

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA
MESTRADO PROFISSIONAL DE TECNOLOGIA
EM SISTEMAS PRODUTIVOS

LUIZ EDUARDO MENDES

MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA COM FOCO NA REDUÇÃO DE PERDAS REAIS DE ÁGUA

São Paulo
ABRIL/2016

LUIZ EDUARDO MENDES

MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA COM FOCO NA REDUÇÃO DE PERDAS REAIS DE ÁGUA

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional de Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

São Paulo
ABRIL/2016

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA
FATEC-SP / CEETEPS

M538m Mendes, Luiz Eduardo
Modelo de simulação para operação de sistemas de distribuição de água com foco na redução de perdas reais de água. / Luiz Eduardo Mendes. – São Paulo : CEETEPS, 2016.
163 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi
Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2016.

1. Sistemas de abastecimento de água. 2. Modelagem hidráulica. 3. Perdas reais de água. I. Degasperi, Francisco Tadeu. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

LUIZ EDUARDO MENDES

MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
DE ÁGUA COM FOCO NA REDUÇÃO DE PERDAS REAIS DE ÁGUA

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa

São Paulo, 12 de Abril de 2016

Aos meus pais, Avelino e Maria,
Stella.

À avó Aurora por ensinar-me a ler
as primeiras palavras.

À minha filha, Isis, pelas alegrias.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, pela orientação e as sugestões importantes dadas e pela amizade durante o período do curso.

Aos demais professores do curso de pós-graduação do Centro Paula Souza.

Aos funcionários administrativos do Centro Paula Souza, que sempre atenderam com presteza.

Ao Engenheiro Afrânio de Paula Sobrinho, Superintendente do SAAE Guarulhos, pela liberação do uso dos dados pertinentes à operação do sistema de abastecimento de água.

À Engenheira Nádia Brugnera, Diretora do Departamento de Planejamento, pela liberação durante a fase do curso e pelo incentivo. Ao Engenheiro Marco Aurélio, pela amizade e pelas provocações que sempre me levaram a melhorar.

À amiga de todas as horas Maria de Fátima, pelo incentivo e pela paciência inesgotável

Ao Engenheiro Dr. Luiz Araujo, pelas importantes sugestões no trabalho diário e pelo auxílio no trabalho.

Ao Engenheiro Márcio Almeida pela ajuda na fase de coleta de dados.

Aos colegas do Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental da Fatec-SP, em especial ao Professor Luiz Antonio de Almeida pelo incentivo constante.

Aos amigos da Gerência de Controle de Perdas e de Operação do SAAE Guarulhos pela ajuda no levantamento de dados de campo e por viabilizar a pesquisa.

RESUMO

MENDES, L. E. **Modelo de simulação para operação de sistemas de distribuição de água com foco na redução de perdas reais de água**: 146p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2015.

O estudo tem como meta verificar como os modelos de simulação hidráulica podem auxiliar na operação de um sistema de distribuição de água e quais os requisitos para sua utilização.

Às concessionárias responsáveis pela operação dos sistemas de distribuição de água brasileiras, tem como um dos principais problemas a perda de água, que atualmente apresenta a média de 38 %. A perda pode ser de duas naturezas, a chamada perda aparente, caracterizada pela sub medição dos micromedidores e a perda real que é provocada, em grande medida, pela má operação dos sistemas de distribuição de água.

A parcela real de perdas é uma das grandezas com maior dificuldade para sua quantificação. As poucas concessionárias que utilizam a técnica do balanço hídrico, estimam o valor de perdas reais como a sobra das perdas totais.

Para quantificar os volumes de perdas reais será verificada a viabilidade de utilizar os modelos de simulação, acoplado a um sistema SIG, com operação conjunta a um sistema SCADA, e assim estimar o volume de perdas reais, de forma contínua.

Outra aplicação, deste estudo, será com auxílio dos algoritmos genéticos para otimização de válvulas redutoras de pressão, tanto em sua locação, quanto em sua operação.

Palavras-chave: Operação de Sistemas de Abastecimento de Água. Modelagem hidráulica. Perdas Reais de Água.

ABSTRACT

MENDES, L. E. **Modelo de simulação para operação de sistemas de distribuição de água com foco na redução de perdas reais de água**: 161p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2015.

This following study has the purpose off determine the models off hydraulic simulation, how it can improve the operation of a water distribution system and also the requirements for its operation.

Brazilian companies, that are responsible for the operation of the water distribution systems, have as a major problem the water loss,the average of this losses nowadays is about 38%. Those losses can be provided by two natures, the first one is what we call apparent loss, featured by sub measurements water meters, and the second one that is called real loss, which is caused mostly by miss operation of the water distribution systems.

The countable amount off losses is the most difficult measurement to obtain when we talk about qualification, the few companies that use water balance as method esteems that the value of real losses by the resulting amount of the total losses.

In order to quantify the volume of the real losses the viability of using the simulation methods will be verified, among with a SIG system and together with an associate operation to a SCADA system estimate the real loss volume in a continuous way.

A second application for this method it will be with the support of the generic algorithms to optimises the pressure of reducing valves, as in its location as in its operation.

Keywords: water distribution system operation, hydraulics modelling, real water losses.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização das redes de distribuição da ZMC Wilson Celestino	96
Tabela 2: Caracterização das ligações domiciliares.	96
Tabela 3: Coeficientes de rugosidade tubulações-módulo Epanet	102
Tabela 4: Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) Existentes da ZMC Wilson Celestino	125
Tabela 5: Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) Sugeridas da ZMC Wilson Celestino	130
Tabela 6: Escala de Desempenho- ZMC Wilson Celestino	130
Tabela 7: Redução de Perdas Reais de Água ZMC Wilson Celestino	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mananciais da RMSP.....	19
Figura 2: Métodos básicos de controle de perdas reais adaptado.....	26
Figura 3: Um sistema de medição por zonas com três zonas principais, estando a ZMC 2 subdividida em duas subzonas de medição	27
Figura 4: Análise das vazões mínimas noturnas.....	28
Figura 5: Balanço Hídrico	30
Figura 6: Modelo de distribuição de vazões.....	37
Figura 7: Modelo de concentração de vazões.....	38
Figura 8: Exemplo de malhas de redes de distribuição	41
Figura 9: Fluxograma sumário do método de Newton-Raphson aplicado à formulação das equações dos nós	45
Figura 10: Fluxograma sumário do método do Gradiente à formulação das equações dos nós	49
Figura 11: Método da Roleta.....	64
Figura 12: Cruzamento em um Ponto.....	64
Figura 13: Exemplo de Mutação	65
Figura 14: Fluxograma Algoritmo Genético Genérico.....	65
Figura 15: Fluxograma Algoritmo Genético Geracional.....	67
Figura 16: Curva de desempenho da variável pressão	69
Figura 17: Curva de desempenho utilizada na análise de um SDA.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 18: Curva de desempenho utilizada na análise de um SDA.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 19: Curva de desempenho utilizada na análise de um SDA.....	71
Figura 20: Tela do programa EPANET	73
Figura 21: Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água, com os componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de vazão	76
Figura 22: Atribuição dos consumos na tubulação aos nós inicial e final (a linha a tracejado marca o ponto médio da tubulação).....	77
Figura 23: Vazão total fornecido Q e consumos-base $q_1 - q_7$, em uma rede de distribuição....	77
Figura 24: Calibração de pontos na rede de distribuição pontos verdes, dados de campo e	

linha vermelha valores do modelo.....	83
Figura 25: Sistema de Tele gestão SAAE- Guarulhos	90
Figura 26: Fases de construção de um modelo Hidráulico.....	92
Figura 27: Pontos de Macromedição e Controle (PMR) do SDA do SAAE Guarulhos.	93
Figura 28: Localização da área de estudo.....	95
Figura 29: Tela para delimitação de uma ZMC.....	97
Figura 30: Tela do SIG para lançamento de novos ramais de ligação	98
Figura 31: Tela de extração das informações de rede	99
Figura 32: Tela de escolha de ZMC Wilson Celestino à ser extraída	100
Figura 33: Tela de exportação de arquivo inp	101
Figura 34: Seleção de Parâmetros para Modelagem	103
Figura 35: Tela do SIG de extração da curva de consumo.....	105
Figura 36: Janela de edição de padrão de consumo-programa Epanet.....	107
Figura 37: Vazões de entrada na ZMC Wilson Celestino- Situação 1	110
Figura 38: Vazões de entrada na ZMC Wilson Celestino- Situação 2	110
Figura 39: Distribuição especial dos pontos de medição de pressão- ZMC Wilson Celestino	112
Figura 40: Gráfico de calibração	113
Figura 41: A- Primário Medidor Eletromagnético e B Secundário Medidor Eletromagnético	114
Figura 42: A- Primário Medidor Eletromagnético e 43 B Secundário Medidor Eletromagnético.....	115
Figura 43: Tabela de resultados das pressões simuladas e calculadas	116
Figura 44: Dados aquisitados e calculados no ponto WCN-181	117
Figura 45: Comparação dos valores de pressão medidos e calculados ZMC W. Celestino...	117
Figura 46: Janela de inserção de parâmetros para cálculo de perdas reais.....	118
Figura 47: Janela de valores finais de cálculo de vazões- Situação Operacional 1	119
Figura 48: Padrões de Consumo com Perdas e sem perdas- Situação Operacional 1	120
Figura 49: Vazões de Consumo com Perdas e sem perdas- Situações Operacionais 1	120
Figura 50: Volume de Perdas Reais- Situação Operacional 1-ZMC Wilson Celestino	121
Figura 51: Janela de valores finais de cálculo de vazões- Situação Operacional 2	122
Figura 52: Curvas de Consumo Calculadas ZMC Wilson Celestino- Situação Operacional 2	123
Figura 53: Volume de Perdas Reais- Situação Operacional 1-ZMC Wilson Celestino	123

Figura 54: Balanço Hídrico	124
Figura 55: Balanço de Vazões sem Otimização-Situação Operacional 1	126
Figura 56: Proposta Válvulas Redutoras de Pressão ZMC Wilson Celestino.....	127
Figura 57: Tela de Entrada de Dados Módulo de Otimização	128
Figura 58: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino	128
Figura 59: Proposta Válvulas Redutoras de Pressão ZMC Wilson Celestino.....	129
Figura 60: Índice de Desempenho ZMC Wilson Celestino.....	131
Figura 61: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino-VRPs Otimizada	132
Figura 62: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino-VRPs Otimizada	132
Figura 63: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino-VRPs Otimizadas.....	133

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
AWWA	American Water Works Association
BABE	Bursts and Background Estimates
BAT	Bacia Hidrográfica do Alto Tietê
CAD	Computer-Aided Design
CLP	Controle Lógico Programável
CCO	Centro de Controle Operacional
FAVAD	Fixed and Variable Area Discharge
FCI	Fator de Condição de Infraestrutura
FND	Fator Noite/Dia
GSM	Global System for Global Communication
GPRS	General Packet Radio Service
IDM	Índice de Desempenho da Micromedição
INMETRO	Instituto de Metrologia e Qualidade Industrial
IWA	International Water Association
NEP	Nível Econômico de Perdas
NEPa	Nível Econômico de Perdas Aparentes
NEPr	Nível Econômico de Perdas Reais
PMR	Ponto de Macromedição e Controle
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
PMR	Ponto de Medição Remota
PRCM	Perdas Reais Correntes Médias
PRIM	Perdas Reais Inevitáveis Médias
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SACP	Sistema de Auxílio ao Controle de Perdas
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCOM	Sistema Comercial SAAE Guarulhos
SDA	Sistema de Distribuição de Água
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SNIS	Sistema Nacional de informações de Saneamento
VMN	Vazão Mínima Noturna

VRP Válvula Redutora de Pressão
ZMC Zona de medição e controle

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Questão de pesquisa	21
1.2 Objetivo	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento	23
2.1.1 <i>Controle de Perdas Reais</i>	25
2.1.2 <i>Setores de Macromedição e Controle (ZMCs)</i>	26
2.2 Balanço Hídrico	28
2.3 Modelagem de Sistemas de Abastecimento de Água	34
2.3.1 <i>Teoria da Modelagem Hidráulica (Formulação Matemática)</i>	36
2.3.2 <i>Modelação do Equilíbrio Hidráulico de Sistemas de Distribuição de Água</i>	40
2.3.3 <i>Métodos Numéricos de Solução</i>	44
2.3.4 <i>Método de Newton-Raphson</i>	44
2.3.5 <i>Método do Gradiente</i>	46
2.4 Simulação hidráulica	50
2.4.1 <i>Simulador Hidráulico Epanet 2.0</i>	50
2.4.2 <i>Modelagem de Vazamentos de Água</i>	52
2.5 Algoritmos Genéticos	60
2.5.1 <i>Terminologia e Conceitos Fundamentais dos Algoritmos Genéticos (AGs)</i>	Erro!
Indicador não definido.	
2.5.2 <i>Representação e Codificação</i>	Erro! Indicador não definido.
2.5.3 <i>Geração da População Inicial</i>	63
2.5.4 <i>Seleção</i>	Erro! Indicador não definido.
2.5.5 <i>Cruzamento</i>	64
2.5.6 <i>Mutação</i>	65
2.5.7 <i>Estruturas</i>	65
2.5.8 <i>Indicadores de Desempenho dos AGs</i>	67
2.6 Construção dos Modelos de Redes	71
2.6.1 <i>Descrição Física do Sistema</i>	72
2.6.2 <i>Método de Geração Manual dos Dados</i>	72
2.6.3 <i>Método de Geração dos Dados a Partir de Cadastros em CAD</i>	74
2.6.4 <i>Método de Geração dos Dados a Partir de um SIG</i>	74

2.6.5	<i>Consumos e Vazões</i>	75
2.6.6	<i>Quantificação e Distribuição de Vazões de Consumo</i>	76
2.7	Erros e Incertezas de medição (macro e micromedição)	78
2.7.1	<i>Avaliação das Incertezas dos Resultados</i>	79
2.8	Testes de Rede	80
2.9	Calibração de modelos	81
2.9.1	<i>Medição de parâmetros para calibração de modelos</i>	84
2.9.1.1	Medição de pressão	84
2.9.1.2	Medição de vazão	85
2.9.2	<i>Processo de calibração</i>	86
2.9.2.1	Sistemas com baixas velocidades de escoamento	87
2.9.3	<i>Métodos de Calibração</i>	88
2.9.3.1	Iterativos	88
2.9.3.2	Método explícito.....	88
2.9.3.3	Método inverso	89
2.9.4	<i>Sistemas de Tele gestão.</i>	90
3	METODO	92
4	PESQUISA EMPÍRICA	94
4.1	Escolha da ZMC para construção do modelo	94
4.2	Delimitação das Áreas das Zonas de Macromedição e Controle (ZMCs)	96
4.3	Construção do modelo físico	98
4.3.1	<i>Extração de Dados da Topologia</i>	99
4.3.2	<i>Dados de Rugosidade das Tubulações</i>	101
4.3.3	<i>Determinação dos Consumos</i>	103
4.3.3.1	Perfis de Vazão	104
4.3.3.2	Padrões de Consumo	105
4.3.3.3	Determinação do padrão de consumo de perdas	107
4.4	Regras Operacionais da ZMC Wilson Celestino	109
4.5	Calibração do modelo	111
4.6	Operação do Modelo com Sistema de Tele-Gestão (Scada)	113
5	RESULTADOS	116
5.1	Calibração do Modelo	116
5.2	Estimativa do Volume de Perdas Reais	118

5.2.1	<i>Resultados da Estimativa de vazões Situação Operacional 1</i>	118
5.2.2	<i>Verificação do Funcionamento do Módulo Situação Operacional 2</i>	121
5.2.3	<i>Balanco Hídrico ZMC Wilson Celestino</i>	124
5.3	Otimização de Operação de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs)	125
6	CONCLUSÃO	134
	REFERÊNCIAS	137
	ANEXO 1 - ARQUIVO INP EPANET (REDE EXEMPLO)	142
	ANEXO 2 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE DEMANDA PARA ILUSTRAÇÃO A SEGUIR	150
	ANEXO 3 - CÁLCULO DOS CONSUMOS TOTAIS DOS NÓS (APLICAÇÃO DO FATOR DE PADRÃO DE CONSUMO)	154
	ANEXO 4 - PONTOS DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	156
	ANEXO 5 - PADRÕES DE CONSUMO CALCULADOS	160

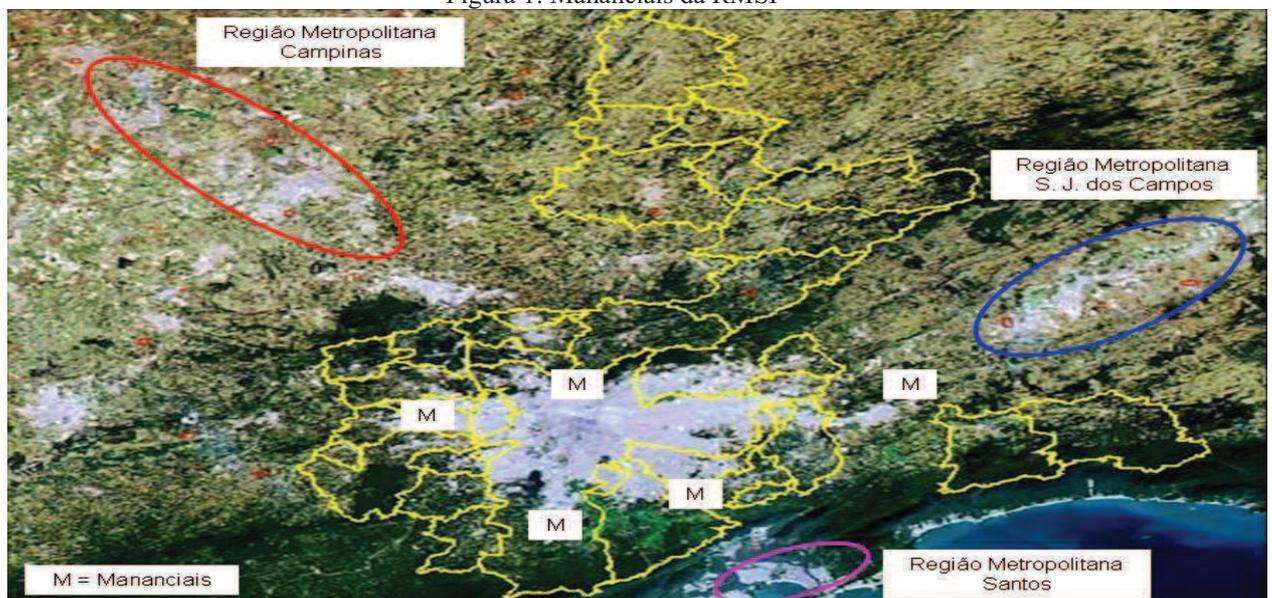
1 INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos hídricos, é uma das grandes questões relevantes no cenário mundial, tendo a água sido reconhecida pela sociedade como recurso finito e escasso. Os setores, agrícola, de saneamento e industrial são os principais usuários dos recursos hídricos e o consumo dos mesmos é estimado em 5.200 quilômetros cúbicos de água no mundo (Bezerra, 2013).

A gestão da operação dos sistemas de produção e distribuição de água, segundo Bezerra (2013), há algumas décadas tem sido um dos problemas que vem afetando o desempenho dos órgãos gestores do saneamento. Ainda Bezerra (2013) cita que o Banco Mundial estima em 32 bilhões de metros cúbicos de água tratada são perdidos anualmente em vazamentos e em operações nos sistemas urbanos de distribuição de água, e que outros 16 bilhões são distribuídos gratuitamente.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com cerca de 70% de sua superfície inserida na bacia hidrográfica do alto Tietê (BAT), possui a mais baixa disponibilidade hídrica entre as bacias hidrográficas do estado de São Paulo, estimada por Teles (2007) em 210 m³/hab/ano, índice muito abaixo do valor preconizado pela OMS de 1.500 m³/hab/ano para garantia da segurança hídrica, na Figura 1 são mostradas as regiões metropolitanas que disputam os recursos hídricos disponíveis, bem como os mananciais existentes.

Figura 1: Mananciais da RMSP



Fone: Vicentini (2012)

No Brasil, o Sistema Nacional de informações de Saneamento (SNIS, 2014), indica que o valor médio de perdas de água nos sistemas urbanos de produção e distribuição de água é de 38,75%.

Vicentini (2012) afirma que em um sistema de abastecimento de água, desde sua captação inicial até a entrada de água tratada no domicílio do consumidor final, ocorrem perdas de água por diversos motivos, o que torna o nível de perdas indicador principal do grau de eficiência de uma prestadora de serviços de saneamento.

A ausência de uma gestão eficaz, somada às estruturas deterioradas e padrões de consumo incompatíveis, levarão cada vez mais a conflitos pelo uso dos recursos existentes. Assim, além da melhoria da gestão, os prestadores de serviços de saneamento têm o desafio da universalização que hoje, em razão da baixa eficiência da maioria dos prestadores demanda uma maior quantidade de recursos hídricos além de comprometer o equilíbrio econômico e financeiro das concessionárias.

Além do quadro de escassez em diversos locais, os prestadores que operam os diversos sistemas de abastecimento de água deparam-se com o desafio da melhoria da qualidade dos serviços de abastecimento de água e da redução dos custos de operação do sistema, já que recursos novos para ampliação do sistema são cada vez mais disputados e escassos.

Nos custos de operação de um sistema de abastecimento de água, encontramos os de transporte de água através de elevatórias pelo sistema como componente importante nas despesas de exploração. De acordo com Tsutya (2004), este é o segundo item de despesa na maioria das companhias de água, Gomes (2004) salienta que o gasto com energia elétrica durante a vida útil das instalações de bombeamento pode superar o custo de implantação das mesmas.

Outro fator que provoca o aumento os gastos com energia são os vazamentos em redes de distribuição e ramais de ligação de água, que podem ocorrer principalmente pelas seguintes razões: material de baixa qualidade, mau assentamento das tubulações, idade avançada das redes, pressões elevadas nas redes de abastecimento, fadiga no material das tubulações das redes e falta de controle operacional.

Dos fatores apontados acima, as áreas responsáveis pela operação dos sistemas de abastecimento de água podem atuar sobre as três últimas variáveis e ainda influenciar sobre o aumento da vida útil das tubulações, desde que haja uma operação adequada do sistema distribuidor.

Entretanto para permitir a atuação das áreas já citadas de forma eficiente, sobretudo nas variáveis de vazão a pressão, é necessário dotar as mesmas com ferramentas que permitam prever o comportamento das redes de abastecimento em diversas situações operacionais, de forma a possibilitar a simulação de ações para regularizar as vazões e pressões nas redes de distribuição.

