado da rede que por mais que se investigue sempre está sujeita à falta de informações em qualquer lugar do mundo. Outro fator que pode ter sido importante foi a presença de um booster no Bairro Moradas da Serra que provoca uma dinâmica no sistema que pode ter provocado dificuldade na modelagem do sistema e adaptação do código de Silva (2003).

Com relação as sementes aleatórias testadas para a rotina de calibração os resultados foram considerados positivos, uma vez que repetiram em grande parte os valores de rugosidades representados pela rotina de calibração.

Uma vez que satisfeito tais objetivos pode-se realizar a operação de um sistema de distribuição de maneira eficiente, como por exemplo através da instalações de dispositivos redutores de pressão que dissipem uma quantidade determinada de energia, boosters que adicionem energia ao sistema e também operações de substituição de tubulação para minimizar vazamentos.

Como particularidade do trabalho experimental, ocorreu vazamento durante atividades de campo, reparados em algumas horas. Isso enriqueceu os resultados pois verificou-se experimentalmente o impacto nos parâmetros hidráulicos deste efeito de fissuras em redes de distribuição de água para abastecimento.

Outra particularidade do estudo foi a presença de um booster em um subsetor específico, onde se permitiu avaliar também o impacto nos parâmetros hidráulicos.

Após a calibração das rugosidades no setor utilizou-se o EPANET para poder comparar os dados com os resultados do módulo de hidráulica da rotina de Silva (2003) o que demonstrou muita semelhança.

Tal trabalho serve de base para pesquisas de eficiência hídrica e energética do sistema.

Na sequência são apresentadas algumas recomendações para futuros trabalhos:

- Recomenda-se, para futuros trabalhos, um estudo aprofundado do traçado da rede, recorrendo se necessário perfurar camadas de asfalto e calçadas para prospectar informações para sanar dúvidas.

- Campanhas de campo com maior número de dias para se estabelecer padrões diários ou mensais mais confiáveis de comportamento das redes;

- Investigação mais detalhada da rotina de Silva (2003) para verificar se esta representa de forma completa a simulação hidráulica de booster na rede;

- Possibilidade de inserir medidas de parâmetros elétricos no sistema para viabilizar melhores estudos de eficiência hídrica e energética.

- Estudos de simulações hidráulica da rede colocando-se válvulas e bombas de rotação variável no sistema.

7 Referências Bibliográficas

ABES, (2013) Perdas em sistemas de abastecimento de água: Diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e proposta de medidas para o efetivo combate.

AFSHAR, M.H. (2006) Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design.

BEN-MANSOUR, R.; HABIB M.A., KHALIFA A., YUCEF-TOUMI, K.; CHATZGEORGIU, D. (2011) Computational fluid dynamics simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction.

BIEUPOUDE, P.; AZOUMAH, Y.; NEVEU, P (2012) Optimization of drinking water distribution networks: Computer-based methods and constructal design.

COSTA, L.H.M.; CASTRO, M.A.C., RAMOS, H. (2010) Utilização de um algoritmo genético híbrido para operação ótima em sistemas de distribuição de água. Eng. Sanit. Ambient., v. 15, n. 2, p. 187-196, 2010.

LIMA, G. M.; VIANA, A. N. C.; FILHO, A. Q. S. e JUNIOR, R. S. C. D. Análise da eficiência de estações elevatórias: estudo de caso no SAAE São Lourenço, 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. 19. 1 CD-ROM.

MARCKA, E. (2004). Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água – DTA A2. Programa de combate ao desperdício de água – PNCDA, Secretaria especial de desenvolvimento urbano, Secretaria de Política Urbana, 80 p. Brasília, 2004.

MELATO, D.S. (2010). Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água: aplicação no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo, Ed. rev. – São Paulo, 2010. 133p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

MOTTA, R. G. Importância da setorização adequada para combate as perdas reais de água de abastecimento público. 2010 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP 2010. P. 1-45.

NEGRISOLLI, R. K. Análise de dados e indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água – Estudo de caso. 2009 191 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, MS 2009. P 1-12.

OBRADOVIC, D. (2000). Modelling of demand and losses in real-life water distribution systems.

PADILHA, P. S. e NIIDA, O. I. Formação, treinamento, qualificação e certificação de pessoal em estanqueidade – detecção de vazamentos não visíveis em redes pressurizadas. In: PAN AMERICAN CONFERENCE ON NON DESTRUCTIVE TESTING VIII., 2003, Rio de Janeiro. p. 10. Disponível em: <<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/T-091.pdf>>

PÉREZ, R.; PUIG, V.; PASCUAL, J.; QUEVEDO, J.; LANDEROS, E.; PERALTA, A. (2011) Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis on water distribution networks.