O conjunto das atividades acima mencionadas permite o combate efetivo das perdas de água que hoje é um dos problemas mais desafiadores das equipes de operação e manutenção dos sistemas de abastecimento público (Bezerra, 2013).

Toneto et al., (2013), apontou que uma ocorrência de redução nos indicadores de perdas de 10%, nas operadoras brasileiras de saneamento brasileiras agregaria cerca de R\$ 1,3 bilhão a receita das mesmas.

Para obter as melhorias necessárias na gestão e por consequência a redução da demanda por recursos hídricos, uma das ferramentas possíveis de serem usadas é a modelagem numérica de redes para simulações das condições operacionais, que ainda é muito pouco utilizada na operação diária dos sistemas de distribuição de água.

O uso dos modelos pode contribuir nas seguintes frentes:

Reduzir o consumo de energia elétrica;

Controlar e reduzir as perdas reais de água;

Reduzir o número de novos vazamentos.

Se forem alcançadas essas finalidades, será possível permitir a um custo menor, manter, operar e ampliar os sistemas de abastecimento de água sem aumentar a demanda por recursos hídricos que, como cita Banco Mundial (2003), para o atendimento de novas demandas é necessário a execução de novas reversões de bacia, cuja finalidade é aumentar a oferta de recursos hídricos o que, em alguns casos, pode gerar conflitos entre os usuários das bacias envolvidas.

1.1 Questão de pesquisa

As principais questões a serem respondidas com o desenvolvimento da pesquisa são:

1. Como os modelos de simulação podem auxiliar na operação de um sistema de distribuição de água para redução de perdas reais de água;
2. Quais os requisitos para construção dos modelos e sua calibração.

1.2 Objetivo

O objetivo principal da pesquisa, é estudar a viabilidade na aplicação da modelagem numérica de redes de distribuição de água, com a customização do programa Epanet 2.0, na operação dos sistemas de abastecimento de água, com foco na estimativa dos volumes de perdas reais de água, conceito este que será definido a seguir, e construção do balanço hídrico, possibilitando a comparação entre setores de abastecimento componentes de um sistema de distribuição de água.

Pode-se concluir a partir da afirmação acima que, a obtenção de indicadores que expressem o patamar de perdas de água em um sistema de abastecimento, bem como permita a comparação entre os diversos setores do sistema estudado, é de grande importância para racionalização da utilização dos recursos hídricos, na melhoria da capacidade financeira das concessionárias e na universalização dos serviços de saneamento para toda a população.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento

As perdas em sistemas de abastecimento de água, como já citado anteriormente, têm suas causas em diversos fatores que podem ser infraestruturais e operacionais. Bezerra (2013), cita que tais fatores são dependentes das características das redes de distribuição existentes que podem ser diretamente afetadas pela maneira como é executada a operação do sistema distribuidor. Entre as características operacionais que influenciam um maior ou menor volume de perdas podemos citar, o nível de tecnologia e a experiência dos técnicos responsáveis pelo processo de operação.

Nos órgãos prestadores de serviços de saneamento, e também dos reguladores, é usual expressarem as perdas de água, através indicadores percentuais. Nesses indicadores são relacionados os volumes que são disponibilizados à distribuição, que é denominado de volume macro medido, com o volume micro medido, sendo este calculado através da somatória de todos os volumes consumidos nos diversos pontos de consumo existentes no sistema, seu cálculo do indicador percentual é expresso pela seguinte expressão:

$$IPD = \{Vol. Prod. - Vol. Utiliz.\} \times 100 / Vol. Prod. \quad (1)$$

Sendo:

IPD - índice de perdas na distribuição (%);

Vol. Prod. - Volume produzido ou disponibilizado (m³);

Vol. Utiliz. - Volume utilizado (m³).

Segundo Bezerra (2013), tal prática induz a interpretações equivocadas. A principal delas é a comparação de sistemas de distribuição com características diferentes entre si, o que leva a adoção de estratégias de combate às perdas muitas vezes errôneas podendo até causar seu aumento.

Para uniformizar a terminologia adotada, bem como os indicadores mais apropriados para o estudo das perdas, em 1997 a IWA (International Water Association) criou um grupo de trabalho específico para o tratamento da questão de perdas de água. Do trabalho

desenvolvido por este grupo, resultou o chamado balanço hídrico, utilizado para quantificação e qualificação dos volumes perdidos no sistema distribuidor. Vicentini (2012), ressalta que o trabalho desenvolvido pelo grupo, além do método do balanço hídrico culminou com a primeira edição do Manual de Boas Práticas para Indicadores de Desempenho para Sistemas de Abastecimento de Água.

As perdas de água podem ser divididas em dois grandes grupos definidos por Tardelli Filho (2006) como:

a) Perda Real: corresponde ao volume de água produzido que não é utilizado pelo consumidor final. Essas perdas ocorrem em vazamentos nas adutoras, redes de distribuição e reservatórios, extravasamento de reservatórios setoriais, além dos volumes utilizados de formas inadequadas nas unidades operacionais, destacando-se a descarga para limpeza de rede de distribuição, quando estes provocam consumos superiores ao estritamente necessário para operação.

A perda real tem relação direta com a conservação da água bruta nos mananciais, já que quanto menor for o volume perdido, menor será a retirada de água para tratamento, o que contribui para a redução dos custos operacionais, esses relacionados principalmente ao transporte da água até os pontos de consumo, e os de produção que permitem a redução de aplicação de produtos químicos para tratamento e a diminuição do volume de tratamento e da necessidade de expansão dos sistemas produtores.

b) Perdas Aparentes: Perda aparente equivale ao volume de água que é consumido, não faturado pela operadora de saneamento e causado por erros de medições dos hidrômetros (macro e micro), fraudes, consumos clandestinos e falhas no cadastro comercial. A redução das perdas aparentes permite aumentar a receita tarifária, melhorando a eficiência dos serviços prestados e o desempenho financeiro do prestador de serviço, o que contribui indiretamente para a ampliação da oferta efetiva, uma vez que induz à redução de desperdícios por força da aplicação da tarifa aos volumes efetivamente consumidos.

Segundo Alegre et al., (2006), os indicadores de perdas de água são uma ferramenta que permite aos prestadores de serviços de saneamento, de forma transparente, buscar a melhora contínua da eficiência e eficácia e o controle dos resultados alcançados e permite também a comparação entre setores de um mesmo sistema distribuidor e entre concessionários. Vicentini (2012) destaca que os indicadores não são propostos com o objetivo exclusivo de comparar sistemas de abastecimento de água distintos, mas sim que para além disso, permite a elaboração de planos de ações consistentes para sua redução e controle.

Bezerra (2013) salienta que a compreensão dos tipos de perdas que ocorrem no sistema distribuidor, é o primeiro passo para os técnicos responsáveis serem capazes de gerenciar o problema de perdas de água. Este entendimento só é possível a partir da determinação dos indicadores de desempenho e da construção do chamado Balanço Hídrico.

2.1.1 Controle de Perdas Reais

As perdas reais de água, anteriormente chamadas de perdas físicas, estão sempre presentes em SDAs. Estas perdas correspondem à todo volume perdido por vazamentos ou necessidades operacionais que não chegam até o usuário final.

Quando o sistema atinge o volume mínimo de perdas reais de água reais, este é chamado perdas reais inevitáveis. A diferença entre as Perdas Reais Inevitáveis Médias (PRIM) e as Perdas Reais Correntes Médias (PRCM), que são verificadas no sistema de distribuição, representa o volume de perdas potencialmente recuperável.

O grupo de trabalho constituído pela International Water Association (IWA), citado por Lambert (2002) e Lambert (2003), cita que o volume de perdas pode ser reduzido de forma significativa através de quatro ações:

Controle ativo de vazamentos: realizado através de pesquisas rotineiras de vazamentos que não afloram à superfície, executadas através de loggers de ruído, correlacionadores e ascultamento;

Velocidade e método de execução do reparo na rede: que consiste na execução rápida dos reparos de vazamentos notificados com material e modo de execução de evitem recorrência no vazamento;

Controle de pressão: garantido através de setorização das áreas do sistema para garantia das pressões dentro das faixas de norma ou através de equipamentos, válvulas redutoras, que garantem a adequação das pressões;

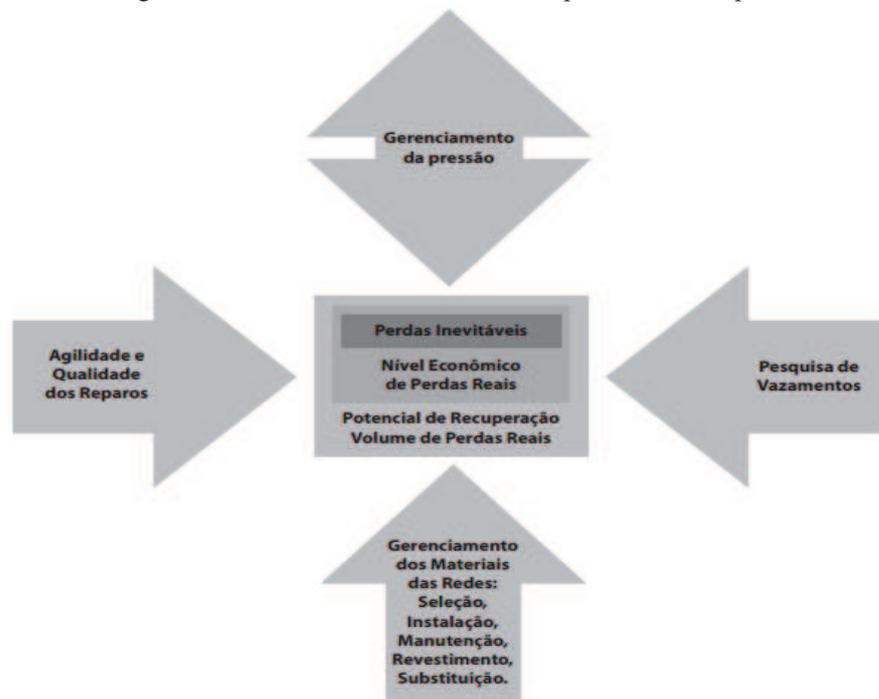
Gestão patrimonial da infraestrutura: que trata do planejamento e da execução da recuperação, reabilitação ou troca das redes de distribuição de água.

Alegre (2005), chama de *Nível Económico de Perdas (NEP)* situação em que o custo de redução de perdas em uma unidade de volume, é igual ao custo de produção dessa unidade de volume de água.

A operação de um sistema no NEP, resulta na mais baixa combinação entre o custo das ações de controle de perdas e o preço da água perdida. Para que ocorra o NEP é necessário estar-se simultaneamente perante o *Nível Económico de Perdas Reais (NEPr)* e o de *Perdas Aparentes (NEPa)*, que não é objeto do estudo desenvolvido, visto serem independentes a origem das perdas ser independente (Alegre, 2005).

O NEPr situa-se entre o volume de perdas reais correntes e volume de perdas reais inevitáveis, não sendo econômico operar os sistemas com perdas no nível das inevitáveis (ver Figura 2). Não existe um valor de referência para o NEP, este depende da área que está sendo estudada, do custo da mão-de-obra, da pressão, do estado de conservação das infraestruturas e da localização dos rompimentos de tubulações e ramais de ligação (Alegre, 2005).

Figura 2: Métodos básicos de controle de perdas reais adaptado



Fonte: Adaptado Lambert, 2002

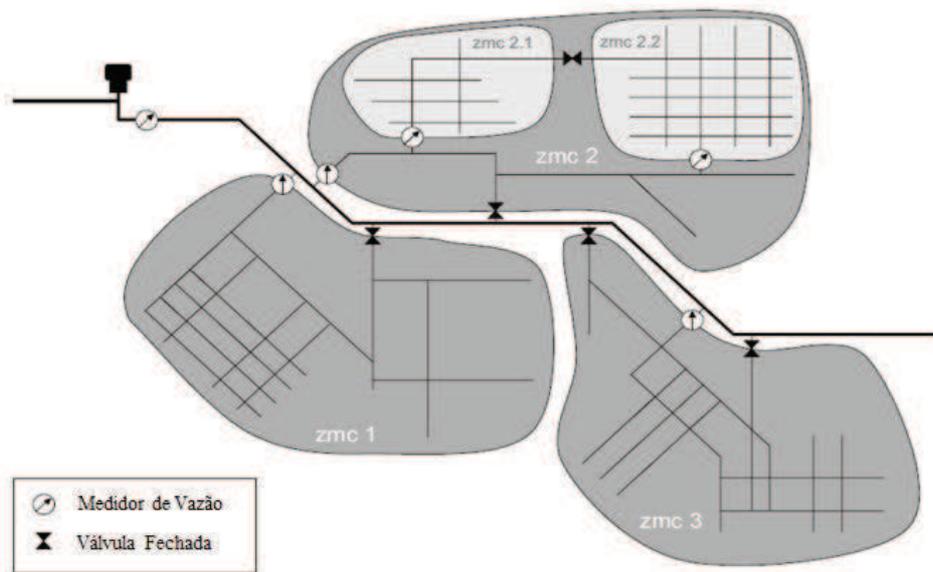
2.1.2 Setores de Macromedição e Controle (ZMCs)

O sistema de macromedição e controle consiste na setorização da rede, ou seja, a divisão da rede em setores de menor dimensão com limites conhecidos e estanques (Figura 3), onde se controlam todas as entradas e saídas de vazão, e na realização de campanhas periódicas ou contínuas de medição de vazão e pressão com vista à avaliação de perdas. Estes setores designam-se por Zonas de Macromedição e Controle (ZMC) (Coelho et al., 1994); as ZMC podem ter dimensões muito variadas dependendo da topologia da rede, densidade populacional e densidade de ramais, podendo conter entre 500 a 5000 ligações (WRC, 1994).

O sistema de medição por zona tem por objetivo a medição das vazões que entram e saem nas ZMC e das vazões consumidas, com a finalidade de determinar as perdas de água

em cada ZMC e identificar as ZMC com mais problemas. Podem ser aplicados dois métodos para avaliação de perdas que são citados por Alves (2012): o método volumétrico e o das vazões mínimas noturnas.

Figura 3: Um sistema de medição por zonas com três zonas principais, estando a ZMC 2 subdividida em duas subzonas de medição



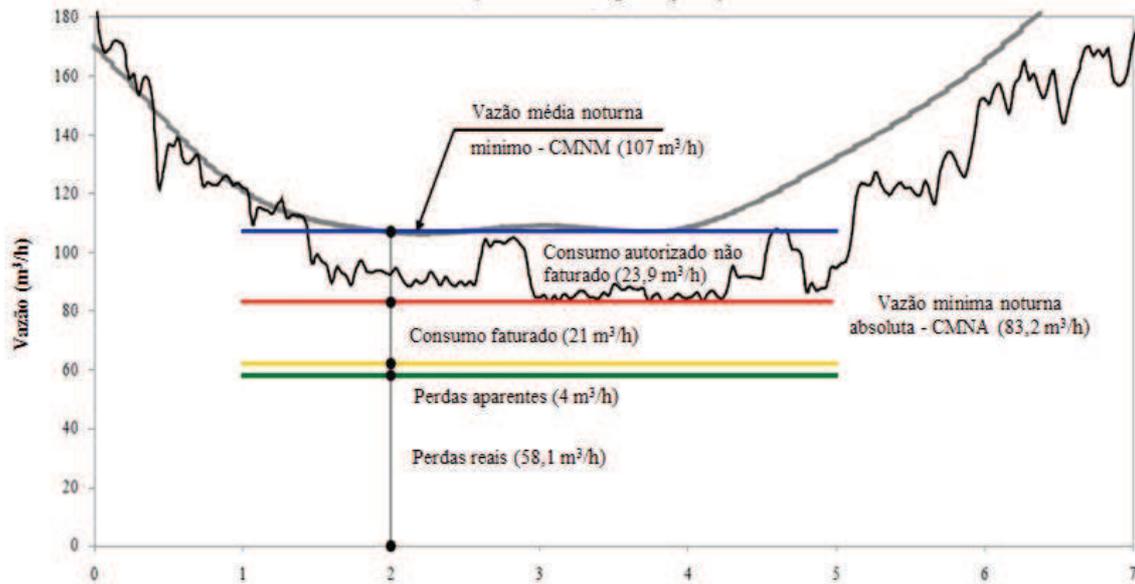
Fonte: Alegre et al., 2005

O método volumétrico que consiste no monitoramento dos volumes distribuídos para uma determinada ZMC, cujos volumes são contabilizados com periodicidade semanal ou mensal e servirão para compor o chamado balanço hídrico dos volumes de água aduzidos, exportados e consumidos durante uma determinada campanha de medição.

O método das vazões mínimas noturnas é baseado na análise detalhada das vazões durante o período de menor consumo, o que normalmente ocorre entre das 3 às 5 h da manhã, durante o qual, uma parte muito significativa do consumo, geralmente entre 70 à 90 %, se deve a perdas reais no sistema. Este método permite avaliar a evolução das vazões noturnas e identificar vazamentos súbitos pelo aumento das vazões noturnas. Salienta-se a necessidade de também se monitorar as pressões disponíveis nos pontos de consumo.

A Figura 4 apresenta um exemplo da análise das vazões mínimas noturnas de acordo com a metodologia apresentada no Report F - Using Night Flow Data do WRC (1994). A prática mostra que a combinação destes dois métodos conduz a melhores resultados.

Figura 4: Análise das vazões mínimas noturnas
Vazão Média Noturna Mínimo na ZMC 320
(antes das reparações)



Fonte: Jacob, 2006

2.2 Balanço Hídrico

Segundo Vicentini (2012), o cálculo do Balanço Hídrico é baseado em medições ou estimativas da água produzida, importada, exportada, consumida ou perdida. O problema que existia na construção do Balanço Hídrico era a grande quantidade de formatos e definições usadas em diversos países, o que ensejou uma necessidade na padronização dos formatos e definições que fossem conhecidas e empregadas pelas companhias de saneamento ao redor do mundo e que permitissem a comparação entre resultados dos diversos concessionários.

A tarefa para padronização foi executada pelo grupo de trabalho executivo, da IWA, já citado anteriormente, com a definição de todos os termos envolvidos.

O Balanço Hídrico é constituído por uma matriz, onde são lançados os valores mensurados ou estimados dos diversos usos da água, resultando na estruturação do todo ou de parte do sistema que se queira gerenciar as perdas. O cálculo do balanço de águas corresponde ao principal modelo para a avaliação e controle das perdas. A autora Vicentini (2012) afirma que os volumes envolvidos nas análises devem primeiramente ser calculados, baseados nos volumes de macro e micromedição, que eles próprios representam os indicadores primários

das perdas. Somente a partir deles, evidentemente, é que podem construir quaisquer indicadores.

A construção do balanço pode se dar a partir do cálculo de perdas aparentes, chamado de método *top down* ou a partir do cálculo de perdas reais que tem a denominação de método *botton up*.

Quando o balanço hídrico é calculado a partir da determinação das perdas reais, o que é menos comum, além do monitoramento da vazão mínima noturna, durante todos os dias da semana, é necessário a determinação das parcelas de consumo do período de ocorrência da mesma, para abater do valor mensurado pelo medidor.

É dito por Miranda (2006) que em todo cálculo completo do Balanço Hídrico, pode haver um elevado nível de incerteza. Os erros podem ocorrer principalmente na quantificação das perdas aparentes, que podem se originar desde o desconhecimento da submedição dos micro medidores, porque em um número considerável de operadores de serviços de saneamento sequer são realizadas as leituras necessárias dos micromedidores para emissão das faturas mensais, isto é, quanto maior o nível de medição mais preciso é o balanço de águas.

Assim, novamente Miranda (2006), salienta que um outro método recomendado adota o monitoramento contínuo da vazão mínima noturna para determinar as perdas reais, sendo os dados de sua mensuração originados de pesquisas, testes e pesquisas de campo, dentro das já mencionadas ZMCs.

O Balanço Hídrico (Figura 5) de um sistema de abastecimento de água é uma forma estruturada de avaliar os componentes dos fluxos e usos da água no sistema e os seus valores absolutos ou relativos (Tardelli Filho, 2006).

Figura 5: Balanço Hídrico

A	B	C	D	E
Água que entra no sistema (m ³ /ano)	Consumo autorizado (m ³ /ano)	Consumo autorizado faturado (m ³ /ano)	Consumo faturado medido (inclui água exportada) (m ³ /ano)	Água faturada (m ³ /ano)
			Consumo faturado não-medido (estimados) (m ³ /ano)	
		Consumo autorizado não-faturado (m ³ /ano)	Consumo não-faturado medido (usos próprios, caminhão-pipa, etc.) (m ³ /ano)	Água não-faturada (perdas comerciais) (m ³ /ano)
			Consumo não-faturado não medido (combate a incêndio, favelas, etc.) (m ³ /ano)	
	Perdas de água (m ³ /ano)	Perdas aparentes (m ³ /ano)	Uso não-autorizado (fraudes e falhas de cadastro) (m ³ /ano)	
			Incertezas de medição (macro e micromedição) (m ³ /ano)	
		Perdas reais (m ³ /ano)	Perdas reais nas tubulações de água bruta e no tratamento (quando aplicável) (m ³ /ano)	
			Vazamentos nas adutoras e/ou redes de distribuição (m ³ /ano)	
Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios (m ³ /ano)				
Vazamentos nos ramais (a montante do ponto de medição) (m ³ /ano)				

Fonte: Vicentini, 2012

Vicentini (2012), citando Alegre (2006) informa que para a elaboração do balanço hídrico, pelo método *top down* para o cálculo da água não faturada e as perdas de água devem seguir os passos descritos a seguir:

Passo 1: Os volumes disponibilizados que são mensurados e contabilizados durante o ano são introduzidos na Coluna A.

Passo 2: Determinar o consumo faturado medido e o consumo faturado não medido, fornecidos pelos setores comerciais das concessionárias são lançados na Coluna D; introduzir o total destes como consumo autorizado faturado (Coluna C) e como água faturada (Coluna E).

Passo 3: Calcular o volume de água não faturada (Coluna E) subtraindo a água faturada (Coluna E) à água que entra no sistema (Coluna A).

Passo 4: Definir o consumo não faturado medido e o consumo não faturado não medido na Coluna D, registrar o total em consumo autorizado não faturado na Coluna C.

Passo 5: Somar os volumes correspondentes ao consumo autorizado faturado e ao consumo autorizado não faturado da Coluna C; introduzir o resultado como consumo autorizado (Coluna B).

Passo 6: Calcular as perdas de água (Coluna B) como a diferença entre a água que entra no sistema (Coluna A) e o consumo autorizado (Coluna B).

Passo 7: Avaliar, usando os melhores métodos disponíveis, as parcelas do uso não autorizado e dos erros de medição (Coluna D), somá-las e registrar o resultado em perdas aparentes (Coluna C).

Passo 8: Calcular as perdas reais (Coluna C) subtraindo as perdas aparentes (Coluna C) às perdas de água (Coluna C).

Passo 9: Avaliar as parcelas das perdas reais (Coluna D) usando os melhores métodos disponíveis (análise de vazões noturnas, cálculos de frequência/vazão/duração dos vazamentos, etc.), somá-las e comparar com o resultado das perdas reais (Coluna C).

As definições que compõem o quadro de Balanço Hídrico são as que se seguem:

a) Água que entra no sistema: segundo Tardelli Filho (2006), a água que entra no sistema refere-se ao volume anual de água introduzido na parte do sistema de abastecimento para onde está sendo feito o cálculo do Balanço Hídrico, sendo a partir do volume produzidos nas ETAs ou, para se ter uma análise mais restrita, a partir do volume entregue de um reservatório setorial ou derivação de adutora.

Existindo fontes não medidas de água, estas devem ter seus volumes estimados ou calculados através de métodos temporários, tais como, hidrômetros de pequena capacidade, medidores do tipo *pitot*, através de testes de estanqueidade das redes.

É recomendado por Vicentini (2012) que a precisão do medidor de entrada seja verificada e sua aferição seja feita pelo menos uma vez ao ano.

b) Consumo autorizado: É dito por Tardelli Filho (2006) que o consumo autorizado é o volume anual de água que é ou não, medido ou fornecido à consumidores cadastrados e autorizados ou utilizados pela própria companhia de abastecimento para usos administrativos e operacionais, também são incluídos os volumes de água importados.

Alegre et al., (2006), acrescenta que no consumo autorizado pode ser incluído o combate a incêndios, lavagem das redes de água e esgotos, lavagem das vias públicas, rega de praças públicas, alimentação de fontes, etc. Este consumo pode ser faturado ou não faturado, medido ou não, de acordo com a prática local.

c) Perdas de água: perdas de água é o volume referente à diferença entre o volume macro medido ou estimado que entra no Sistema ou ZMC e o consumo autorizado, que pode

ser medido ou estimado. No processo seguinte ao balanço Hídrico, tais volumes ainda se distribuem em perdas reais e perdas aparentes e correspondem aos volumes não contabilizados, incluindo os volumes não utilizados e os volumes não faturados, Thorton, et al., (2008).

d) Consumo autorizado faturado: volume que gera receita potencial para companhia de saneamento, correspondente à somatória dos volumes constantes nas contas emitidas aos consumidores. Compõem-se dos volumes medidos nos hidrômetros e dos volumes estimados nos locais onde não há hidrômetros instalados (Tardelli Filho, 2006).

f) Consumo autorizado não faturado: volume que não gera receita para a companhia de saneamento, sendo originário da utilização legal da água no sistema de distribuição. Correspondem aos volumes medidos (uso administrativo da companhia, fornecimento a caminhões pipa) e volumes não medidos (combate a incêndios, lavagem de vias públicas, regas de praças públicas, lavagens de redes de água e esgotos, lavagem de reservatórios).

g) Perdas aparentes: conforme Brasil (1999), as perdas aparentes correspondem aos volumes de água que são consumidos pelo cliente, porém não são contabilizados, associadas aos erros de medição, fraudes e falhas no cadastro comercial da companhia de saneamento.

Um maior ou menor volume de perdas aparentes pode ser influenciada por fatores que extrapolam fatores administrativos, influenciados por fatores sociais, culturais, políticos e financeiros nas áreas de atuação da concessionária.

h) Perdas reais: perdas reais correspondem aos volumes de água perdidos com todo tipo de vazamentos nas tubulações das linhas de adução e da rede de distribuição e seus acessórios (juntas, registros, ventosas), extravasamentos e vazamentos em reservatórios, desde a entrada do sistema até o ponto de medição do cliente. Esses vazamentos são divididos em visíveis e não visíveis.

Os vazamentos visíveis são detectados facilmente devido ao seu afloramento e reparados rapidamente e os vazamentos não visíveis, onde há maior dificuldade na sua identificação sendo indispensável a utilização de equipamentos e profissionais especializados para a detecção dos vazamentos, não havendo necessidade da espera do seu afloramento para ser reparado.

i) Consumo faturado medido (inclui água importada): o cálculo do consumo faturado anual medido caminha lado a lado com a detecção de faturamento/pagamento e possíveis erros de manipulação de dados, informações que são exigidas numa fase posterior ao processo

de auditoria das águas para a estimativa das perdas aparentes. O consumo de diferentes categorias de clientes/consumidores (doméstico, comercial ou industrial) deve ser extraído do cadastro comercial para posteriormente ser analisado e validado.

j) Consumo faturado não medido (estimados): o consumo faturado não medido é extraído dos sistemas comerciais e de faturamento. Com o intuito de analisar a precisão das estimativas, os clientes de uso doméstico, cujos consumos não são medidos devem ser identificados e monitorados durante um certo período, seja pela instalação de medidores nas ligações não medidas, seja através do monitoramento de uma pequena área de uma quantidade de clientes não medidos Vicentini (2012).

k) Consumo não faturado medido (usos próprios, caminhão-pipa, etc.): em boa parte das companhias de saneamento existem alguns usos que não passam por um processo de medição. No caso de sistemas de médio e grande porte esses consumos podem assumir valores consideráveis, devendo o prestador estabelecer um processo de estimação a contabilização desses volumes (AWWA, 2009).

Qualquer consumo não faturado e que possua alguma forma de ser mensurado pode ser quantificado através da obtenção de leituras periódicas dos medidores referente ao período de consumo. Em alguns casos podem existir medidores instalados para a água destinada aos usos operacionais, o que permite que seja atribuída uma fatura de forma regular, mesmo que não seja atribuído nenhum valor monetário na fatura Thorton, et al., (2008).

l) Consumo não faturado não medido (combate a incêndio, favelas): consumo não faturado não medido refere-se ao volume destinado para usos sociais, tais como em áreas de sub habitação ou para combate à incêndios. (Miranda, 2010).

m) Uso não autorizado (fraudes e falhas de cadastro): as fraudes e furtos ocorrem praticamente em todos os serviços públicos de água potável, sejam eles no Brasil ou em outros países. Na maioria das vezes as fraudes são realizadas de forma premeditada pelos próprios clientes. Muitas vezes o uso não autorizado em um sistema pode estar relacionado a diversos fatores, os quais podem se relacionar: a saúde econômica da comunidade, o valor que a comunidade atribui a água como um recurso natural, as políticas de fiscalização das concessionárias de saneamento e a vontade política da gestão das companhias em aplicar políticas eficazes para impedir o consumo não autorizado (AWWA, 2009).

2.3 Modelagem de Sistemas de Abastecimento de Água

Coelho, et al., (2006), comentam que a modelagem de sistemas de abastecimento de água permaneceu, até muito recentemente, no domínio das técnicas empregadas quase que de forma exclusiva por acadêmicos para a exploração de problemas teóricos ou aplicações experimentais. A sua utilização efetiva por prestadores de serviços de saneamento tem sido reduzida ou inexistente, descontando o seu uso na verificação – muitas vezes apenas formal – de soluções de projeto, sem aplicações operacionais.

É dito por Alves (2012), que os modelos numéricos com a finalidade de simular um sistema de distribuição de água, consiste em um algoritmo, que pode ser direto ou iterativo, que busca caracterizar e relacionar todas as variáveis do sistema, no que se refere a pressões, vazões e perdas de carga que ocorrem nas diversas possibilidades de operação.

Os valores são obtidos nos nós de junção, cujas variáveis a serem inseridas no modelo são a cota topográfica, as demandas que caracterizam a solicitação do sistema modelado e os trechos de tubulações que fazem as ligações entre dois nós, que possuem as seguintes grandezas que os caracterizam: comprimento, diâmetro interno e a rugosidade das paredes internas.

O comportamento de um sistema, e as suas deficiências, não são facilmente perceptíveis de forma direta. Muitas vezes os técnicos responsáveis pela operação do sistema só conseguem perceber a existência de limitações, quando já ocorre ou ocorreu algum problema, o que ocasiona reclamações dos usuários e desgaste à imagem do concessionário. Tais problemas podem estar relacionadas a: falta de pressão; falta de água; elevados volumes de perdas; vazamentos que afloram na superfície; água com cor. Considerando que a verificação e caracterização e o possível diagnóstico se dá por inspeção direta, o que envolve pessoal e equipamento, o que contribui para a elevação dos custos operacionais dos sistemas distribuidores, constata-se então a necessidade de instrumentos de apoio baseados em modelagem e análise de indicadores.

Também no caso de expansão e de novos sistemas de distribuição, o custo elevado da infraestrutura e a variabilidade das condições de operação que devem ser previstas faz com que o processo de planejamento e projeto se revista de uma forte necessidade de simulação e verificação das possíveis soluções (Coelho et al., 2006).

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem, com uma boa margem de precisão, analisar e prever o comportamento das variáveis hidráulicas e de parâmetros de qualidade da água do sistema, a partir das características dos seus componentes, da sua forma de operação e dos consumos solicitados. Segundo Coelho et al., (2006) os modelos permitem de forma rápida e com grande eficácia a realização de análises de sensibilidade e a simulação dos cenários mais variados, com suficiente aproximação, sem ser necessário interferir com o sistema estudado ou arriscá-lo a regras operacionais desconhecidas.

Pode-se ainda utilizar os modelos em múltiplas aplicações nos domínios do planeamento, projeto, operação, manutenção e reabilitação de sistemas de transporte e distribuição de água. Entre as possíveis aplicações são destacadas por Coelho (2006):

Na fase de projeto os modelos são aplicados no dimensionamento dos sistemas, através da procura das melhores topologias, da definição de diâmetros e materiais para as tubulações e demais componentes e do dimensionamento de reservatórios e instalações elevatórias;

a) No apoio à elaboração de planos de desenvolvimento estratégico, com recurso à simulação das grandes opções, em escala não detalhada, mas com projeções no tempo, sobretudo dos consumos;

b) Quando da simulação de problemas e cenários de operação corrente, como sejam consumos de ponta sazonal, gestão dos níveis em sistemas com múltiplos reservatórios de serviço, ou situações de emergência como falhas em grupos elevatórios ou o combate a incêndios;

c) O treinamento de operadores em sistemas de operação complexa, evitando que a aprendizagem seja na tentativa e erro, que pode incorrer em riscos diretos para o sistema e para os consumidores;

d) O controle e otimização de parâmetros de qualidade da água, como por exemplo a manutenção de um residual adequado de cloro, a localização de equipamentos de recloração, o controle de tempos de percurso ou a escolha de pontos de amostragem;

e) A reabilitação de sistemas deficientes, e a programação das intervenções com minimização de impacto no consumidor;

f) A redução e/ou recuperação da energia de bombeamento;

g) O apoio à modelagem das redes, pela análise da viabilidade e impacto da criação dos setores;

h) O controle de perdas de água, por exemplo através de programas de redução de pressões.

2.3.1 Teoria da Modelagem Hidráulica (Formulação Matemática)

Araújo (2005) cita que, em geral, o escoamento da água em sistemas de abastecimento pode ocorrer de duas formas: escoamento com superfície livre, onde a superfície da água está em contato permanente com a pressão atmosférica, e que normalmente ocorre em canais a céu aberto e escoamento sob pressão em tubulações fechadas, onde a água está constantemente submetida a uma pressão superior a pressão atmosférica. Se as características do escoamento, em particular a vazão, a pressão e a velocidade permanecerem constantes num intervalo de tempo, o escoamento está em regime permanente, caso contrário é dito, transitório ou em regime variável.

Para Sá Marques (2014), o cálculo de redes de distribuição de água, pode-se considerar o regime permanente, que é justificado por Alves (2012) e Araujo (2005), pelo fato de que em sistemas de distribuição de água, as variações temporais das características do escoamento processam-se de forma contínua e lenta, dentro de um determinado intervalo de tempo não muito longo. o que não provoca diferenças significativas nos resultados finais, aplicando-se o estudo em regimes transitórios somente para casos especiais tais como o transiente hidráulico.

Alves (2012), salienta que o principal objetivo no cálculo de um sistema de distribuição de água, é a determinação das características dos órgãos componentes de tal sistema, como diâmetros de tubulações, níveis mínimos de reservatórios para garantia de atendimento de todos os usuários, características operacionais de bombas e válvulas de controle, para atingir este objetivo são utilizadas equações que compatibilizem os vários parâmetros e critérios hidráulicos de projeto, que são pressão, velocidades mínimas e máximas, para toda a envoltória de vazões do setor.

Ao se estabelecer a equação de energia entre dois pontos, um a montante e outro à jusante de um trecho de tubulação, chega-se à conclusão que existe uma vazão, que se considerada constante por todo o trecho, desprezando as cargas cinéticas, as perdas de carga localizadas, e admitindo escoamento turbulento, apresenta um comportamento hidráulico muito semelhante ao produzido pelo escoamento real. A este escoamento Souza (1996) nomeou de vazão equivalente, cuja expressão que define seu valor é:

$$Q_e = \sqrt{Q_j^2 + Q_j qL + \frac{1}{3} q^2 L^2} \quad (2)$$

Em que:

Q_e é a vazão equivalente (m^3/s);

Q_j é a vazão à jusante da tubulação (m^3/s);

q é a vazão distribuída em cada metro de tubulação (m^3/m);

L é o comprimento da tubulação (m);

Souza (1996), cita que, Bresse propôs em 1931 a expressão que continua a ser usada atualmente para definição das vazões de equivalência em tubulações de distribuição.

$$Q_e = Q_j + 0.55 qL \quad (3)$$

Em que:

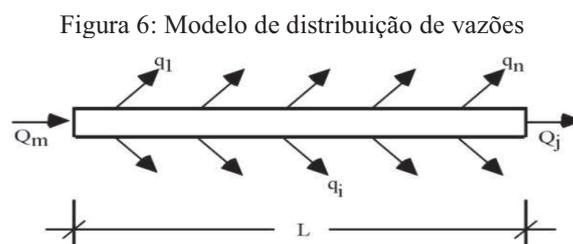
Q_e é a vazão equivalente (m^3/s);

Q_j é a vazão à jusante da tubulação (m^3/s);

q é a vazão distribuída em cada metro de tubulação (m^3/m);

L é o comprimento da tubulação (m).

A aplicação desta expressão consiste em admitir que o escoamento variado em uma tubulação com distribuição em marcha, definido pelo modelo apresentado na Figura 6.



Fonte: Sá Marques (2014)

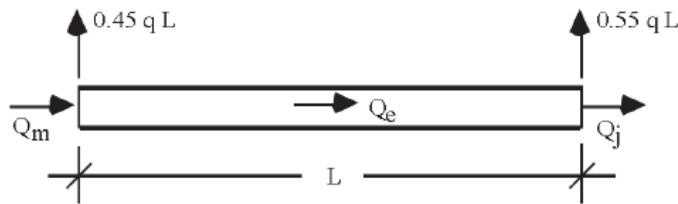
$$\sum_{i=1}^n q_i = qL; \quad (4)$$

Onde:

n é o número de ramais domiciliares que a tubulação abastece.

Q_m é vazão a montante da tubulação tenha um comportamento hidráulico semelhante ao do escoamento uniforme, definido de acordo com o modelo apresentado na Figura 7.

Figura 7: Modelo de concentração de vazões



Fonte: Sá Marques (2014)

De acordo com Pinto (2010) o modelo de simulação hidráulica de um sistema de abastecimento de água é composto por um conjunto de dados que descrevem as características reais do sistema, dos seus consumos e das suas condições operacionais; um conjunto de equações matemáticas que reproduzem o comportamento hidráulico do sistema e seus componentes.

Araújo (2005) e Sá Marques (2014) citam ainda que o funcionamento dos sistemas de distribuição de água é regido por dois princípios básicos, o da conservação de massa e da conservação de energia.

A seguir são apresentadas as equações aplicadas à modelagem, regidas por estes dois princípios:

a) Equação da continuidade – a soma algébrica das vazões que entram e saem em cada nó da rede deve ser igual a zero, considerando a água como fluido incompressível:

$$\sum Q_{af} - \sum Q_{ef} = Q_n \quad (5)$$

Em que:

Q_{af} é vazão afluyente ao nó (m^3/s);

Q_{ef} é vazão efluyente ao nó (m^3/s);

Q_n é a vazão de entrada ou consumida no nó (m^3/s);.

b) Equação da conservação de energia – a soma algébrica de todos os incrementos de carga ao longo de uma malha deve ser igual a zero. Para cada malha a equação da conservação de energia, para cada tubo, pode ser escrita como:

$$\sum \Delta h_{ij} = \sum E_p \quad (6)$$

Em que:

h_{ij} é perda de carga em cada tubulação (incluindo perdas localizadas) incluída na malha (m);

E_p é energia fornecida ao escoamento no interior da malha (m)

Lei de resistência ao escoamento – expressa a perda de carga contínua numa tubulação sob pressão como função da rugosidade, diâmetro e da velocidade do escoamento que expressa através da formula universal de perda de carga ou de Darcy-Weisbach:

$$\Delta h_l = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Onde:

Δh_l é perda de carga (m);

f é o fator de atrito;

L é comprimento da tubulação (m);

D é diâmetro da tubulação (m);

v é velocidade média do escoamento e g é aceleração da gravidade (m/s);

Re é o número de Reynolds.

Para o cálculo explícito do fator de atrito f , pode-se utilizar a expressão de Swamee (1993), que na forma mostrada abaixo pode ser utilizada para escoamento em regimes tanto laminar, quanto turbulento. O gráfico obtido com tal equação se adapta muito bem ao tradicional gráfico de Moody.

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

Em que:

f é fator de resistência;

D é diâmetro interno da tubulação (mm);

ε é rugosidade da tubulação (mm).

2.3.2 Modelação do Equilíbrio Hidráulico de Sistemas de Distribuição de Água

Araújo (2005), define nó como sendo o local onde teoricamente a água entra ou sai da rede e a cota piezométrica é constante. Para cada nó da rede, a pressão ou a vazão de entrada ou saída de água é conhecida. Os nós podem ser de dois tipos:

Junção todos os pontos de ligação entre duas ou mais tubulações de consumo, ou de localização de elementos especiais, tais como válvulas, reservatórios, bombas que não sejam nós de cota piezométrica fixa.

E por fim temos as tubulações, que são elementos de ligação que transportam água entre dois nós sem qualquer entrada ou saída ao longo do mesmo.

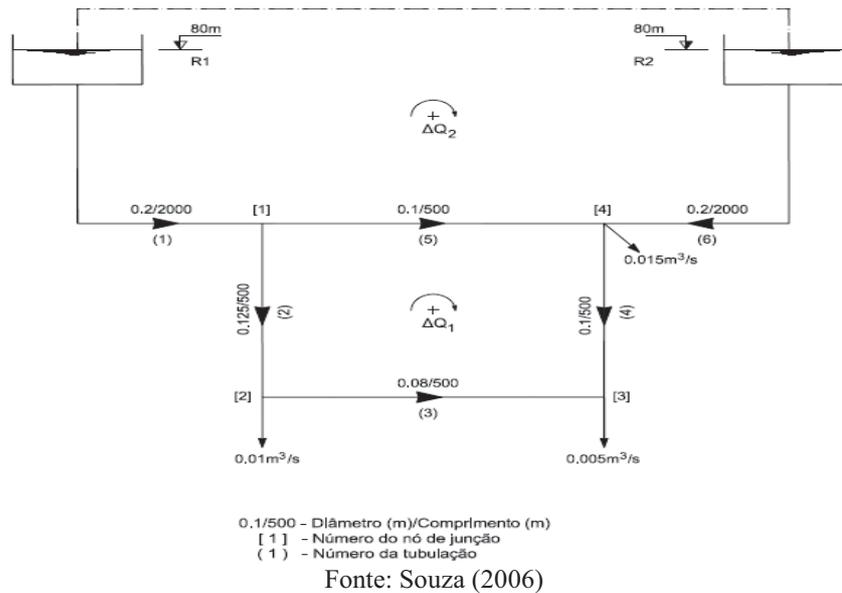
A modelagem hidráulica de um sistema de distribuição de água, consiste em formar um conjunto de equações que represente o mais fielmente possível, o sistema de distribuição de água existente ou a se projetar. Para se obter o conjunto de equações citado é necessário fazer uso das duas leis básicas já definidas; a lei de continuidade, onde em um nó as somatórias das vazões afluentes devem ser iguais a somatória das vazões efluentes do nó, exceto quando o nó em estudo possuir capacidade de armazenamento; a lei de conservação de energia em que a somatória das perdas de carga nas tubulações pertencentes a uma mesma malha deve ser igual a zero, e a uma equação de resistência, Alves (2012).

Ainda Araújo (2005) considera que sendo uma rede de distribuição de água constituída por N número de nós de junção, F número de nós de cota piezométrica fixa e T número de tubulações, pode-se estabelecer uma relação que estime o número de malhas naturais elementares, M , ou seja, malhas que no seu interior que não contêm nenhuma outra malha, como demonstrado na equação 9.

$$M = T - N - (F - 1) \quad (9)$$

Na Figura 8 exemplo de sistema com uma malhas naturais e uma fictícia.

Figura 8: Exemplo de malhas de redes de distribuição



No caso dos sistemas malhados, onde o escoamento pode assumir diversos sentidos a priori não se pode determinar qual deles será assumido pelo escoamento, o que aumenta a complexidade dos cálculos, envolvendo quase sempre sistemas de equações não lineares.

Sousa (1996) e Araújo (2005), salientam que com a utilização dos princípios da continuidade e da conservação de energia o equilíbrio hidráulico de uma rede de distribuição de água poderá ser obtido com a utilização das seguintes formulações:

Equações dos nós, nesta formulação, as incógnitas são as cotas piezométricas em cada nó de junção, e as N equações do sistema traduzem a continuidade no nó respectivo, através da soma das vazões afluentes aos nós através das várias tubulações conectadas ao mesmo. E pela equação da continuidade temos que:

$$\sum_{j=1}^{NC} q_{ji} = C_i \quad (N \text{ equações}) \quad (10)$$

Em que:

q_{ji} é a vazão escoado do nó j para o nó i (m^3/s);

C_i é a vazão consumido no nó de junção i (m^3/s);

NC é o número de tubulações adjacentes ao nó i .

A equação da conservação da energia em cada tubo é usada para definir a vazão nesses tubos.