PETER M. B., WOLFGANG R., PETER S. M., DAVID T. M., ANA D. (2014) A critical review of integrated urban water modeling – Urban drainage and beyond.

PORTO, R. M. (2006). Hidráulica Básica. Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 4ª ed., 540 p.

SARZEDAS, G.L. (2009). Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água da região metropolitana de São Paulo, Ed. rev. – São Paulo, 2009. 113p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

SILVA, F.G.B. 2003, 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, 2002.

SILVA, R. T.; CONEJO, J. G. L.; ALVES, R. F. F.; MIRANDA, E. C. – Indicadores de perdas em sistemas de abastecimento de água. 2ed., Brasília: SEPURB, 70 p, 1999.

SOUZA, E. C. 2011, Estudos para a determinação do nível econômico de vazamento na rede de distribuição de água na zona baixa de Maceió. 148 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2011.

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

ZANTA, V. M.; JUCÁ, J. F. T.; GOMES, H. P. e CASTRO, M. A. H. Gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento. In: NURENE – Núcleo Regional Nordeste. (Org.). Abastecimento de água. Salvador: Ed ReCESA, 2008. (Guia profissional em treinamento; nível 2).

ANEXOS

Anexo A – Dados do trecho e valores de consumo por trecho.

Trecho	Nó 1	Nó 2	Comprimento do trecho [m]	Diâmetro [m]	Consumo do trecho [l/s]
1	1	2	246,56	0,1	0,142
2	1	87	117,39	0,15	0,000
3	1	88	9,1	0,15	0,000
4	2	3	210,77	0,1	0,122
5	3	4	16,33	0,05	0,003
6	3	10	28,07	0,05	0,013
7	4	105	45	0,05	0,078
8	5	6	364,71	0,05	0,075
9	5	105	331,46	0,05	0,075
10	6	7	99,81	0,05	0,021
11	7	8	123,4	0,05	0,024
12	8	9	142,42	0,05	0,052
13	10	11	350,58	0,05	0,163
14	11	12	58,66	0,05	0,001
15	11	13	106,58	0,05	0,050
16	13	14	48,56	0,05	0,135
17	13	15	196,65	0,05	0,091
18	15	16	104,32	0,05	0,015
19	15	17	95,17	0,05	0,014
20	15	18	83,62	0,05	0,039
21	19	20	124,94	0,05	0,000
22	20	26	120,67	0,05	0,000
23	20	103	68,35	0,05	0,041
24	21	103	289,91	0,05	0,013
25	21	22	113,08	0,05	0,013
26	22	23	268,81	0,05	0,031
27	22	25	39,66	0,05	0,005
28	23	104	41,43	0,05	0,010
29	24	104	139	0,05	0,010
30	25	26	317,73	0,05	0,036
31	25	28	135,57	0,05	0,031
32	26	27	22,28	0,05	0,000
33	27	28	344,12	0,05	0,010
34	27	36	34,7	0,05	0,000
35	28	29	43,42	0,05	0,010
36	29	30	54,86	0,075	0,014
37	29	56	178,12	0,075	0,041
38	29	94	75,82	0,075	0,041
39	30	31	123,71	0,05	0,019
40	30	33	61,93	0,075	0,017
41	31	32	89,92	0,05	0,016
42	33	34	100,25	0,05	0,012

43	33	110	138,69	0,075	0,031
44	34	35	272,29	0,05	0,063
45	35	36	17,07	0,05	0,035
46	35	93	11,84	0,05	0,000
47	36	110	120	0,075	0,002
48	37	38	211,99	0,05	0,028
49	37	93	223,72	0,05	0,028
50	37	109	52,07	0,075	0,027
51	39	40	159,59	0,05	0,049
52	39	41	16,01	0,075	0,029
53	39	109	45	0,075	0,103
54	41	42	215	0,05	0,008
55	41	43	182,31	0,075	0,062
56	43	44	22,37	0,1	0,074
57	43	48	43,68	0,1	0,062
58	44	45	317,67	0,15	0,010
59	45	46	135,88	0,15	0,020
60	46	88	220,39	0,15	0,000
61	47	89	95,48	0,05	0,000
62	47	90	152,86	0,05	0,000
63	48	49	352,83	0,1	0,000
64	49	50	86,28	0,05	0,022
65	49	52	9,47	0,1	0,161
66	50	51	102,84	0,05	0,020
67	52	53	128,01	0,05	0,002
68	52	54	136,23	0,1	0,006
69	54	55	196,39	0,05	0,063
70	54	56	72,9	0,075	0,032
71	57	58	106,61	0,05	0,126
72	57	59	24,86	0,075	0,017
73	57	68	54,03	0,075	0,033
74	57	94	17,75	0,075	0,006
75	59	60	85,74	0,05	0,013
76	59	65	111,58	0,05	0,000
77	60	97	7,06	0,05	0,021
78	60	98	6,97	0,05	0,033
79	61	97	22,22	0,05	0,002
80	62	106	36	0,05	0,002
81	63	98	64,09	0,05	0,011
82	64	98	60,5	0,05	0,015
83	65	66	76,78	0,05	0,033
84	65	96	5,93	0,05	0,002
85	67	96	132,54	0,05	0,015
86	68	69	105,28	0,05	0,020
87	68	95	6,97	0,075	0,002
88	70	71	56,95	0,05	0,035