Ao ser combinada a equação 5 à equação de conservação de energia temos:

$$\sum_{j=1}^{NC} \text{sgn}(H_j - H_i) \left(\frac{|H_j - H_i|}{K_{ji}} \right)^{1/n_{ji}} = C_i \quad (\text{N equações}) \quad (11)$$

Em que:

H_j são as cotas piezométricas no nó de junção j (m);

H_i são as cotas piezométrica no nó de junção i (m);

K_{ji} é o coeficiente da expressão de perda de carga que depende das características da tubulação do nó j para o nó i ;

Sgn- Fornece 1 se núm for positivo, zero (0) se núm for 0, e -1 se núm for negativo.

n_{ji} é o expoente da vazão na expressão de perda de carga na tubulação entre os nós j e i .

O sistema com N equações não lineares contém N incógnitas (cotas piezométrica nos nós de junção), que uma vez determinadas, permitem calcular a vazão em cada tubulação, a partir das cotas piezométricas nas suas extremidades.

Novamente Souza (1996) e Araújo (2005), colocam que a partir das equações de conservação de energia e da continuidade, acima definidas pode-se construir as equações de cada uma das malhas do sistema de distribuição de água estudado ou projetado. Neste método, supõe-se um conjunto de valores para as vazões iniciais, em cada tubulação da rede, de tal modo que a equação da continuidade seja satisfeita em cada nó. Calculam-se então o somatório das perdas de carga em cada malha. Alves (2012), salienta que uma vez que as vazões iniciais foram estimadas é provável que não seja satisfeita a lei de conservação de energia, sendo necessária a correção.

Araújo (2005) diz que nesta formulação, as incógnitas são os incrementos de vazão ΔQ_i aplicados a cada tubulação da malha de forma a corrigir os valores iniciais das vazões de modo que a somatória das perdas de carga em cada malha se anule. Em malhas vizinhas, as tubulações comuns são afetadas pelas correções efetuadas em qualquer uma das malhas. Nestas condições o equilíbrio hidráulico pode ser obtido por:

$$\sum_{l=1}^{Nl} K_l (Q_{0_l} + \sum \Delta Q_l) |Q_{0_l} + \sum \Delta Q_l|^{n-1} - \sum_{j=1}^{NB} E_{b_j} = 0 \quad (\text{M equações}) \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^{Nl} K_l (Q_{0_l} + \sum \Delta Q_l) |Q_{0_l} + \sum \Delta Q_l|^{n-1} - \sum_{j=1}^{NB} E_{b_j} = \Delta E \quad (\text{F-1 equações}) \quad (13)$$

Em que:

K_l é o coeficiente de perda de carga da *l*ésima tubulação pertencente à malha (m/m);

Q_{0l} é a estimativa inicial da vazão para a *l*ésima tubulação pertencente à malha (m^3/s);

$\sum \Delta Q_l$ é a somatório das correções de vazão relativas às malhas que incluem a tubulação *l*;

n é o expoente da vazão;

E_{b_j} é a energia fornecida ao sistema pela *j*ésima estação elevatória ou booster pertencente à malha;

ΔE é a diferença de cota piezométrica entre dois nós de cota piezométrico fixa da malha imaginária (m);

N_t é o número de tubulações pertencentes à malha;

N_B é o número de estações elevatórias ou boosters pertencentes à malha.

Tem-se, assim, um sistema de $[M + (F-1)]$ equações não lineares, cujas incógnitas são as correções de vazões nas diferentes malhas do sistema, sendo essas naturais ou imaginárias.

Equações dos trechos são formuladas em termos da equação da continuidade para cada nó e da equação da conservação da energia para cada malha, tendo as vazões em cada trecho como incógnitas. Desta forma vem:

$$\sum_{j=1}^{NC} Q_{ji} = C_i \quad (N \text{ equações}) \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^{N_t} K_l \times Q_l \times |Q_l|^{n-1} - \sum_{j=1}^{N_B} E_{b_j} = 0 \quad (M \text{ equações}) \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^{N_t} K_l \times Q_l \times |Q_l|^{n-1} - \sum_{j=1}^{N_B} E_{b_j} = \Delta E \quad (F-1 \text{ equações}) \quad (16)$$

Em que:

Q_l é a vazão na *l*ésima tubulação pertencente à malha (m^3/s).

As variáveis restantes já foram definidas, o que perfaz um número total de $(N+M+F-1)$ equações. Sendo as equações (14) lineares e as demais (15 e 16) não-lineares.

2.3.3 Métodos Numéricos de Solução

Os sistemas de equação mencionados no item anterior são do tipo não lineares, o que não permite sua resolução direta. Para encontrar a solução destes sistemas é preciso recorrer a métodos iterativos para sua solução, ou seja, os valores das incógnitas são inicializados e corrigidos até que encontrar à uma solução que permita o equilíbrio do sistema.

Alves (2012), informa que existem vários métodos de resolução de sistemas de equações não lineares dentre eles podem ser citados:

Método de Hardy-Cross.

Método de Newton-Raphson.

Método da Teoria Linear.

Métodos "Quase Newton".

Método de Newton com controle de passo.

Método de Newton modificado para resolução de formulação de trechos.

Método do Gradiente.

A seguir serão apresentados dois métodos de resolução de sistemas de equações não lineares. O primeiro chamado de método de Newton, foi utilizado para o desenvolvimento do Método Gradiente adotado pelo programa Epanet 2.0 na solução de modelos de redes de distribuição de água.

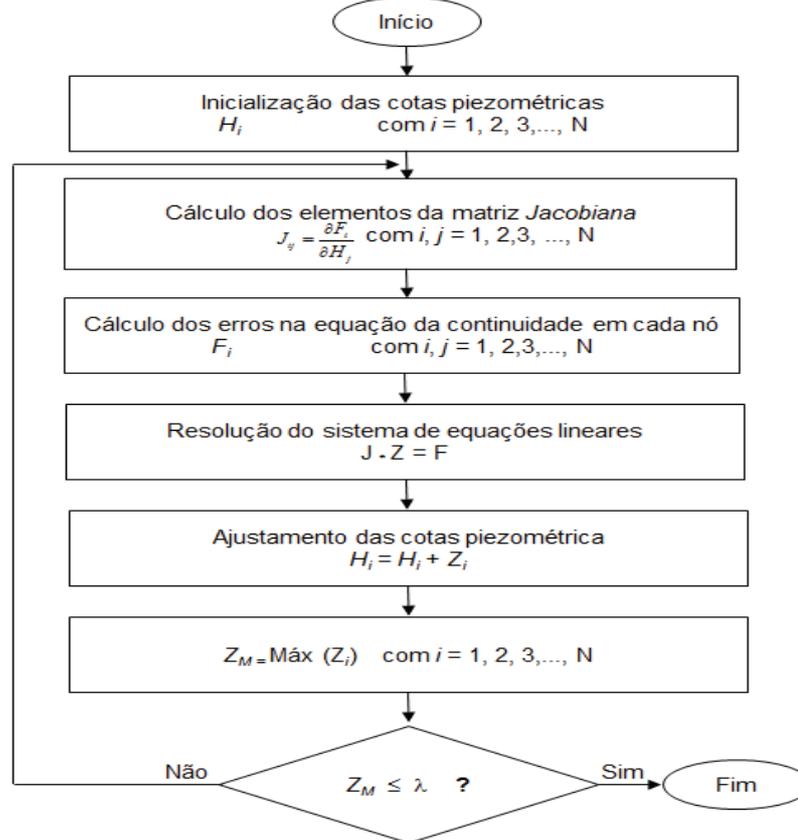
2.3.4 Método de Newton-Raphson

Segundo Araújo (2005) e Ribeiro (2011) o método de Newton-Raphson foi desenvolvido para a resolução de sistemas de equações não lineares em geral e foi utilizada pela primeira vez em 1963, para resolução de equações de equilíbrio hidráulico de um sistema de distribuição de água utilizando as equações dos nós.

A Figura 9 apresenta o fluxograma para o caso mais comum (formulação das equações dos nós). Este método pode ser utilizado na resolução de qualquer dos sistemas de equações

que traduzem as condições de equilíbrio hidráulico, ou seja, através das equações dos nós, das malhas e dos trechos (Araújo, 2005).

Figura 9: Fluxograma sumário do método de Newton-Raphson aplicado à formulação das equações dos nós



Fonte: Adaptado de Araújo, 2005.

Como em Hardy Cross, também é um método iterativo cuja recorrência é dada pela seguinte expressão:

$$X^{m+1} = X^m - J(X^m)^{-1} \times F(X^m) \quad (17)$$

Em que:

X_{m+1} , X_m são os vetores das incógnitas nas iterações de ordem (m+1) e (m);

$J(X_m)^{-1}$ inversa da matriz Jacobiana, para $X=X_m$;

$F(X_m)$ vetor dos valores das funções F_j , para $X=X_m$.

Dada a necessidade da inversão da matriz Jacobiana para cada iteração, na análise da expressão de recorrência (17), opta-se por um método numérico mais eficiente que consiste em determinar um vetor Z como solução do sistema linear ($J \cdot Z = F$). Assim tem-se:

$$X^{m+1} = X^m - Z^m \quad (18)$$

Em que:

Z_m a solução do sistema de equações linear.

$$J(X^m) \times Z^m = F(X^m) \quad (19)$$

Em que:

Z_m a solução do sistema de equações linear.

As correções são representadas pelo vetor Z de forma a conseguir um vetor X mais próximo da solução.

2.3.5 Método do Gradiente

Alves (2012) e Araújo (2005) relatam que o programa Epanet 2.0 simula redes hidráulicas através do Método Híbrido Nó-Malha que considera as equações da continuidade e da conservação da energia e a relação entre a vazão e a perda de carga. Posteriormente, passou a ser designado por "Método do Gradiente", inicialmente publicado em Italiano por Todini (1979).

É salientado por Alves (2012) que a única diferença entre estes métodos, "Newton Malha-Nó" e do "Gradiente" é o modo como as vazões nos trechos são atualizadas após uma nova solução de cotas piezométricas nos nós terem sido encontradas durante o processo iterativo. O método de Todini e Pilati foi escolhido para realizar o cálculo do equilíbrio hidráulico no Epanet por ser aquele que apresenta maior simplicidade.

Partindo-se de uma rede com N nós e NF nós com cota piezométrica fixa (RNVs e RNFs), considere-se que a relação vazão perda de carga em uma tubulação entre os nós i e j pode ser escrita pela seguinte expressão:

$$H_i - H_j = h_{ij} = Q_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (20)$$

Onde:

H é a cota piezométrica no nó (m);

h a perda de carga total (m);

Q a vazão (m³/s);

n o expoente da vazão e

m o coeficiente de perda de carga localizada;

o seguinte conjunto de equações que devem ser satisfeitas, referem-se à conservação das vazões nos nós, que é expressa pela equação (21):

$$\sum Q_{ij} - C_i = 0 \dots\dots\dots \text{para } i = \dots N \quad (21)$$

Em que:

C_i é o consumo no nó e, por convenção, a vazão que chega ao nó é positiva.

Desta forma, conhecendo a cota piezométrica nos nós de cota piezométrica fixa, pretende-se obter os valores de cota piezométrica, H_i, e vazão Q_{ij}, na rede que satisfaçam as equações (20 e 21).

O Método do Gradiente arbitra uma primeira distribuição de vazões nas tubulações, que não tem necessariamente que satisfazer as equações de continuidade nos nós. Em cada iteração do método, novas cotas piezométricas são obtidas resolvendo a seguinte matriz:

$$A \times H = F \quad (22)$$

Sendo:

A a matriz Jacobiana (N×N);

H o vetor (N×1) de incógnitas em termos de cota piezométrica;

F o vetor (N×1) dos termos do lado direito da equação.

Os elementos da diagonal da matriz Jacobiana são: diagonal, são:

$$A_{ii} = \sum_j P_{ij} \quad (23)$$

Por outro lado, os elementos diferentes de 0 fora da diagonal são:

$$A_{ij} = P_{ij} \quad (24)$$

Em que p_{ij} é o inverso da derivada da perda de carga total no trecho entre os nós i e j em relação à vazão, dado por:

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (25)$$

Cada termo do lado direito da matriz, o vetor F, é composto por uma parcela relativa ao balanço de vazão no nó, à qual é adicionado um fator de correção de vazão:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - C_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum p_{if} H_{if} \quad (26)$$

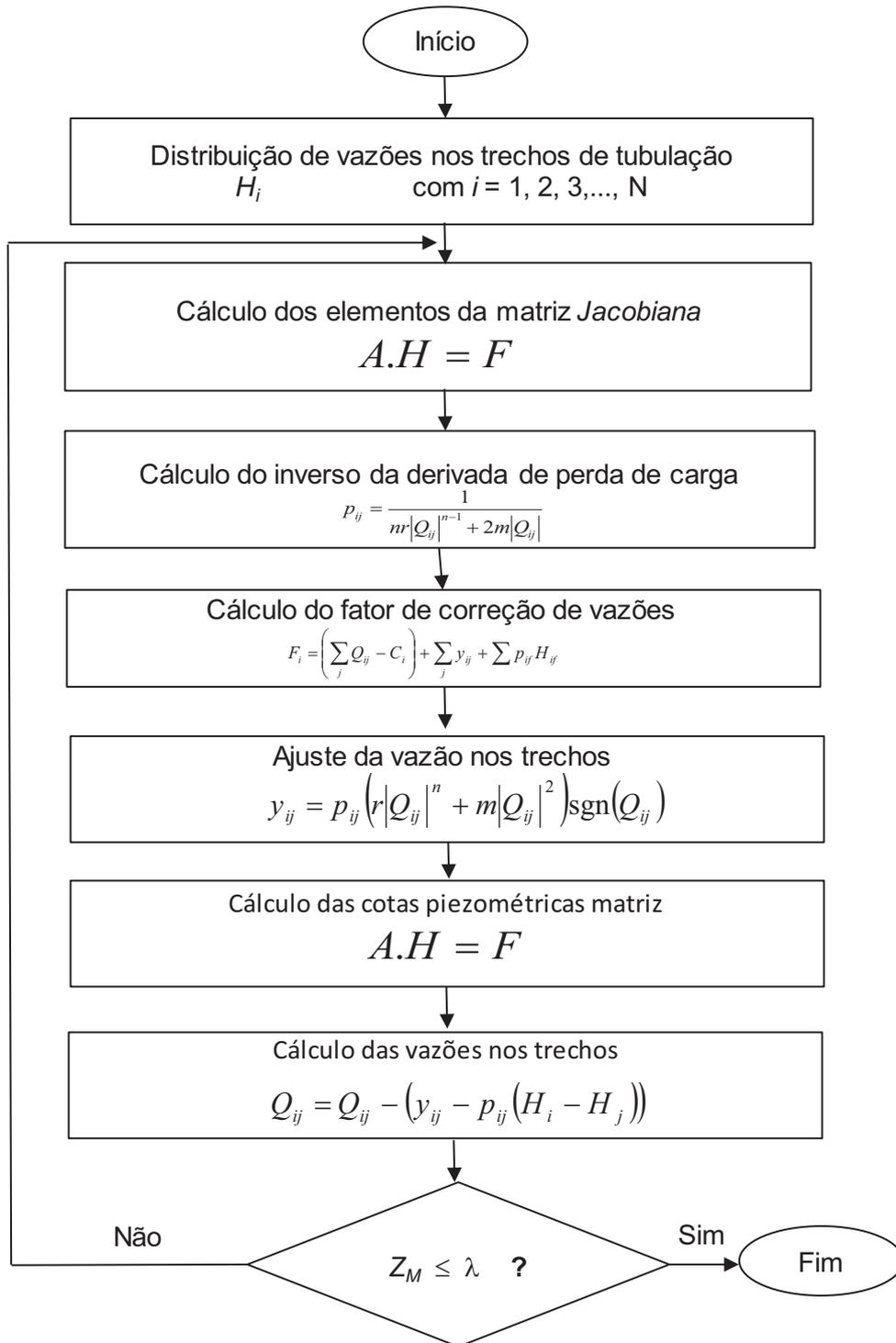
Sendo o último termo aplicável a quaisquer tubos que liguem um nó i a um nó f de cota piezométrica fixa e o fator de correção de vazão, y_{ij} , é dado pela seguinte expressão:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (27)$$

Onde:

$\text{sgn}(Q_{ij})$ é 1 se $Q_{ij} > 0$ e -1 caso contrário.

Figura 10: Fluxograma sumário do método do Gradiente à formulação das equações dos nós



Fonte: Autor 2015

Após terem sido calculadas as cotas piezométricas, resolvendo a Eq. (28), as novas vazões podem ser obtidas de acordo com a equação 28:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - p_{ij} (H_i - H_j)) \quad (28)$$

Se a soma de todas as variações de vazão (em valor absoluto), relativamente à vazão total em todos os trechos, for superior à tolerância especificada (por exemplo, 0.001), as equações (26 e 27) serão resolvidas novamente. A nova vazão calculada a partir da equação (28), satisfaz o princípio da continuidade das vazões nos nós, após a 1ª iteração (Rossman, 2002).

2.4 Simulação hidráulica

Pinto (2010) salienta que as simulações desenvolvidas com a construção de modelos, utilizam possíveis cenários de projeto para o sistema de distribuição que se pretende simular; que dentre os quais podemos citar a expansão de uma rede de abastecimento já existente, o estudo da qualidade da água, a calibração de modelos hidráulicos, entre outras aplicações.

Existem atualmente vários programas de modelagem computacional que permitem tais simulações, como o WATERCAD, EPANET, etc. O processo de escolha do programa de modelagem a ser utilizado deve considerar vários aspectos, tais como: custo, facilidade de utilização, operacionalidade e flexibilidade do programa, a robustez do modelo, a velocidade de processamento, componentes representados, à interface com o utilizador, às características do modelo de qualidade, à integração com bases de dados de CAD, SIG e SCADA e o apoio técnico do desenvolvedor bem como a disponibilidade de manuais de operação do programa.

No estudo desenvolvido o programa de simulação escolhido foi o Epanet 2.0, visto que além de atender as características citadas anteriormente, é possível desenvolver outras aplicações já que é um programa com o código aberto e permite adequações e operar com outros sistemas.

2.4.1 Simulador Hidráulico Epanet 2.0

Alves (2012) e Araújo (2005) informam que o simulador hidráulico Epanet foi desenvolvido no ano de 2000, por uma equipe da Environmental Protection Agency (USEPA), chefiada por Lewis Rossman, adaptado para a língua portuguesa pelo Laboratório

Nacional de Engenharia Civil (LNEC) em 2002.

O programa Epanet 2.0, mediante a definição da topologia da rede de distribuição, das características reais dos diversos componentes e dos consumos em cada nó, tem a capacidade de determinar os valores de vazão em cada trecho de tubulação, a pressão residual em cada nó a altura de água em cada reservatório e concentração de produtos químicos pela rede de distribuição, que não é objeto do estudo aqui desenvolvido, dentro do período de simulação, que poder ser pontual, chamado de estático, ou período estendido, chamado de dinâmico.

Rossman (2002) afirma que pode ser empregado em várias situações onde seja necessário realizar simulações de sistemas de distribuição de água, entre as quais:

Estabelecimento de cenários de projeto tais como expansão de uma rede existente.

Calibração de modelos hidráulicos.

Análise do decaimento do cloro residual e a avaliação dos consumos.

O Epanet possibilita a análise de alternativas de operação, de forma a permitir a melhoria da qualidade de água no sistema, através de:

Alterações na utilização de origens de água num sistema com múltiplas origens.

Alteração de esquemas de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável.

Utilização de tratamento adicional, como seja a recloração.

Seleção de tubulações para recuperação e substituição.

O Epanet fornece um ambiente integrado em Windows para editar dados de entrada da rede, efetuar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos. Estes últimos incluem a possibilidade de visualizar mapas da rede com codificação a cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e gráficos de isolinhas (Rossman, 2002).

Segundo Rossman (2002), as ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, disponibilizadas pelo Epanet, têm como características mais relevantes:

Dimensão ilimitada de elementos da rede.

Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning.

Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, mudanças de diâmetro.

Modelação de bombas de velocidade constante ou variável.

Cálculo da energia consumida por conjuntos moto bomba e do respetivo custo com consumo de energia.

Modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão.

Modelagem de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas através de curvas de volume em função da altura de água.

Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo.

Modelagem da relação entre pressão e vazão efluente de dispositivos emissores (consumos dependentes da pressão, pontos de vazamento).

Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição, ou em controles com condições múltiplas.

2.4.2 Modelagem de Vazamentos de Água

As demandas totais horárias podem ser determinadas através da mensuração continua das vazões disponibilizadas para o setor de distribuição estudado. Essas demandas são formadas por duas parcelas. A primeira o consumo efetivo que se refere a parcela da vazão disponibilizada que é entregue aos usuários do sistema e pode ser estimado através da somatória dos consumos micromedidos, A segunda parcela é a que se refere aos vazamentos existentes no trecho e que é concentrado no nó, com índice i , como mostrado na equação 29.

$$D_i = q_{c,i} + q_{v,i} \quad (29)$$

Em que:

D_i = demanda total total no ní i ;

$q_{c,i}$ = consumo efetivo no nó i ;

$q_{v,i}$ = consumo de vazamento no nó i

O simulador EPANET 2.0 para o cálculo das vazões totais afluentes ao nó considera as vazões efetivamente consumidas pelas economias abastecidas e as escoadas em um dispositivo do tipo emissor, que hidraulicamente é tratado como um orifício com características próprias.

A modelagem dos dispositivos do tipo emissores é feita através de uma tubulação fictícia que liga o nó a um reservatório fictício. A carga hidráulica no reservatório fictício corresponde à cota no nó (Araujo,2005).

Deste modo, a vazão obtida através de uma tubulação fictícia corresponde à vazão associada ao dispositivo emissor que é a vazão perdida através do vazamento modelado. Os dispositivos emissores são utilizados também para modelar o escoamento em sistemas com aspersores e em outros usos específicos como o combate à incêndios

O uso destes dispositivos para simulação vazamentos em tubulações, será possível se o coeficiente de vazão do dispositivo emissor (C) e o expoente da pressão (β), para o vazamento que pode ocorrer em uma junta de tubo ou através de uma fissura, puderem ser estimados, a equação utilizada para este fim é apresentada na equação 30.

$$q_{v,i} = C_i \times (p_i)^\beta \quad (30)$$

Onde

$q_{v,i}$ equivale à vazão de vazamento no nó i ,

C_i coeficiente do dispositivo emissor no nó i ;

p_i representa a pressão no nó i ,

β é o expoente da pressão, cujo valor de laboratório para vazão de um orifício com saída para a atmosfera é da ordem de 0,5.

Os fatores característicos das redes de distribuição que afetam o coeficiente de vazão dos emissores (C_i) no nó i são material, ligações, idade, assentamento das tubulações, características do solo e tráfego.

Araujo (2005) afirma que a simulação numérica com a finalidade de retratar o comportamento hidráulico das redes de distribuição, tem sido cada vez mais utilizada devido a quantidade de programas de simulação e principalmente pela ampliação da capacidade

computacional dos equipamentos atuais. Pode-se verificar dois grupos de parâmetros na utilização dos simuladores, aqueles que não são modificados no processo de simulação, tais como diâmetro das tubulações, cotas topográficas dos nós e os que sofrem ajustes durante o processo de calibração, como vazão de distribuição e rugosidade dos nós .

A quantidade de água perdida por vazamentos é, sem dúvida, um parâmetro de difícil quantificação no processo de simulação, o que implica em um processo cuidado de distribuição das vazões ao longo dos nós da rede.

É salientado por Araujo (2005) que na maioria das redes reais de distribuição, o modelo apresenta uma descrição física da rede em conjunto com uma estimativa da distribuição espacial do consumo e uma medição da vazão que alimenta a rede modelada.

No caso do exposto acima, o posicionamento dos nós de consumo é conhecido, mas a vazão total de alimentação deve ser distribuída entre eles. Apesar da existência da micromedição, doméstica e de grandes consumidores, as informações geradas são raramente utilizadas para este fim.

Como os vazamentos, tanto em sua quantidade quanto em sua vazão, dependem dos valores de pressões, para a sua avaliação só podem considerados valores relacionados com a pressão resultante no nó. O National Water Council (1980) e Lambert et al., (1998), são sugeridos valores que variam de $1,8 \times 10^{-5}$ a $7,9 \times 10^{-5}$ l/s x m x (m c.a)^{1,18} – apresentando uma média de $5,1 \times 10^{-5}$ l/s x m x (m c.a)^{1,18}), os valores foram encontrados a partir de estudos efetuados em 20 concessionárias de serviços de água no mundo. As pressões das redes estudadas no levantamento apresentavam pressões médias diárias que variavam de 25 e 114 mca.

Os vazamentos em redes de distribuição de água são oriundos de pequenas aberturas, como orifícios, fissuras e trincas nas tubulações, que variam na quantidade perdida com as pressões existentes. Com o passar o tempo podem aumentar em volume pelos seguintes fatores: idade da rede, material, método de assentamento e novas alterações de pressão a que são submetidas as tubulações.

Araujo (2005), indica que do ponto de vista hidráulico e matemático, a estimativa de tais vazões é determinada através da lei dos orifícios que pode ser expressa pelo seguinte equacionamento:

$$q = c \times (p_i - p_o)^\beta \quad (31)$$

Onde:

q : representa a vazão através do orifício (m^3/s);

c : coeficiente de vazão cujo valor depende da forma e diâmetro do orifício;

p_i : pressão na entrada do orifício (mca);

p_o : pressão na saída do orifício (mca);

β : expoente cujo valor, segundo experiências em laboratório, é de 0,5.

Diversos pesquisadores adaptaram esta equação com o intuito de considerar as diversas características reais das redes de distribuição que serão apresentados em seguida:

Jowitt e Xu (1990) e Vairavamoorthy e Lumbers (1998), introduziram o comprimento das redes conectadas ao nó considerado, além do coeficiente c , passar a representar não mais as características dos orifícios mas sim as das tubulações das redes de distribuição.

$$q_{ij} = c_i \times L_{ij} \times \left(\frac{h_i - h_j}{2} \right)^{1,18} \quad (32)$$

Onde:

q_{ij} : vazamento no trecho de tubulação entre os nós i e j ;

c_i : coeficiente relativamente às vazamentos por unidade de comprimento para a pressão de serviço e que depende das características da rede, como idade e deterioração das tubulações e propriedades do solo;

L_{ij} : comprimento do trecho entre os nós i e j (m);

h_i : pressão no nó i (mca);

h_j : pressão no nó j (mca).

É sugerido por Jowitt e Xu (1990), a possibilidade de estimar o valor de c_i , através da vazão mínima noturna, tendo sido atribuídos os valores de 10^{-5} e $1,5 \times 10^{-5}$ l/s x m x (m c.a)^{1,18}, ao simularem duas redes com características diferentes.

Tucciarelli et al., (1999), introduz em seu equacionamento a consideração do número de tubulações que chegam até o nó estudado, cota topográfica do mesmo e a perda por área superficial da tubulação:

$$Q_i = (h_i - z_i)^\alpha \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} \times D_{ij} \times \theta_{ij} \times L_{ij} \quad (33)$$

Onde:

Q_i : vazamento;

h_i : carga total no nó i (mca);

z_i : cota topográfica (m);

α : expoente de perda de carga;

M_i : total de tubulações que chegam ao nó i;

D_{ij} : diâmetro da tubulação no trecho entre o nó i e j (m);

θ_{ij} : taxa de vazão por unidade de superfície da tubulação entre o nó i e j (L/s x m²);

L_{ij} : comprimento do trecho entre i e j (m).

Não é feita referência ao método utilizado para a estimativa de θ_{ij} .

São sugeridas por Martinez et al., (1999) duas equações com o mesmo propósito das anteriores, a primeira (34) expressa a parcela do vazamento correspondente às tubulações fisicamente representadas na rede modelada e a equação (35) para as tubulações não consideradas e cujos consumos estão concentrados nos nós da rede, como os ramais de ligação de água:

$$q_{2,i} = c_2^s \times \left[\sum_{t=1}^T Q_{c,i} \right] \times p_i^\beta \quad (34)$$

Onde:

c_2^s : coeficiente relativamente aos vazamentos por unidade de comprimento para a pressão de serviço e que depende das características da rede, como idade e deterioração das tubulações e propriedades do solo e para um particular sector da rede;

T: total de períodos simulados;

$Q_{c,i}$: consumo total no nó i (L/s);

P_i : pressão no nó i (mca);

β : expoente da pressão no nó i e cujo valor usual é de 1,18.

Estes autores são pouco precisos na descrição do procedimento, para determinar o valor de c_2^s .

Já Alonso et al., (2000), utiliza a seguinte expressão:

$$q_j = K_j \times p_j^{1,18} \quad (35)$$

Onde:

q_j : equivale à vazão de vazamento no nó j (L/s);

p_j : pressão associada à vazamento do nó j (mca);

K_j : corresponde ao coeficiente de vazamento determinado para cada nó j e permanece constante para todo período simulado.

O valor de K_j é estimado é descrito em Martinez et al., (1999').

Em dois estudos desenvolvidos por Ainola et al., (2000) e Ainola et al., (2001) as equações (32) e (33), foram generalizadas e reescritas assumindo a seguinte forma:

$$q_{ij} = c \times \alpha_{ij} \times L_{ij} \times (p_{ij})^\beta \quad (36)$$

Onde:

q_{ij} : vazamento no trecho de tubulação entre os nós i e j (L/s);

L_{ij} : comprimento do trecho entre os nós i e j(m);

β : expoente cujo valor usual é de 1,18;

c : coeficiente de vazamento para toda a rede;

α_{ij} : coeficiente, que é função do diâmetro, idade e material do trecho de tubulação e propriedades do solo;

p_{ij} : refere-se às pressões médias ao longo do trecho de tubulação e é dado por:

$$p_{ij} = 0,5 \times (H_i - z_i + H_j - z_j) \quad (37)$$

ou

$$p_{ij} = 0,5 \times (p_i + p_j)$$

Através da modificação das equações (36) e (37), os mesmos autores chegaram a equação para a estimativa da vazão de vazamento:

$$q_{ij} = (0,5)^\beta \times c \times \alpha_{ig} \times L_{ij} (p_i + p_j)^\beta \quad (38)$$

Se for considerado que os vazamentos sejam carregados nos nós terminais, têm-se:

$$q_{ij} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (39)$$

Onde:

q_{ij} : vazamento no trecho de tubulação entre os nós i e j (L/s);

Q_{ij} : vazamento no nó i provocada pelo trecho que liga este nó com o nó j (L/s);

Q_{ji} : vazamento do nó j, provocada pelo trecho que liga este nó com o nó i (L/s).

As vazões de vazamentos podem ser distribuídas pelos nós terminais proporcionalmente às pressões nos nós chegando-se as seguintes equações:

$$Q_{ij} = (0,5)^\beta \times c \times \alpha_{ij} \times L_{ij} \times p_i \times (p_i + p_j)^{\beta-1} \quad (40)$$

$$Q_{ji} = (0,5)^\beta \times c \times \alpha_{ji} \times L_{ji} \times p_j \times (p_j + p_i)^{\beta-1} \quad (41)$$

Deste modo, o volume total de vazamentos no nó i é dado por:

$$Q_i = c \times Q_i^* \quad (42)$$

Onde:

$$Q_i^* = \sum_{j=1}^{N_i} (0,5)^\beta \times \alpha_{ij} \times L_{ij} \times p_i \times (p_i + p_j)^{\beta-1} \quad (43)$$

Sendo:

N_i o total de trechos ligados ao nó i .

O coeficiente α_{ij} pode ser estimado pela seguinte equação:

$$\alpha_{ij} = \theta_{ij} \times \gamma_{ij} \times (1 + \delta_{ij} \times \lambda_{ij}) \times D_{ij} \quad (44)$$

Onde:

θ_{ij} : coeficiente de localização do trecho;

γ_{ij} : coeficiente de material do trecho;

Δ_{ij} : coeficiente que depende da idade da tubulação;

λ_{ij} : idade do trecho (anos).

Finalmente, foi possível ser estabelecido pelos pesquisadores uma relação de proporcionalidade para c , como se apresenta em seguida:

$$c = \frac{k}{\sum_{i=1}^M Q_i^*} \quad (45)$$

Onde:

k : equivale ao volume total de vazamentos;

M : total de números de nós existente na rede.

Outros pesquisadores como Ulanicka et al., (2001) apresentam uma formulação onde existe uma proporcionalidade entre a demanda total e a vazão de vazamento, determinada através de um coeficiente de vazamento em cada nó, α_i , da forma mostrada na equação 46.

$$q_{l,i} = \alpha_i \times p_i^{1,1} \quad (46)$$

onde:

q_{li} : representa a vazamento para o nó i (L/s);

p_i : pressão no nó i (mca);

α_i : fator de vazamento para o nó i.

O coeficiente de vazamento em cada nó é determinado pela seguinte relação mostrada na equação 47:

$$\alpha_i = \beta \times d_i \quad (47)$$

onde:

α_i : fator de vazamento para o nó i

β : coeficiente constante

d_i : representa a demanda total no nó i (L/s).

É dito por Araujo (2005) que estes pesquisadores determinaram a meia-noite como o instante do valor de referência que melhor representa o fator de vazamento estimado e que permanecerá constante para os restantes intervalos de tempo da simulação. O total da vazão de vazamento é calculado pela seguinte equação:

$$Q_l = \sum_i \beta \times d_i(24) \times p_i^{1,1}(24) \quad (48)$$

Onde:

Q_l : representa a vazão total de vazamento no intervalo l (L/s);

$d_i(12)$: corresponde ao consumo à meia-noite para o nó i (L/s);

$P_i(12)$: corresponde e pressão à meia-noite para o nó i (mca).

Explicitando-se o coeficiente β , tem-se:

$$\beta = \frac{Q_l}{\sum_i d_i(12) \times p_i^{1,1}(12)} \quad (49)$$

Onde o fator de vazamento passa a ter o seguinte valor:

$$\alpha_i = \beta \times d_i(12) \quad (50)$$

O consumo ou demanda efetiva em cada nó i , para cada intervalo de tempo t , é dado pela seguinte equação:

$$\bar{d}_i(t) = d_i(t) - \alpha_i \times p_i^{1,1}(t) \quad (51)$$

O simulador, disponibilizado no modelo Epanet considera as perdas de água devido aos vazamentos nas tubulações, associando a cada nó da rede, um coeficiente emissor (c), na forma apresentada na equação (30), que possui o mesmo significado que o coeficiente de vazamento (K_j) na equação (35) e, que neste trabalho, passará a ter o mesmo significado e representação igual a K_f) e um expoente (β) relativamente às pressões nos nós.

Fica evidenciado nos métodos apresentados a dependência do vazamento em relação aos valores de pressão, excetuando-se este parâmetro, pode-se notar a utilização de diversos outros a depender do pesquisador, o que indica que ainda não há um consenso a respeito do método mais apropriado.

2.5 Algoritmos Genéticos

Na operação rotineira de um sistema de distribuição de água é frequente nos depararmos com a necessidade de tomada de decisões, sem poder garantir que a possível decisão tomada seja a mais adequada para a situação apresentada, isto é extrair o maior benefício possível.

Ao processo de busca da melhor opção operacional, chamamos de otimização, tal processo de busca está presente na natureza e é comprovada pela teoria da Seleção Natural e de Adaptabilidade de Charles Darwin, baseadas nessas teorias foram desenvolvidas técnicas de computacionais para otimização de sistemas no mundo real.

É dito por Ribeiro (2005), que essas técnicas desenvolvidas foram denominadas por algoritmos genéticos e as mesmas foram desenvolvidas por Holland (1975) e posteriormente consolidadas por Goldeberg (1985) e Davis (1985).

Filitto (2008) comenta que a evolução genética se dá nos elementos responsáveis pela codificação dos seres vivos, que são os cromossomos; neles são codificadas as estruturas bem-sucedidas que vão se reproduzir mais vezes. Nas várias reproduções podem ocorrer

mutações nos cromossomos dos filhos, o que ocasiona características diferentes entre os pais e filhos.

Para Araujo (2005) os algoritmos genéticos são uma alternativa aos métodos clássicos de otimização e que não deve ser confundido com uma técnica de busca de máximos e mínimos, tal como os demais métodos meta-heurísticos. Por não utilizar o cálculo de derivadas, atuando diretamente na busca das soluções no espaço viável, é classificado como método direto ou de ordem zero.

Para Goldeberg (1994), os algoritmos genéticos são eficientes e robustos na utilização em busca irregulares, multidimensionais e complexas e podem apresentar as seguintes características:

Não requerem derivadas.

Operam numa população de pontos.

Trabalham de forma representativa dos parâmetros (normalmente representação binária);

Utilizam somente regras probabilísticas (não-determinísticas).

Para cada elemento da população de indivíduos, requerem informação apenas sobre o valor de uma função de aptidão (função-objetivos).

2.5.1 Terminologia e Conceitos Fundamentais dos Algoritmos Genéticos (AGs)

Em seguida são listadas as principais definições citadas por Araujo (2005), relacionadas com os AGs.

Cromossomo – É uma cadeia de caracteres que representa alguma informação relativa às variáveis do problema e cada solução para o problema proposto é representada, deste modo, por cada cromossomo.

Gene – definido como a unidade básica do cromossomo, que representa uma variável do problema, cada conjunto de genes forma um cromossomo.

População – definido como o conjunto de cromossomos ou soluções.

Número de Geração – total de vezes que o Algoritmo Genético é executado.

Operações genéticas – operações realizadas pelo Algoritmo Genético sobre cada cromossomo.

Espaço de busca ou região viável – intervalo de procura da possível solução para o problema apresentado.

Função-objetivos ou de aptidão (*fitness*) – função que se pretende otimizar e que contém a informação numérica do desempenho de cada cromossomo na população. As características do problema devem estar representadas de modo que permita ao AG realizar os seus objetivos, que normalmente pode ser expresso por:

$$\text{Otimizar } J = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Onde:

x_1, x_2, \dots, x_n são as variáveis a serem determinadas pelo algoritmo para otimizar J .

2.5.2 Representação e Codificação

É dito por Araújo (2005), que é necessário caracterizar os genes agrupados em cromossomos, a forma mais simples de realizar a caracterização é a binária. Nela, cada dígito (0 e 1), representa um gene, e um conjunto de genes um cromossomo, cada cadeia completa de cromossomos, representa uma solução do problema.

A adoção da representação binárias para as variáveis do problema, pode ter grande impacto na velocidade na obtenção de uma solução, o cuidado que se deve tomar quando da simplificação é não perder informações importantes que possam prejudicar os resultados obtidos (Araujo, 2005).

2.5.3 Geração da População Inicial

É indicado por Goldeberg (1989) que a geração inicial deva ser criada a partir da criação de números aleatórios, estes caracterizando a variável que se pretende buscar a otimização, e em seguida transformados em valores binários, os novos indivíduos darão origem aos demais através de cruzamento e mutação.

Não há regras claras para a definição do tamanho da população. No entanto, Goldeberg (1989) sugere que, para problemas muito pequenos, pode usar-se uma população com 20 elementos, sendo recomendado chegar até os 1000 elementos, para problemas com muitas variáveis. De um modo geral, muitos pesquisadores sugerem, como ordem de grandeza, cerca de 100 elementos.

2.5.4 Seleção

Araujo (2005) indica que o primeiro passo é selecionar na geração de descendentes as soluções que cumprem as condições impostas e em seguida, se os valores buscar a aproximação da função-objetivo correspondente ao ótimo pretendido.

A reprodução deve favorecer probabilisticamente os indivíduos melhor adaptados, isto é, seja que mais se aproxime do ótimo pretendido. Normalmente, segundo Araujo (2005), este objetivo é conseguido usando-se uma “roleta viciada”, onde cada indivíduo da população é representado proporcionalmente ao seu índice de aptidão, exemplo mostrado na Figura 11. A forma mais comum de determinar as probabilidades de seleção de cada indivíduo poderia ser determinada pela seguinte fórmula:

$$p_i = \frac{f_i}{n \times \bar{f}} \quad (52)$$

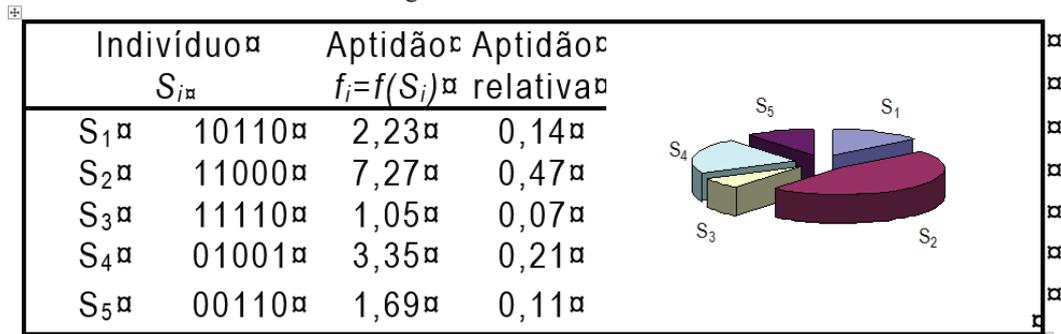
Sendo:

p_i : probabilidade de seleção individual;

f_i : valor da função-objetivo para cada indivíduo;

n : tamanho da população.

Figura 11: Método da Roleta



Fonte: Araújo (2005)

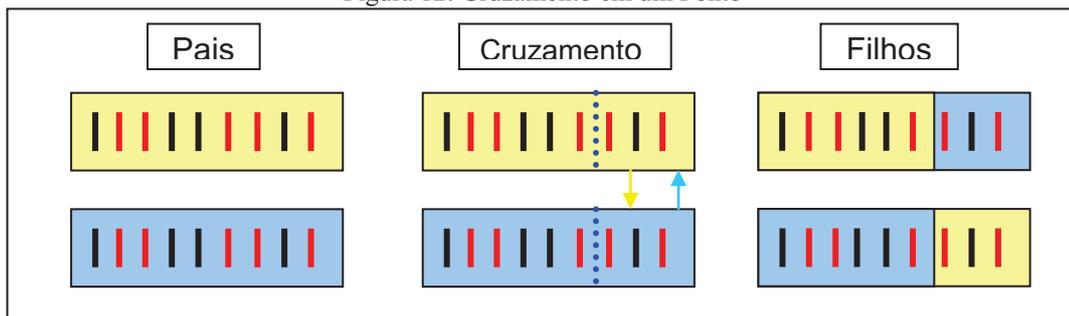
2.5.5 Cruzamento

O cruzamento consiste na seleção de pares de cromossomos entre os indivíduos de população e a troca de material genético entre os cromossomos selecionados, o que permite misturar os genes de cada série dando origem aos “filhos”.

Segundo Araujo (2005) não há uma forma rígida de realizar este processo. No entanto, o procedimento mais comum é eleger ao acaso uma ou duas posições na cadeia de dígitos do grupo considerado “pais” e permutar os genes a partir desta posição. A probabilidade de cruzamento (p_c) indica qual a taxa ou probabilidade de ocorrência do cruzamento entre os indivíduos selecionados na população, que usualmente varia entre 0,5 e 0,95. Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão criadas, acelerando o processo de convergência, mas também maior é o risco de se perderem bons indivíduos.

A Figura 12 mostra um exemplo de cruzamento entre dois cromossomos a partir da posição 6. Os “filhos” substituirão os “pais” na nova população.

Figura 12: Cruzamento em um Ponto



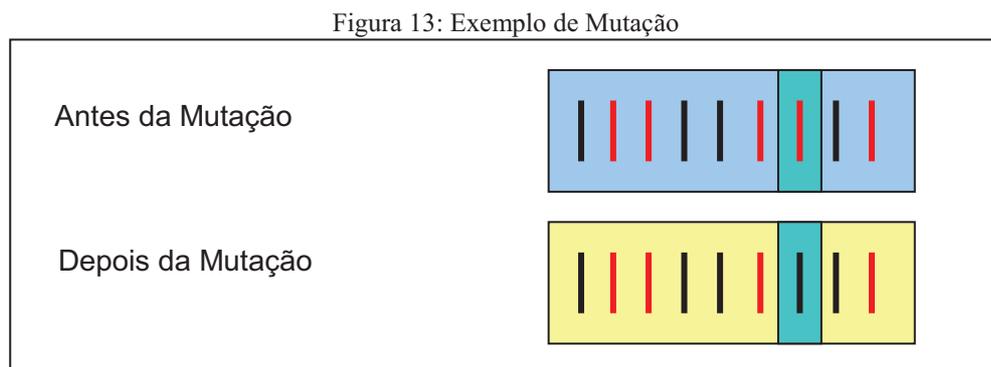
Fonte: Araújo (2005)

2.5.6 Mutação

Na natureza ocorrem mutações que apresentam uma baixa taxa de ocorrência que na maioria das vezes são letais. Contudo podem contribuir para a diversidade genética. Araujo (2005) informa que nos AGs a mutação terá a função de diversificar com a mesma incidência que ocorre na natureza, ou seja, baixa ocorrência.

É salientado por Araujo (2005) que o fundamento consiste em eleger ao acaso uma das i posições do indivíduo, modificando o valor do gene selecionado. Como nos casos anteriores, também se trata de um processo aleatório probabilístico fixado “à priori” pelo utilizador do AG.

Não há definição de critérios rígidos para fixar um valor da probabilidade de mutação p_m . É sugerido por De Jong (1975), como valor de p_m , igual ao inverso do tamanho da população. A Figura 13 exemplifica uma mutação.