89	70	95	121,92	0,05	0,019
90	72	73	134,55	0,075	0,002
91	72	108	72	0,075	0,015
92	73	74	23,71	0,05	0,022
93	74	79	203,52	0,05	0,033
94	75	76	68,48	0,05	0,046
95	75	99	68,48	0,05	0,014
96	75	77	67	0,05	0,005
97	77	78	107,36	0,05	0,042
98	77	101	37,09	0,05	0,014
99	79	101	2,5	0,05	0,014
100	80	100	82,62	0,05	0,014
101	80	102	7,46	0,05	0,056
102	80	107	25	0,05	0,019
103	81	102	54,34	0,05	0,001
104	82	102	68,4	0,05	0,027
105	83	84	45,6	0,05	0,025
106	83	107	40,12	0,05	0,043
107	84	85	52,74	0,05	0,004
108	84	86	33,09	0,05	0,029
109	88	89	3,95	0,05	0,027
110	90	91	342,72	0,05	0,018
111	91	92	259,66	0,05	0,047
112	94	108	114,43	0,075	0,014
113	97	106	61,05	0,05	0,013
114	100	101	3,91	0,05	0,000

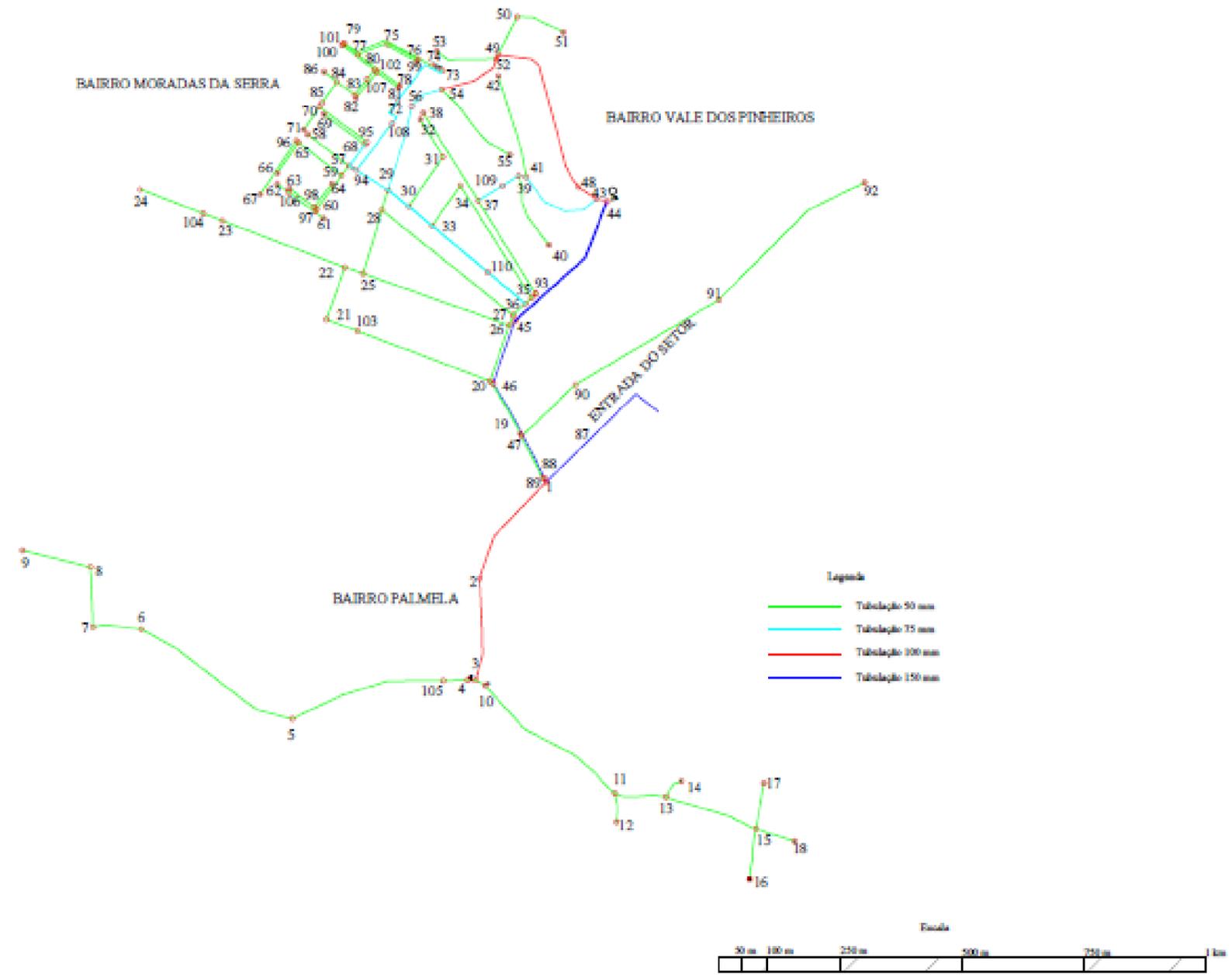
Anexo B – Nós da rede e seus respectivos valores de cota e consumo.

Nó	Cota	Consumo nodal
1	879,89	0,07
2	876,03	0,06
3	873,26	0,07
4	873,84	0,04
5	873,76	0,08
6	874,05	0,05
7	877,59	0,02
8	871,85	0,04
9	872,19	0,03
10	874,98	0,08
11	876,29	0,11
12	891,49	0
13	879,65	0,14
14	883,07	0,07
15	894,11	0,08
16	914,43	0,01
17	883,62	0,01
18	897,35	0,02
19	868,85	0
20	871,41	0,02
21	913,56	0,03
22	895,23	0,02
23	902,50	0,02
24	917,28	0,01
25	891,15	0,04
26	868,59	0,02
27	868,57	0,01
28	877,40	0,03
29	880,80	0,04
30	876,08	0,02
31	879,96	0,01
32	887,62	0,01
33	872,21	0,05
34	872,72	0,03
35	867,37	0,02
36	868,49	0,03
37	879,08	0,05
38	890,68	0,01
39	897,25	0,10
40	896,77	0,05
41	904,41	0,04
42	906,48	0,04

43	925,83	0,05
44	925,83	0,01
45	868,59	0
46	871,41	0
47	868,89	0,01
48	920,70	0,09
49	906,80	0,09
50	915,32	0,01
51	915,32	0,00
52	906,48	0,05
53	910,00	0,03
54	894,89	0,09
55	899,20	0,06
56	885,42	0,03
57	880,67	0,03
58	886,02	0,02
59	881,77	0,03
60	890,66	0,01
61	889,28	0,01
62	894,72	0,02
63	893,48	0,02
64	882,47	0,01
65	885,88	0,03
66	892,67	0,01
67	899,56	0,02
68	884,03	0,01
69	897,86	0,01
70	896,90	0,02
71	886,58	0,01
72	910,90	0,04
73	913,49	0,02
74	913,16	0,02
75	922,88	0,02
76	913,16	0,01
77	930,92	0,04
78	899,03	0,03
79	941,05	0,02
80	918,50	0,04
81	899,03	0,01
82	920,41	0,01
83	916,25	0,02
84	910,79	0,02
85	896,90	0,01
86	920,65	0,01
87	875,54	0
88	879,89	0

89	879,89	0
90	868,89	0,03
91	868,89	0,05
92	868,89	0,02
93	867,37	0,02
94	880,67	0,03
95	884,03	0,01
96	885,88	0,02
97	890,66	0,03
98	890,66	0,02
99	922,88	0,01
100	941,05	0,02
101	941,05	0,01
102	918,50	0,03
103	913,56	0,08
104	902,50	0,05
105	873,84	0,04
106	872,00	0,02
107	917,00	0,01
108	899,23	0,02
109	889,00	0,02
110	870,49	0,03

ANEXO C - Traçado da rede de distribuição e nós



ANEXO D - Traçado da rede de distribuição e nós