Fonte: Araujo (2005)

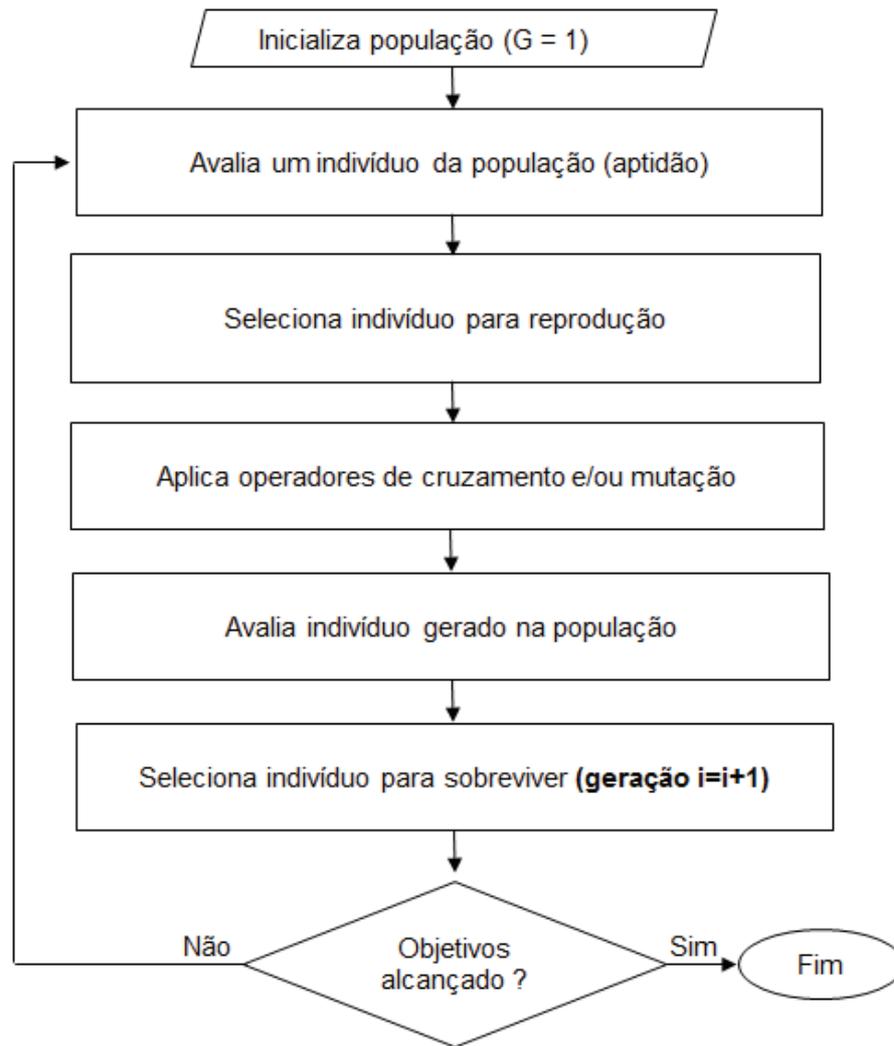
2.5.7 Estruturas

É colocado por Barbosa (1996) a existência de duas formas mais usuais dos algoritmos que são chamadas:

Algoritmo Genético “genérico”, no caso desses algoritmos, temos somente as aplicações do cruzamento e da mutação, os chamados operadores convencionais.

Na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, é apresentada uma representação esquemática do funcionamento deste tipo de algoritmo.

Figura 14: Fluxograma Algoritmo Genético Genérico

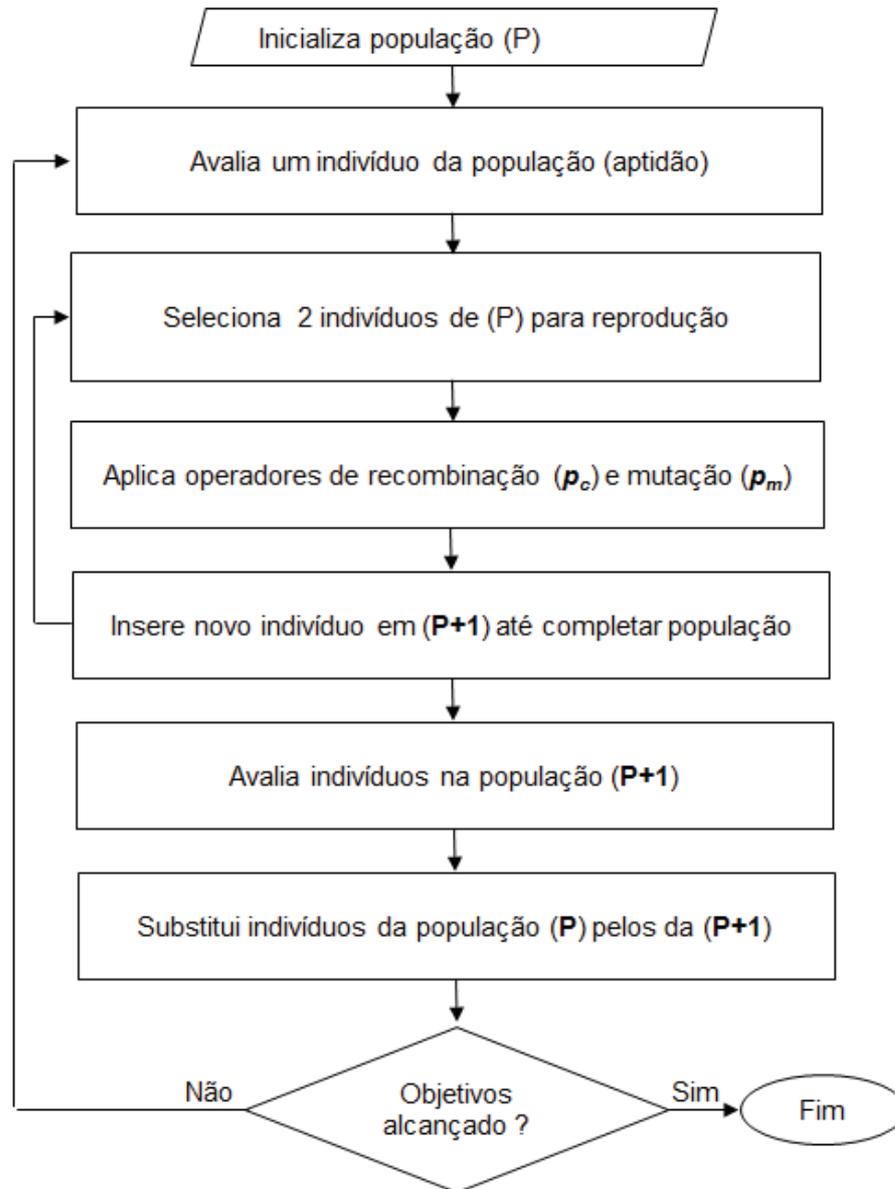


Fonte: Adaptado de Castro, 1999

O outro tipo de Algoritmo Genético é o chamado “geracional”, quando se é aplicado, em um sistema, temos toda a população substituída por novos elementos gerados pelo processo de seleção e aplicação dos operadores: citados anteriormente. . Os “pais” são totalmente substituídos pelos “filhos”, o que pode contribuir para a perda de bons indivíduos. Para evitar o comprometimento por esse inconveniente utiliza-se a técnica do “Elitismo”, ou seja, preservam-se os melhores elementos de uma geração passando diretamente para a próxima geração.

Na Figura 15, vê-se uma representação esquemática do funcionamento deste tipo de algoritmo.

Figura 15: Fluxograma Algoritmo Genético Geracional



Fonte: Adaptado de Castro, 1999

2.5.8 Indicadores de Desempenho dos AGs

A melhoria da qualidade de vida das pessoas através da garantia e da promoção da saúde pública é a principal função dos sistemas de abastecimento de água. É mencionado por Coelho (1999) que os sistemas no intuito de atingir essa meta evoluíram, de tal modo com o

passar do tempo registra-se uma alteração do conceito de prestação de um bom serviço de abastecimento de água.

Essa evolução, segundo Coelho e Alegre (1999) e Araujo (2005) pode ser dividida nas seguintes fases:

- a) Quantitativa, em que a tarefa principal era a satisfação das necessidades biofísicas;
- b) Qualidade, onde objetivos culturais, organolépticos e psicológicos se juntaram aos anteriores;
- c) Excelência, que procura acrescentar aos estágios anteriores a vertente do desenvolvimento sustentável em termos sociais, económicos e ambientais.

Para ser possível expressar em que nível de qualidade se encontra a prestação de serviços às populações atendidas pelas diversas concessionárias, foram elaborados indicadores de desempenho. Os mesmos podem também se prestar à aferição do desempenho hidráulico, econômico, financeiro e ambiental.

A metodologia apresentada em Coelho e Alegre (1999), para a avaliação do desempenho hidráulico de sistemas de distribuição de água é baseada na escolha de indicadores de desempenho em que são consideradas as características próprias da rede e utilizam parâmetros de valores de mínimos e máximos para propriedades ou variáveis do sistema de distribuição que possam ter seus parâmetros operacionais alterados, com vistas à otimização.

Na Figura 16 é mostrado um exemplo de curva, no caso da variável pressão, apresentada por Araujo (2005), que possui grande influência sobre as quantidades de perdas físicas.

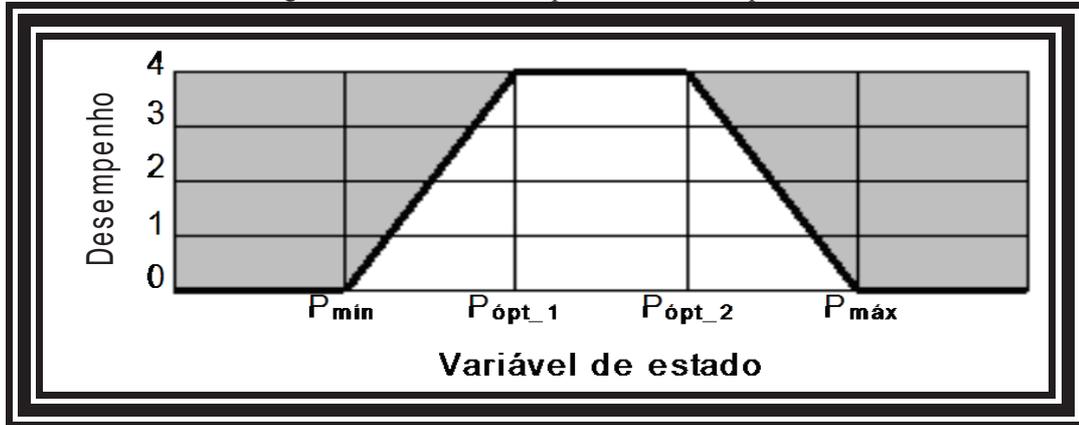
É possível construir uma curva de desempenho que busca estabelecer uma relação entre os valores da variável e atribuir também uma escala de desempenho desta mesma variável, o que permite ao técnico estabelecer valores que representem o melhor ponto de operação de determinado parâmetro operacional. Pode-se utilizar a escala proposta por Coelho (1999), que é mostrada a seguir:

4 = serviço ótimo;

3 = adequado;

- 2 = minimamente aceitável (no limiar da aceitabilidade);
 1 = inaceitável;
 0 = ausência ou interrupção de serviços;

Figura 16: Curva de desempenho da variável pressão



Fonte: Araujo (2005)

O indicador é calculado a partir de um operador que agregue espacialmente os valores elementares, da variável de controle, que permita obter valores globais para a totalidade do sistema ou para um dado subsistema de abastecimento, indicando a performance da alternativa simulada. É definida por Araujo (2005), uma função de agregação, conforme exemplo da equação (53), que possa representar a importância de cada elemento, relativamente ao sistema como um todo:

$$P = W[pm_i] = \sum_{i=1}^N (w_i \times pm_i) \quad (53)$$

Onde:

P : valor global do desempenho;

pm_j : desempenho em cada elemento i ;

w_i : peso de cada elemento, de acordo com:

$$w_i = \frac{z_i}{\sum_{i=1}^N z_i} \quad (54)$$

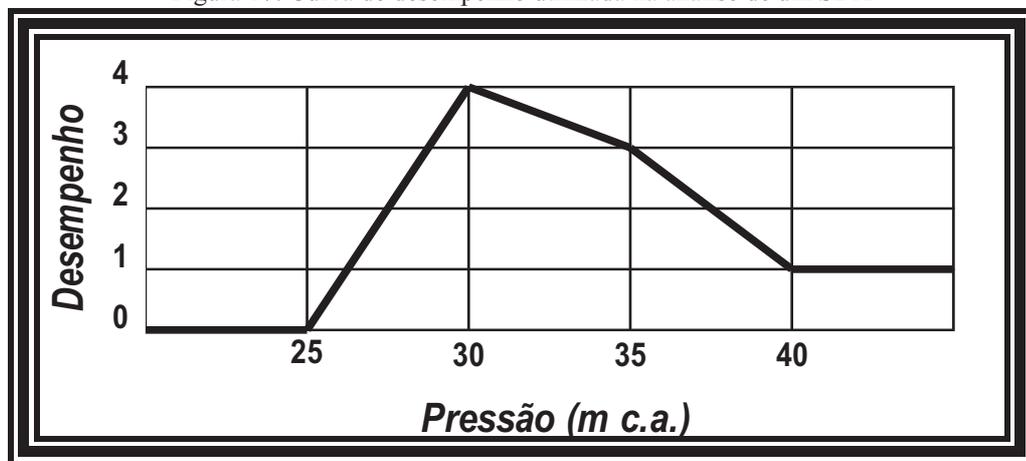
Sendo:

z_i : elemento i utilizado;

É citado por Araujo (2005) que para potencializar a utilização do método desenvolvido no que diz respeito às informações a serem analisadas, deve-se construir gráficos que expressem a variação do parâmetro durante as 24 horas de operação do Sistema de Distribuição de Água (SDA), simulando dinamicamente que expressem a variação do parâmetro durante as 24 horas de operação do Sistema de Distribuição de Água (SDA), simulando dinamicamente.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** tem-se a representação da curva de desempenho utilizada na análise de um sistema de distribuição de água (SDA).

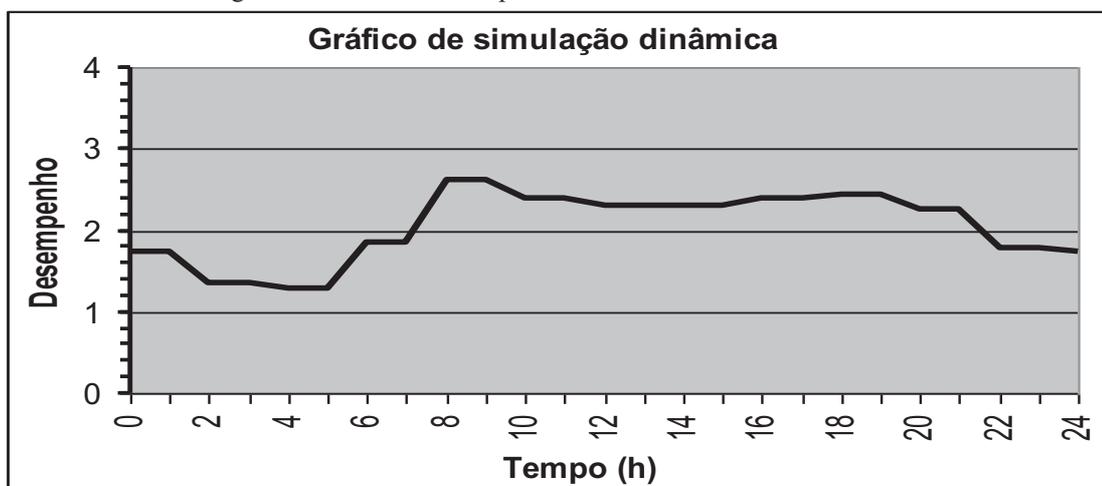
Figura 17: Curva de desempenho utilizada na análise de um SDA



Fonte: Araujo (2005)

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o desempenho global resultante da simulação dinâmica (em período estendido) do mesmo sistema.

Figura 18: Curva de desempenho utilizada na análise de um SDA

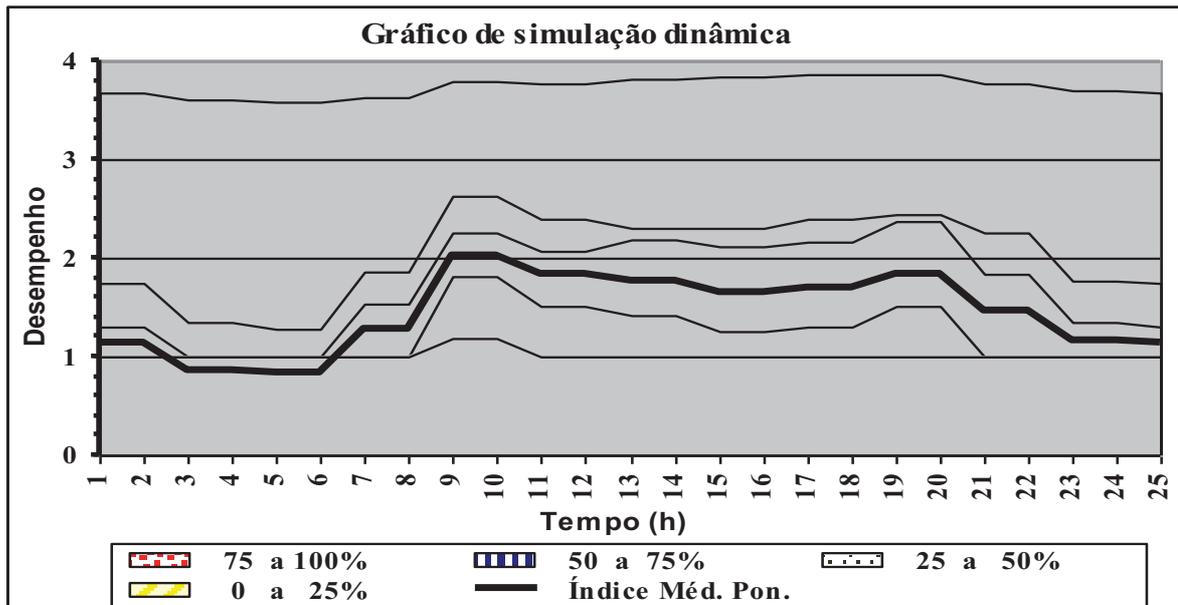


Fonte: Araujo (2005)

O gráfico de desempenho apresentado na figura 18, não permite a análise de desempenho de forma individual dos nós de consumo. Para permitir a análise, Coelho (1999),

indica a utilização de gráfico em forma de curvas de percentis. Araujo (2005), apresenta um exemplo de aplicação, mostrado na figura 19 para percentis de 25% e que deve ter a seguinte leitura: se (t, y) são as coordenadas de um dado ponto da curva de percentil $P\%$, isto significa que no instante t , o percentual da variável que é distribuída com desempenho inferior ou igual a y é $P\%$.

Figura 19: Curva de desempenho utilizada na análise de um SDA



Fonte: Araujo (2005)

A análise do gráfico permite concluir, utilizando-se a escala de Coelho (1999):

- Para consumos entre 75 e 100% do consumo total, o serviço apresenta um conceito entre ótimo e minimamente aceitável;
- Para consumos entre 50 e 75% e entre 25 e 50% do consumo total, verifica-se que o serviço prestado tem um conceito entre minimamente aceitável e inaceitável;
- Para consumos entre 0 e 25% do consumo total, pode dizer-se que, o serviço é inaceitável em praticamente a totalidade da duração da simulação.

2.6 Construção dos Modelos de Redes

Alves (2012), coloca que a construção de um modelo consiste na introdução de informações que expressem o máximo possível a realidade das redes fisicamente existentes. A informação a ser gerada pela simulação estará mais ou menos próxima às grandezas reais mensuradas na rede quanto mais exata estiver esta representação. Para isso deve-se considerar:

- a) A topologia, geometria, altimetria e características que possam vir a influenciar o comportamento hidráulico das tubulações e outros equipamentos.
- b) As variações à quais estará submetido o sistema, que são influenciadas principalmente pelas demandas do local, bem como pela sua distribuição espacial e temporal.
- c) As regras operacionais que são utilizadas para a operação do sistema modelado.

2.6.1 Descrição Física do Sistema

Coelho et al., (2006), afirma que os elementos físicos a serem considerados na construção do modelo são tubulações, válvulas, sejam estas de controle ou somente de isolamento, bombas, reservatórios, incluindo as coordenadas e cotas topográficas dos nós, que geram o traçado das redes e respectiva topologia da rede

Os dados de cadastro compõem a informação de base para a construção de um modelo. Podem estar armazenados sob diversas formas, desde o formato numérico, em papel, ou com a utilização de programas de computador do tipo CAD (*Computer-Aided Design*) ou em SIG (Sistema de Informações Geográficas). Este último consiste na combinação entre o formato gráfico e um conjunto de dados de cadastro estruturados e armazenados numa base de dados.

Segundo Coelho et al., (2006), são considerados três métodos para a geração dos dados da infraestrutura física no modelo, que serão tratados a seguir.

2.6.2 Método de Geração Manual dos Dados

Alves (2012), indica que o processo mais simples e usual de geração de dados da rede física existente para a construção de um modelo é o manual. Coelho et al., (2006), enfatiza que devem ser levados em consideração para a construção do modelo as tubulações, válvulas, sendo estas de seccionamento ou de controle, com os devidos pontos de operação e também as coordenadas geográficas para referenciar as cotas de terreno dos nós.

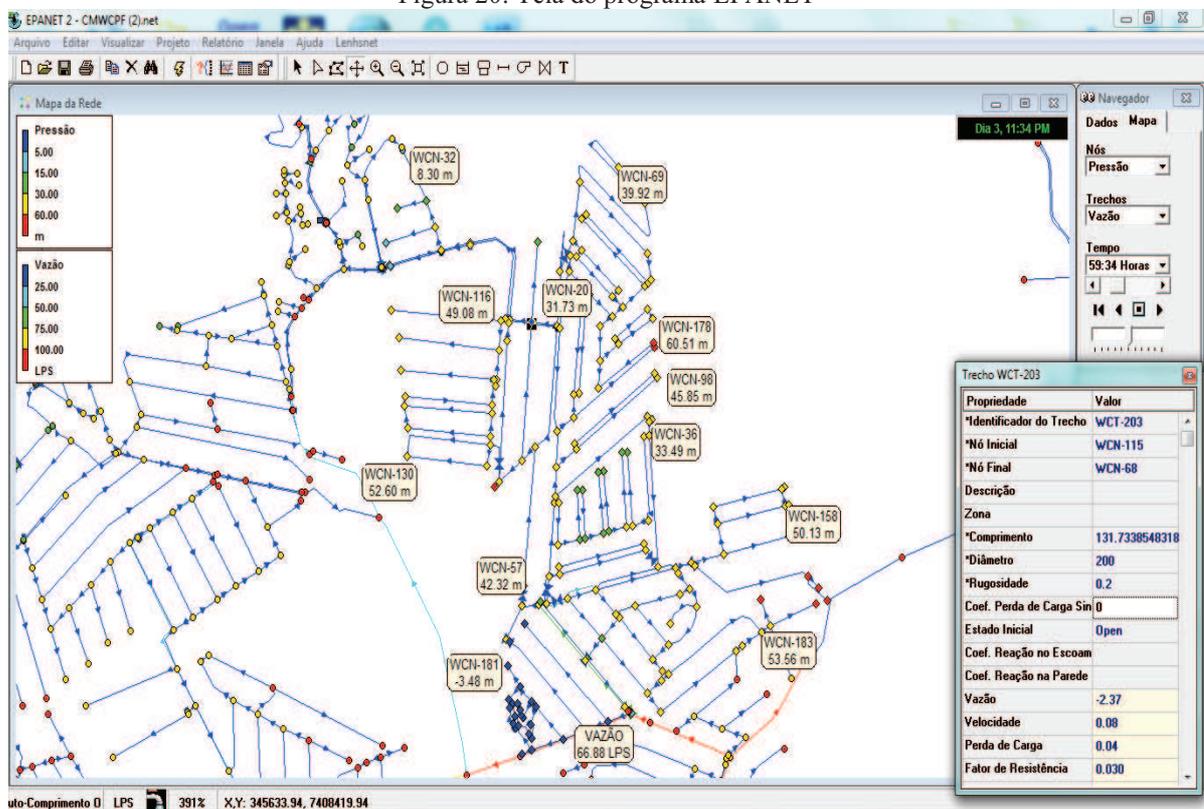
Na primeira versão de um modelo não é necessário que contenha a totalidade das informações do sistema de distribuição, já que de acordo com Coelho et al., (2006), o processo de validação de um modelo bem calibrado é iterativo.

É enfatizado por Alves (2012) a relevância de se saber o estado de funcionamento das válvulas operadas no sistema, já que a condição fechada induz um sentido obrigatório do escoamento nas tubulações. A importância se torna maior se o modelo a ser construído for destinado a apoiar as ações de operação e manutenção.

No programa de simulação a construção de um modelo, com os dados levantados, é uma tarefa simples e intuitiva, já que são semelhantes as interfaces gráficas dos programas de modelagem e dos programas de CAD.

Os elementos do modelo são criados a partir de bibliotecas existentes ou barras de ferramentas e dispostos graficamente na tela do programa. É possível criar, parametrizar e editar modelos muito rapidamente, especialmente quando não envolvem um grande número de nós e tubos. Na Figura 20, é mostrado um exemplo de tela do programa EPANET, com modelo construído.

Figura 20: Tela do programa EPANET



Fonte: Programa EPANET (ZMC Wilson Celestino).

2.6.3 Método de Geração dos Dados a Partir de Cadastros em CAD

A utilização do software do tipo CAD é uma das soluções disponíveis no mercado e bastante utilizadas pelas concessionárias de serviços de saneamento para construção de execução de desenhos de cadastro, onde são lançadas as representações gráficas de tubulações, peças e válvulas do sistema de distribuição de água.

Alves (2012) e Coelho et al., (2006), salientam que os desenhos da infraestrutura em CAD não são normalmente criados com a intenção de serem utilizados em um modelo de simulação. Os mesmos autores relatam ainda a necessidade de uma consideração maior em relação ao traçado, de forma a estar o mais próximo possível da realidade existente, o que reduz a necessidade de correções e alterações no modelo.

O traçado da rede que é obtido a partir de um desenho em CAD deve passar por um módulo para ser convertido de forma que os programas de simulação possam interpretar seus atributos, sendo que essa conversão se limita às tubulações e nós, Os demais elementos tais como válvulas, bombas e reservatórios devem ser inseridos mais tarde, utilizando o próprio software de simulação.

2.6.4 Método de Geração dos Dados a Partir de um SIG

Os sistemas de informação geográfica (SIG), segundo Alves (2012), são cada vez mais utilizados como o principal repositório da informação referente à infraestrutura física e mesmo ao seu funcionamento e utilização.

Quando completamente implementados, o SIG de sistemas de abastecimento de água contém uma grande parte da informação que é necessária para em um modelo de simulação, descrever as tubulações e grande parte das válvulas em termos não só topológicos (conectividade de tubos e nós), mas também geométricos (diâmetros e comprimentos de tubulação, diâmetros de válvulas) e altimétricos.

Coelho et al., (2006), menciona que o SIG, pode ainda incluir diversas outras informações a respeito das tubulações e das singularidades existentes, tais como: material, idade, histórico de manutenções e outros elementos que possibilitam uma estimativa do

coeficiente de rugosidade, fundamental para a tradução do comportamento hidráulico, bem como de parâmetros importantes para a simulação de qualidade de água.

Os dados extraídos a partir de um sistema SIG, no formato que permita serem lidos por um simulador, permitem a geração de uma grande quantidade de informação, o que garante maior flexibilidade que no caso dos desenhos CAD.

2.6.5 Consumos e Vazões

Todo sistema de abastecimento de água tem por finalidade atender as necessidades de consumo de água e às perdas reais de água que acontecem em todas as tubulações que formam o SDA. Alegre (1986) e Coelho (1990), informam que o consumo humano de água, por diferentes tipos de consumidores, tem um comportamento estocástico, variando no tempo e no espaço e se constituem na maior fonte de incerteza associada a um modelo. A estimativa dos consumos é a tarefa mais difícil e costumeiramente mais trabalhosa no desenvolvimento de um modelo de simulação hidráulica.

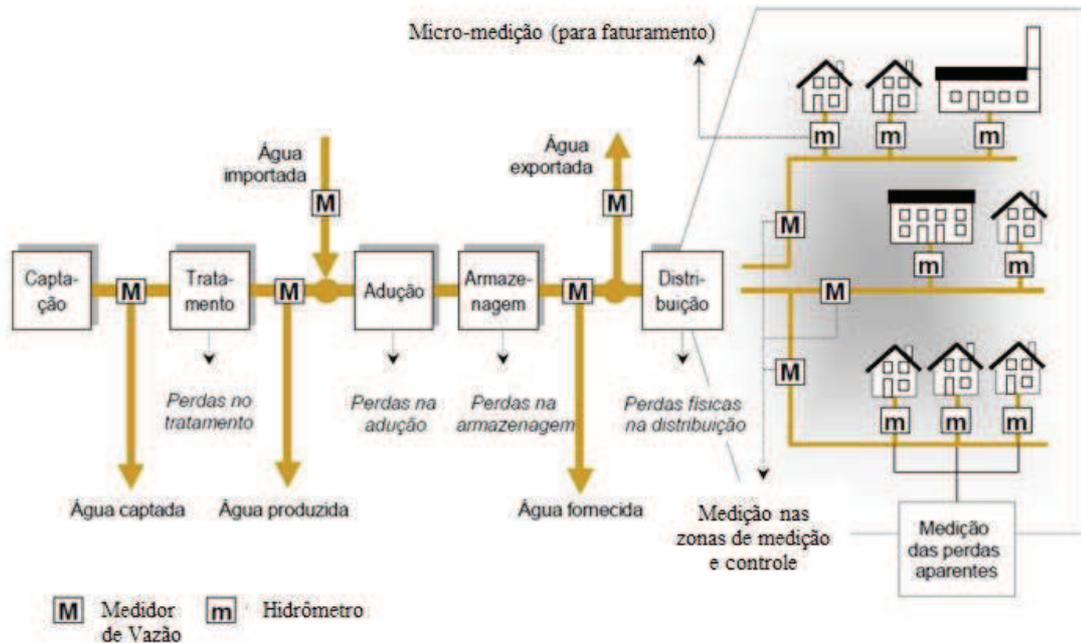
Coelho et al., (2006), novamente coloca que o consumo em uma rede de distribuição abrange o consumo humano (doméstico, comercial, industrial, as utilizações públicas de água para rega de espaços verdes ou lavagem de ruas, e as restantes utilizações autorizadas, bem como eventuais utilizações não autorizadas) e as perdas de água devidas a vazamentos nas diversas partes do sistema e à eventuais extravazamentos de reservatórios. Deve-se ter um cuidado especial na obtenção das estimativas de consumos, e adotar métodos de quantificação e distribuição desses consumos nos nós da rede de forma a permitir a atualização permanente dos consumos.

Dentre as diversas ações operacionais na operação de um SDA, uma das mais importantes é correta mensuração dos volumes disponibilizados ao longo do tempo. Além de permitir controlar os volumes perdidos de água, permite a melhora na gestão através do aumento da capacidade de análise e de gestão da oferta de água.

O cálculo adequado dos balanços hídricos é essencialmente feito com os dados de volumes e vazões captados, produzidos, aduzidos, armazenados e distribuídos pelo SDA em uma ZMC.

Na Figura 21, são identificados os pontos de medição mais importantes dentro de sistema de distribuição de água.

Figura 21: Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água, com os componentes do balanço hídrico e localização dos pontos de medição de vazão



Fonte: Adaptado de Coelho et al., 2006.

2.6.6 Quantificação e Distribuição de Vazões de Consumo

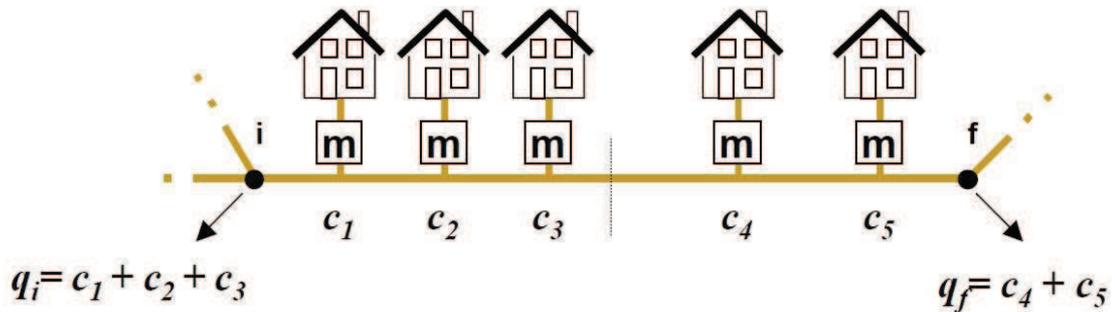
A quantificação e distribuição dos consumos e sua respectiva distribuição espacial, pela rede física a ser modelada, é um dos problemas essenciais que se coloca na fase de construção do modelo de simulação. A seguir serão descritas algumas das formas habitualmente utilizadas para a espacialização ao longo da rede, bem como a sua variação temporal.

É dito por Alves (2012) que embora os consumos estejam distribuídos ao longo das tubulações, através dos ramais de ligação domiciliar, e de forma análoga as perdas reais de água se distribuíam da mesma forma, emprega-se os modelos de simulação a concentração do consumo, nos pontos que delimitam as redes, que denominamos nós.

Em Coelho et al., (2006) é utilizada a Figura 22, para demonstrar como se processa a distribuição dos consumos, sendo c_1 a c_5 os consumos que se verificam nos ramais domiciliares que são ligados ao longo da tubulação, e q_i e q_f são os consumos acumulados nos

nós i e f , que delimitam a tubulação. Os consumos c_1 a c_3 são atribuídos ao nó i , uma vez que estão mais próximos deste, enquanto os consumos c_4 e c_5 são atribuídos ao nó f .

Figura 22: Atribuição dos consumos na tubulação aos nós inicial e final (a linha a tracejado marca o ponto médio da tubulação)

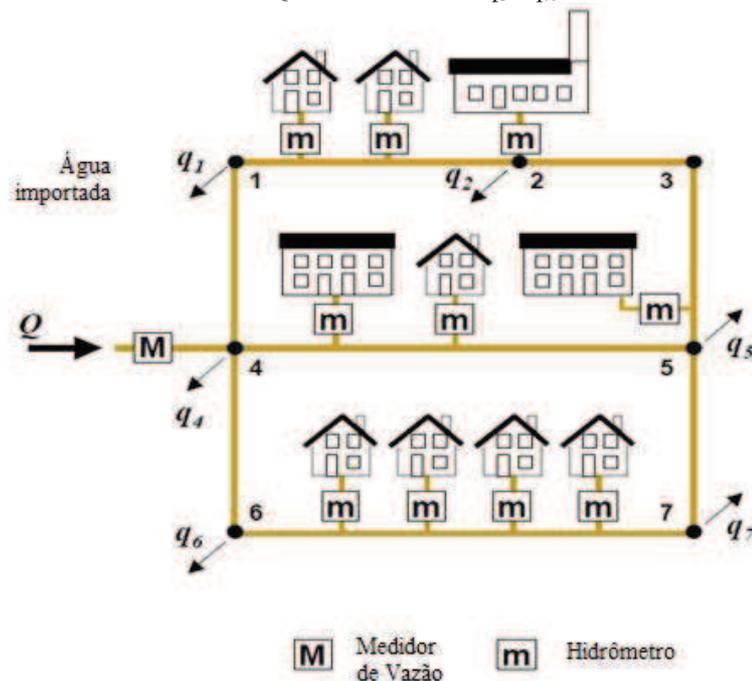


Fonte: Adaptado Coelho et al., 2006.

O procedimento normal de especificar os consumos num modelo de simulação consiste em atribuir a cada nó um valor nominal, também designado por consumo-base. O consumo-base representa o consumo acumulado no nó.

Como se ilustra na Figura 23, a vazão total fornecida à rede é Q e os consumos-base nos nós 1 a 7 são q_1 a q_7 . O nó 3 não possui consumo-base, uma vez que os comprimentos de tubulação que lhe são adjacentes não há qualquer consumo. O nó 2 tem um consumo ligado diretamente ao nó, trata-se de um grande consumidor, onde é necessário a individualização do consumo base.

Figura 23: Vazão total fornecida Q e consumos-base $q_1 - q_7$, em uma rede de distribuição



Fonte: Adaptado de Coelho et al., 2006.

2.7 Erros e Incertezas de medição (macro e micromedição)

Vicentini (2012), cita que na física experimental é possível separar os erros em duas categorias: erros sistemáticos e erros estatísticos. Os primeiros guardam relação com a calibração ou ajustes errôneos dos equipamentos de medição ou a adoção de procedimentos incorretos de calibração ou ainda falha conceitual. O tratamento para eliminação dos mesmos consiste na adequada calibração e utilização do equipamento.

Já os erros ditos estatísticos, são os causados por variações aleatórias e incontroláveis dos instrumentos de medidas e condições externas, que dentre as quais podemos citar a temperatura, unidade do ar, etc.

Os dados que compõem o balanço hídrico e os valores calculados a partir deles, possuem erros e incertezas. Essas componentes devem ser quantificadas e levadas em conta para a elaboração de plano de ações na gestão das perdas de água, segundo Lambert (2010), este é um procedimento aceito pela IWA.

Vicentini (2012) afirma que medidores bem aferidos e adequadamente dimensionados, geralmente tem uma faixa de variação de precisão entre $\pm 0,5\%$ à $\pm 2\%$, para mais ou para menos. A precisão é definida pelo Inmetro (2012), como o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas e controladas. A precisão de medição é geralmente expressa numericamente por características como o desvio-padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições especificadas de medição.

Cabe também salientar que não basta aferir e dimensionar bem os medidores, mas também deve se ter um cuidado especial na fase de instalação dos medidores, já que pequenos detalhes como alinhamento das tubulações, distâncias de singularidades, problemas de aterramento, podem comprometer em muito a precisão dos medidores.

Os erros do macromedidores devem ser periodicamente avaliados, e os resultados devem ser incorporados à matriz do Balanço Hídrico, deduzindo ou agregando volumes aos valores medidos encontrados Thorton, et al., (2008).

As avaliações dos erros e determinação da incerteza são realizadas através da instalação de medidores do tipo *pitot*, em série com o medidor que se pretende. O tubo *pitot* instalado deve estar em perfeito estado e devidamente calibrado e com sua incerteza conhecida.

Os valores medidos pelo *pitot* são comparados com os valores registrados pelo macromedidor e se necessário são feitas correções dos coeficientes dos medidores.

Como citado anteriormente, uma das formas de se realizar a distribuição dos consumos nos nós de um modelo de simulação é através da micromedição. Os micromedidores ao longo do tempo perdem precisão, o que pode comprometer os quantitativos de vazão a serem distribuídos.

Além de poder afetar a distribuição dos consumos para a determinação inicial da vazão de perdas, deve-se subtrair os valores de consumo noturno, que ocorre na hora da vazão mínima noturna. Caso a submedição seja elevada e não conhecida afetará de forma significativa os resultados das simulações realizadas.

O grau de imprecisão dos hidrômetros deve ser estabelecido com base em testes de uma amostra aleatória representativa do parque de hidrômetros. A composição da amostra deve refletir as diversas faixas etárias dos hidrômetros, a categoria da economia e princípio de medição.

O tamanho da amostra assim como o procedimento de ensaio está previsto na NBR 15538/14. O procedimento é chamado de IDM (Índice de Desempenho da Micromedição), através dele é possível estimar a submedição dos volumes micro medidos, o que permite estimar as perdas por esta componente.

2.7.1 Avaliação das Incertezas dos Resultados

As grandezas componentes do balanço hídrico, deverão ter calculadas suas incertezas a partir das incertezas dos dados de utilizados para o cálculo das componentes do balanço hídrico.

É dito por Alegre et al (2005) que a depender da operação algébrica a ser executada para o cálculo do valor da componente a incerteza final poderá ser calculada das seguintes equações:

Para as operações de adição e subtração o resultado é igual a soma geométrica das incertezas absolutas das parcelas expressas pelos seus respectivos desvios padrão.

$$\sigma_C^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 \quad (55)$$

É salientado ainda por Alegre et al (2005) que são observadas importantes propriedades provocadas pelo fato do cálculo das incertezas para adição e subtração serem calculadas da mesma forma:

A primeira que a incerteza relativa do resultado é menor no caso das somas do que nas subtrações;

Ao se fazer somas, a incerteza propaga-se no sentido de uma redução em relação à incerteza das parcelas;

Quanto às subtrações, a incerteza propaga-se em sentido de um aumento em relação à incerteza das parcelas.

No caso do produto e divisão a incerteza é calculada através da soma geométrica dos desvios padrões das incertezas relativas aos valores médios das medições, como mostra a equação:

$$\sigma_C^2 / \bar{C} = \sigma_A^2 / \bar{A} + \sigma_B^2 / \bar{B} \quad (56)$$

Novamente Alegre et al (2005) observa que a incerteza calculada para as operações de multiplicação e divisão se propagam da mesma forma, ou seja aumentam nos dois casos.

2.8 Testes de Rede

De acordo com Coelho et al., (2006) os testes de rede são um conjunto de práticas aplicadas em função da utilização a ser dada ao modelo, destinadas a recolher informação dos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água que permitam a calibração de modelos.

Os testes consistem em proceder fechamentos seletivos de áreas menores das ZMCs, que são denominadas áreas de manobra, as grandezas de controle, vazão e pressão são medidas e registradas antes e depois dos fechamentos

Além dos equipamentos de medição permanente que possam existir no local a ser modelado, deve-se utilizar, equipamentos portáteis para os vários pontos da rede de

distribuição do setor, quantidade e localização dos pontos a terem suas grandezas mensuradas é uma função das necessidades de calibração do modelo.

O tipo de testes mais comuns são os testes de perda de carga, os testes de vazão de incêndio e o teste de bombas (Coelho et al., 2006).

2.9 Calibração de modelos

A etapa que se segue será a de calibrar o modelo construído, conseguindo com isso que o modelo seja não somente uma boa representação em termos físicos (diâmetros, cotas, etc.), mas que o seu comportamento esteja igualmente o mais próximo possível do que se pode encontrar na realidade (Pinto, 2010).

Araújo (2005), indica que a calibração é o processo de ajuste do modelo de distribuição de água às características reais e operacionais de um sistema de distribuição existente. Pode ser feita de forma contínua ou periódica, pode indicar o estado de conservação das redes e também prever o funcionamento futuro das mesmas, tais como a evolução das perdas de carga com o envelhecimento das tubulações e quais problemas podem ocorrer com a evolução desse processo, ou o impacto de novos empreendimentos.

O modelo calibrado, segundo Coelho et al., (2006) e Alves (2012) deverá obedecer a um determinado grau de exatidão. Este pode ser definido como a diferença entre os valores das grandezas calculados pelo modelo e os valores medidos das grandezas diretamente na rede de distribuição.

O grau de exatidão dependerá dos objetivos de utilização do modelo. Alguns dos fatores que influenciam no grau de exatidão são o tempo e recursos disponíveis e o próprio processo de calibração, o que o grau de exatidão a ser atingido é uma função própria de cada modelo e de cada processo (Alves, 2012).

Coelho et al., (2006), salientam que deve manter-se sempre presente o princípio-base de que o esforço de calibração correto é essencialmente uma função dos objetivos da análise. A tolerância a admitir para a diferença entre os valores modelados e os valores medidos de qualquer grandeza não poderá ser inferior à precisão de medição do aparelho com o qual foram mensuradas as grandezas a serem calculadas.

Alegre (1986) e Walski et al., (2003), colocam que a calibração dos modelos permite satisfazer os seguintes objetivos:

Estabelecer o grau de exatidão do modelo.

Adquirir ou aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento do sistema, a sua operação e o seu desempenho.

Descobrir e eliminar erros nos dados ou falhas no conhecimento do sistema.

Araújo (2005) diz que a calibração é um passo importante para confiabilidade dos valores obtidos nas simulações, eles podem diferir consideravelmente dos valores obtidos nas redes, podendo chegar a 40%, dos valores mensurados no campo. Uma questão que se coloca é como garantir que um determinado modelo esteja calibrado. Ainda não há consenso entre os diversos estudos desenvolvidos pelos pesquisadores.

Walski (1983), indica que a calibração de modelos de distribuição de água seja realizada em duas fases:

A primeira consiste na comparação das pressões e das vazões previsíveis com os observados das mesmas, para condições operacionais conhecidas do sistema em estudo, levando em consideração pontos de trabalho de bombas, níveis de reservatório, pontos de ajuste de válvulas se houverem.

A segunda consiste no ajuste dos dados de entrada, para que o modelo melhore a concordância entre valores observados e calculados. Deste modo, diz Walski (1983), um modelo será considerado calibrado, para um conjunto de circunstâncias operacionais de usos da água, se conseguir prever vazões e pressões com adequada precisão.

A fase de calibração muitas vezes permite identificar problemas no próprio sistema, tais como redes incrustadas, válvulas fechadas que deveriam funcionar abertas. Nunca deve ser desvalorizado um conjunto de dados de modelação racionalmente construídos sem colocar a hipótese de algo imprevisto ou desconhecido possa ter ocorrido (Araújo, 2005).

Para Araújo (2005) os erros da calibração podem ser entendidos como as discrepâncias entre os resultados do modelo e a realidade observada, os quais podem ter diversas origens, como os dados físicos do sistema, as suas solicitações e as suas condições operacionais.

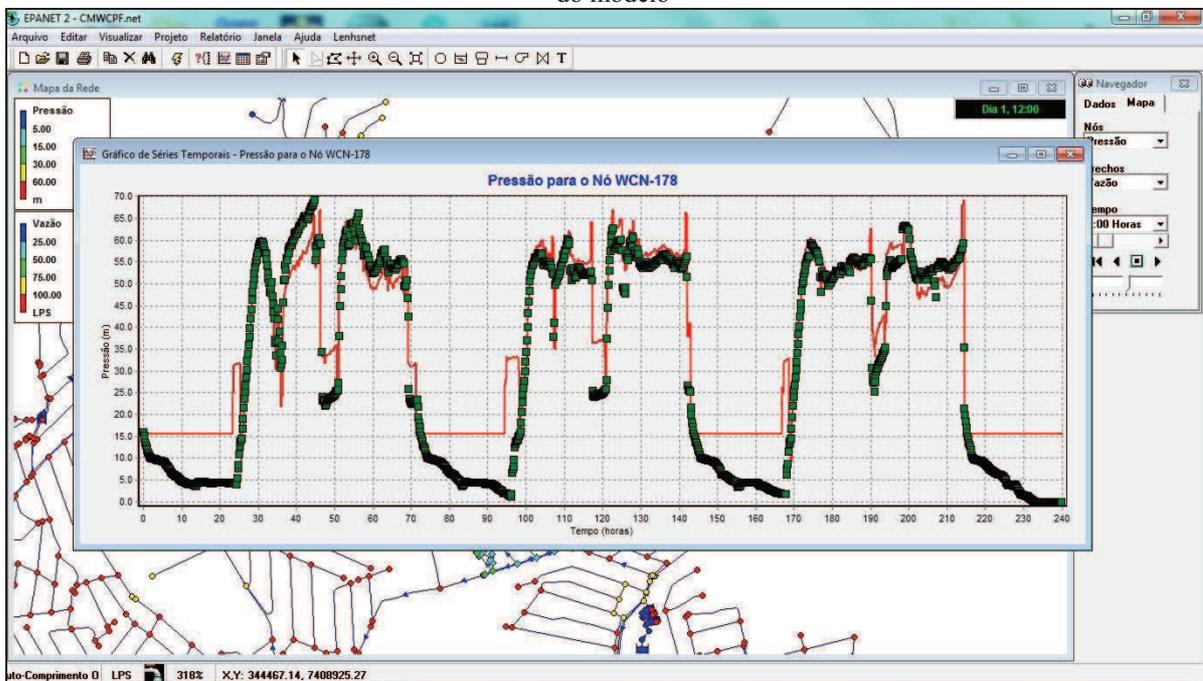
Alves (2012), coloca que a calibração hidráulica de um modelo é o processo de ajuste dos valores das grandes fontes de incerteza (rugosidade das tubos e consumos nominais nos nós) nos dados iniciais, até ser obtida a concordância de valores de pressão e vazão. Além

destas, podem existir outras fontes de erro ou de incerteza nos dados de entrada de um modelo, que também contribuem para as maiores discrepâncias entre resultados do modelo e medições na rede, as quais constituem um potencial parâmetro de calibração, tal como o diâmetro nominal e diâmetro interno, os registros de cadastro, os erros de conectividade, a simplificação da rede e os níveis e condições de operação de reservatórios e instalações elevatórias.

Alves (2012) salienta ainda que se deve fazer um cruzamento entre resultados que são fornecidos pelo modelo e resultados provenientes de medições realizadas na rede física existente. Isto resulta que quanto maior a quantidade de medições que forem obtidas no sistema físico melhor será o processo de calibração.

Os resultados da calibração do modelo são mostrados na Figura 24, onde a linha em vermelho apresenta os resultados determinados pelo modelo e a linha verde os valores mensurados em campo; pode ser feita em relação a diversos aspectos: consumo; carga hidráulica; pressão; qualidade; vazão e velocidade.

Figura 24: Calibração de pontos na rede de distribuição pontos verdes, dados de campo e linha vermelha valores do modelo



Fonte: Extraído do software Epanet pelo autor.

2.9.1 Medição de parâmetros para calibração de modelos

Alves (2012) e Araújo (2005) indicam que a realização de medições de campo deverá obedecer a um planejamento, no sentido de se determinar o que medir, quando, onde e sob que condições realizarem as medições. Para a execução das medições devem ser levados em conta os custos de equipamento e de mão de obra, e o fato de que ainda obrigar a cortes do abastecimento ou alterações ainda que temporárias na rede, para tal devem-se minimizar os prejuízos aos consumidores e à operação normal das redes de distribuição.

2.9.1.1 Medição de pressão

Segundo Coelho et al., (2006) a medição de pressões fornece dados fundamentais para calibração de modelos, devido ao ganho de sensibilidade, e resolução de variados problemas operacionais. A pressão é um dos principais indicadores de desempenho operacionais no dia-a-dia de um sistema de distribuição, refletindo-se diretamente na qualidade do serviço prestado ao consumidor.

Outra característica apontada por Coelho et al., (2006), é seu menor custo e maior simplicidade, em relação a medição de vazões. Ainda que os dois tipos de medida não constituam alternativa uma à outra, o conhecimento das pressões em determinados pontos da rede ajuda muito a verificar se as vazões resultantes da modelagem apresentam grandes divergências às vazões verificadas no sistema distribuidor.

A medição de pressão pode ser feita em vários pontos de acesso às tubulações desde pontos feitos exclusivamente para esta finalidade até em torneiras de ramais de ligação de água.

Os principais tipos de instrumentos de medição são os transdutores de pressão ou manômetros, podendo ser equipamentos portáteis ou fixos, analógicos ou digitais, com leitura instantânea apenas, ou com a capacidade de registo através de *datalogger* para posterior geração de gráficos e relatórios. Os equipamentos fixos podem ainda estar ligados à um sistema de tele medição e enviar através de rádio ou GPRS seus dados à distância para um sistema de controle operacional. Assim, pode-se ter um conjunto de medidores sincronizados de forma a obter dados em diversos pontos da rede para o mesmo período de tempo.

Os manômetros analógicos permitem somente a realização de medições instantâneas não sendo indicado para medições contínuas e parametrizadas

2.9.1.2 Medição de vazão

A medição de vazões num sistema de abastecimento de água é realizada através de medidores de diferentes tipos. Os medidores de vazão são equipamentos dispendiosos, que obrigam a um planejamento cuidadoso de sua localização. Os principais pontos de medição são em entradas e saídas de reservatórios, estações elevatórias, e entradas e saídas de sistemas, subsistemas e setores de abastecimento, incluindo as zonas de medição e controle de perdas. Para tal é necessário possuir um conhecimento aprofundado tanto das características dos equipamentos utilizados como das condições em que as medições são obtidas (Alves, 2012).

A determinação do tipo e da tecnologia de medidor de vazão, deve estar vinculada ao estágio do operador que controla o sistema de distribuição, já que diferentes tecnologias exigem características de qualificação de mão de obra, que nem sempre são fáceis de encontrar.

Outro fator a ser levado em conta é o dimensionamento, já que a depender do medidor quando da ocorrência de vazões baixas, principalmente da vazão mínima noturna, o erro de medição pode aumentar de forma exponencial (Conaut, 2013).

Os principais tipos de medidores disponíveis no mercado para as gamas de diâmetros normalmente utilizadas em sistemas de abastecimento de água são (Coelho et al., 2006):

Medidores mecânicos do tipo turbina ou Woltman ligados à um registrador mecânico;

Eletromecânicos, em que a rotação de uma turbina é eletronicamente convertida para valores analógicos ou de frequência;

Eletromagnéticos não-intrusivos, baseados na leitura das variações de um campo eletromagnético, produzindo valores analógicos ou de frequência;

Ultrassônicos não-intrusivos, estimando a vazão a partir do tempo de percurso de um sinal ultrassônico emitido transversalmente à tubulação, e produzindo valores analógicos ou de frequência;

Medidores de intrusão, eletromecânicos, eletromagnéticos ou ultrassônicos montados na extremidade de uma haste que é inserida na tubulação através de uma tomada em carga.

Os medidores ultrassônicos portáteis e os medidores de intrusão, embora mais dispendiosos, podem ser instalados e removidos com facilidade e sem necessidade de alterações na tubulação, pelo que permitem uma maior flexibilidade de utilização.

Quanto ao registro da vazão podem ser: data loggers e transmissores GSM, registradores e receberem o dado por pulso seco, ou através de corrente elétrica de 4 a 20 mA.

2.9.2 Processo de calibração

O processo de calibração de um modelo tem por base a comparação dos resultados da simulação com os dados obtidos em medição de campo, sendo um processo iterativo, cujos passos principais são repetidos até determinadas condições de aceitabilidade serem verificadas. Esta deverá sempre ser realizada em função dos objetivos a que se destina, e ter em consideração a qualidade dos dados utilizados para o construir (Alves 2012).

O conceito básico do processo de calibração consiste em verificar em diversos pontos da rede modelada os valores obtidos e compará-los com medições de campo obtidas, se a diferença for superior à tolerância de erro pré-estabelecida, são alterados alguns parâmetros hidráulicos ou de qualidade de água e novamente é simulado, até se obter os valores dentro da tolerância admitida inicialmente. Alves (2012) e Araújo (2005) informam que muito dificilmente, através de algoritmos de otimização, é possível obter uma calibração automatizada, sendo ainda objeto de estudos por parte de diversos pesquisadores.

Segundo Walski, (1995) e Cesario, (1995), a calibração de modelos é processo iterativo e sistemático e orientam a execução dos seguintes passos:

- a) Uso que se pretende dar ao modelo;
- b) Estabelecimento de cenários de simulação;
- c) Revisão das regras de operação e, se necessário, de outros parâmetros do modelo;

- d) Aquisição dos dados de calibração;
- e) Macro calibração;
- f) Análise de sensibilidade;
- g) Micro calibração.

Alves (2012), que a quantidade de iterações necessárias para se atingir bons resultados de calibração, varia com a topologia do sistema e o grau de exatidão requerido, sendo essa função do tipo de uso que se pretende fazer do modelo, o grau de complexidade do modelo e dos dados operacionais e da distribuição dos consumos.

Walski et al., (2003) afirma, que ao se comparar os resultados obtidos com uma simulação de um modelo calibrado, dificilmente os resultados obtidos irão coincidir com os valores medidos em campo em todos os pontos da rede. A resposta de um sistema físico e de seu respectivo modelo podem variar significativamente.

2.9.2.1 Sistemas com baixas velocidades de escoamento

Típico de muitos sistemas, devido à imposição de diâmetros mínimos, tendo como consequência a ocorrência de velocidades baixas resultando em perdas de carga pequenas. As redes destes sistemas são pouco sensíveis às vazões, logo não é muito relevante calibrar os coeficientes de rugosidade. A informação obtida é útil para verificar conectividade da rede, das condições de fronteira nos reservatórios e em pontos de abastecimento, ajustar alturas de elevação de bombas, ajustar pressões em VRP e verificar cotas do terreno. Como tal, pode concluir-se que em sistemas sobre dimensionados, não se justifica calibrar coeficientes de rugosidade e ou executar os testes de perda de carga (Coelho et al., 2006)

Coelho et al., (2006) e Alves (2012), observam que em sistemas com altas velocidades de escoamento as perdas de cargas que ocorrem nas tubulações, são sensíveis tanto à variação da rugosidade da tubulação quanto aos consumos dos nós. Neste caso os sistemas estão próximos de sua capacidade de transporte de água, o que possibilita a utilização de diferentes cenários de calibração. Os coeficientes de rugosidade devem ser os mesmos para grupos de tubulações e alterados em simultaneamente em todas elas.

2.9.3 Métodos de Calibração

Para Santos (2010), é possível classificar os procedimentos de calibração em três diferentes categorias:

- ✓ Iterativos;
- ✓ Explícitos, diretos ou analíticos;
- ✓ Implícitos ou inversos

2.9.3.1 Iterativos

De acordo com Silva (2003), tais procedimentos são baseados em tentativa e erro, onde os parâmetros de calibração são ajustados a cada nova iteração, através da comparação dos valores de pressão e vazão calculadas e medidas.

Walski (1983, 1986) aplicou tal método em redes de pequeno porte, com poucos trechos e nós, no ajuste das demandas e rugosidades, em geral para redes de pequeno porte (poucos nós e trechos), no ajuste do coeficiente de atrito e no ajuste das rugosidade e demandas.

É salientado por Santos (2010) que o procedimento iterativo é baseado no método da tentativa e erro a cada iteração com a finalidade de ajustar os valores medidos e calculados pelos

2.9.3.2 Método explícito

Na aplicação do método explícito, Silva (2003) cita alguns trabalhos relevantes e clássicos, podendo-se destacar os trabalhos de Boulos (1990), Boulos (1991).

Em seus estudos, Ormsbee (1986) criou um algoritmo de calibração explícito para aplicação em redes de água que busca o ajuste da rugosidade das tubulações e da demanda nos nós, o método teve seu desenvolvimento a partir do rearranjo das equações de conservação de massa e de energia e de equações adicionais do escoamento. A resolução das

equações é realizada com a utilização do método de Newton-Raphson para determinadas condições de operação.

Boulos (1990) e (1991) apresentou um método que permitia o cálculo de forma direta de parâmetros intervenientes de projeto, operação e calibração de redes, para isso introduziu equações adicionais, conservação de massa e energia, sendo necessário estabelecer restrições de valores de pressão e vazão. Na resolução desses sistemas foi utilizado o método de Newton-Raphson como procedimento de linearização dos termos não lineares.

É dito por Cheung (2001), que com a finalidade de generalizar a metodologia para diversas redes propôs melhorias nos métodos de calibração desenvolvidos por Walski (1983), Boulos (1990) e propôs algumas melhorias para o trabalho de Boulos (1990) como a inclusão de um simulador hidráulico proposto por Souza (1994).

Já Soares (2003) salienta que, o número de medidas de vazão e pressão a serem empregadas será o mesmo número de equações do sistema a serem resolvidas e igual ao número de parâmetros desconhecidos.

É observado por Santos (2010) que, assim como acontece para o procedimento inverso, que será visto a seguir, os modelos de calibração explícitos foram aplicados apenas em redes de pequeno porte da literatura. Silva (2003) afirma que algumas limitações dos procedimentos de calibração explícitos incluem o fato deles não avaliarem a confiabilidade dos parâmetros e necessitarem de um número de parâmetros estimados igual ao número de medidas.

2.9.3.3 Método inverso

Silva (2003) e Santos (2010) informam que o método inverso também chamado de método implícito consiste na minimização da diferença entre valores simulados e os valores correspondentes observados, através de otimização. Os resultados dos modelos de simulação hidráulica de redes são expressos, geralmente, em termos dos valores das variáveis de estado pressão e vazão, o método inverso é aplicado para a determinação dos parâmetros do sistema, tais como rugosidades, diâmetros, demandas, etc., de maneira a minimizar os desvios entre os valores observados e os correspondentes valores simulados das referidas variáveis.

2.9.4 Sistemas de Tele gestão.

Em razão das enormes extensões de redes de distribuição, válvulas e outros itens, operar um sistema de distribuição de água, se torna uma tarefa das mais difíceis, motivo pelo qual em diversos sistemas e principalmente em cidades menores, o empirismo orienta as ações de operação na rotina diária.

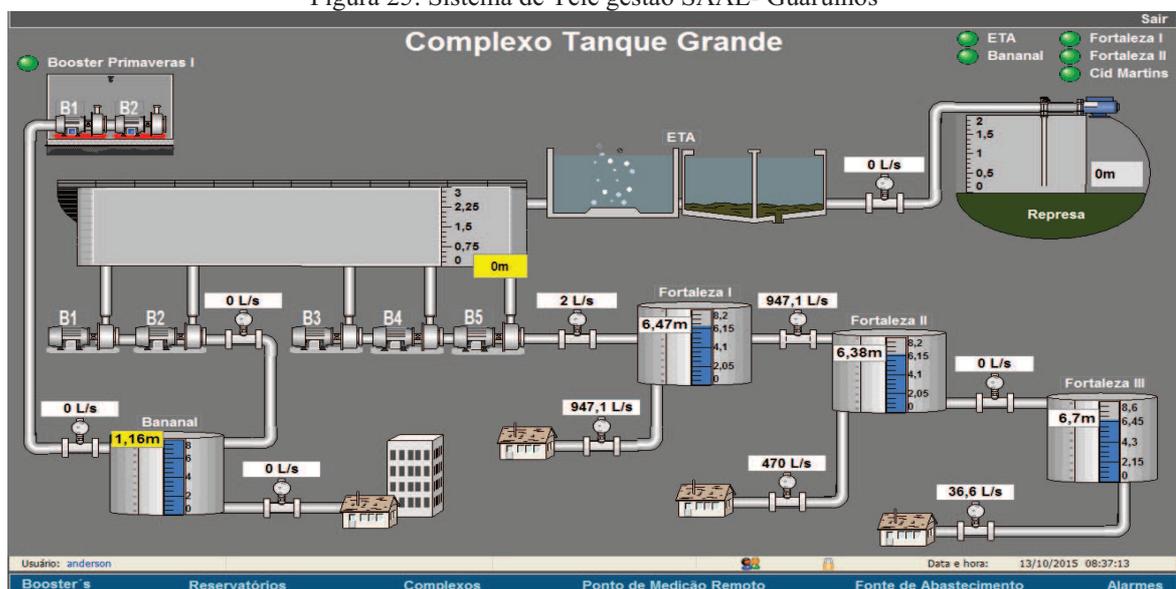
Segundo Souza (2003) os Sistemas de Tele gestão (na terminologia anglo-saxônica SCADA - *Supervisor Controle And Data Acquisition*) constituem atualmente de instrumentos essenciais para uma gestão eficaz dos sistemas de abastecimento de água. Com esta tecnologia é possível monitorar e manobrar remotamente as principais instalações hidráulicas que os constituem, permitindo melhorar a qualidade do serviço prestado e uma maior eficiência na sua gestão.

Os dados para esses sistemas são coletados por instrumentos distribuídos por todo sistema de distribuição de água, sendo que os principais instrumentos coletam as grandezas pressão e vazão.

Para a coleta dessas grandezas são utilizados transdutores de pressão e medidores de vazão, que podem ser: velocimétricos; ultrassônicos; eletromagnéticos.

Os dados coletados são gravados em um banco de dados, que pode estar incorporado ao supervisor de tele gestão ou ser exportado para um banco de dados corporativo, e pode ser mostrado em uma tela de sistema de tele gestão como mostrado na Figura 25.

Figura 25: Sistema de Tele gestão SAAE- Guarulhos



Fonte: Sistema de Telemetria SAAE Guarulhos.

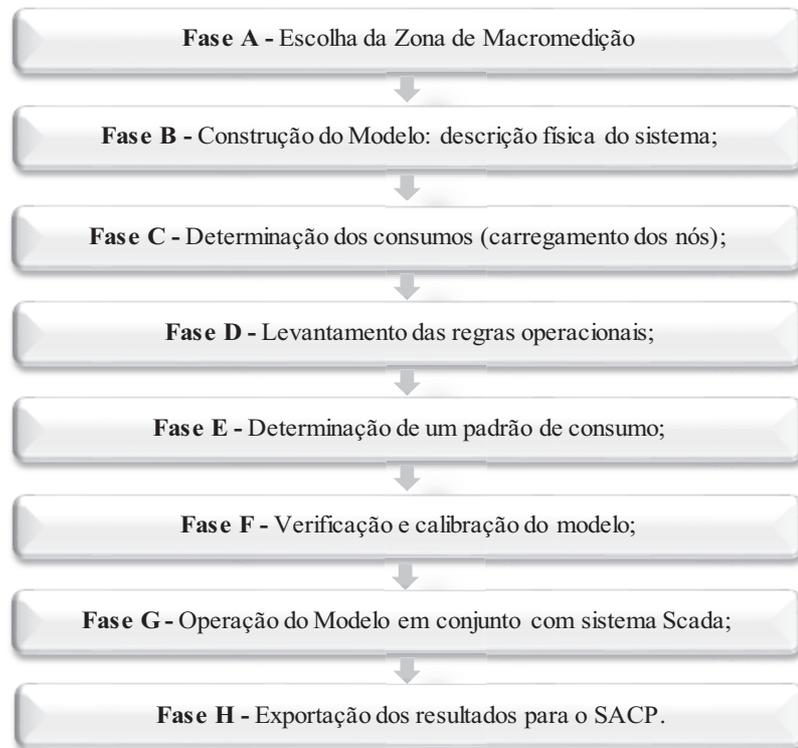
Tardelli (2006), ainda enfatiza que a gestão estatística realizada através da análise dos parâmetros ao longo de certo tempo, permite não só melhorar as condições técnicas e econômicas de exploração, como também dar indicações sobre:

- a) Tempo de utilização dos equipamentos, seu estado de funcionamento e confiabilidade;
- b) Necessidades de remodelagem e ampliação dos sistemas em determinadas zonas;
- c) Outras informações que permitam um adequado planejamento e tomada de decisões sobre futuros investimento.

3 METODO

Para a verificação da viabilidade da utilização dos modelos matemáticos para a estimativa da perda de água real, através do simulador EPANET 2.0, interligado ao sistema de tele gestão, iremos utilizar um modelo sugerido por Coelho et al., (2006), mostrado à Figura 26, adaptado para a finalidade do presente estudo e à realidade atual do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Guarulhos (SAAE).

Figura 26: Fases de construção de um modelo Hidráulico



Fonte: Adaptado de Coelho et al., (2006).

A necessidade de se adaptar o formato sugerido por Coelho et al., (2006), foi determinada pela opção de se obter os valores de volumes de perdas reais diariamente, ou seja, ao fechamento de cada hora do dia através de dados de vazão e pressão oriundos do sistema de tele gestão se gera uma rodada de simulação, e estando o modelo devidamente calibrado, são gerados os volumes de perdas de reais de água para a ZMC de estudo e totalizados ao final do dia.

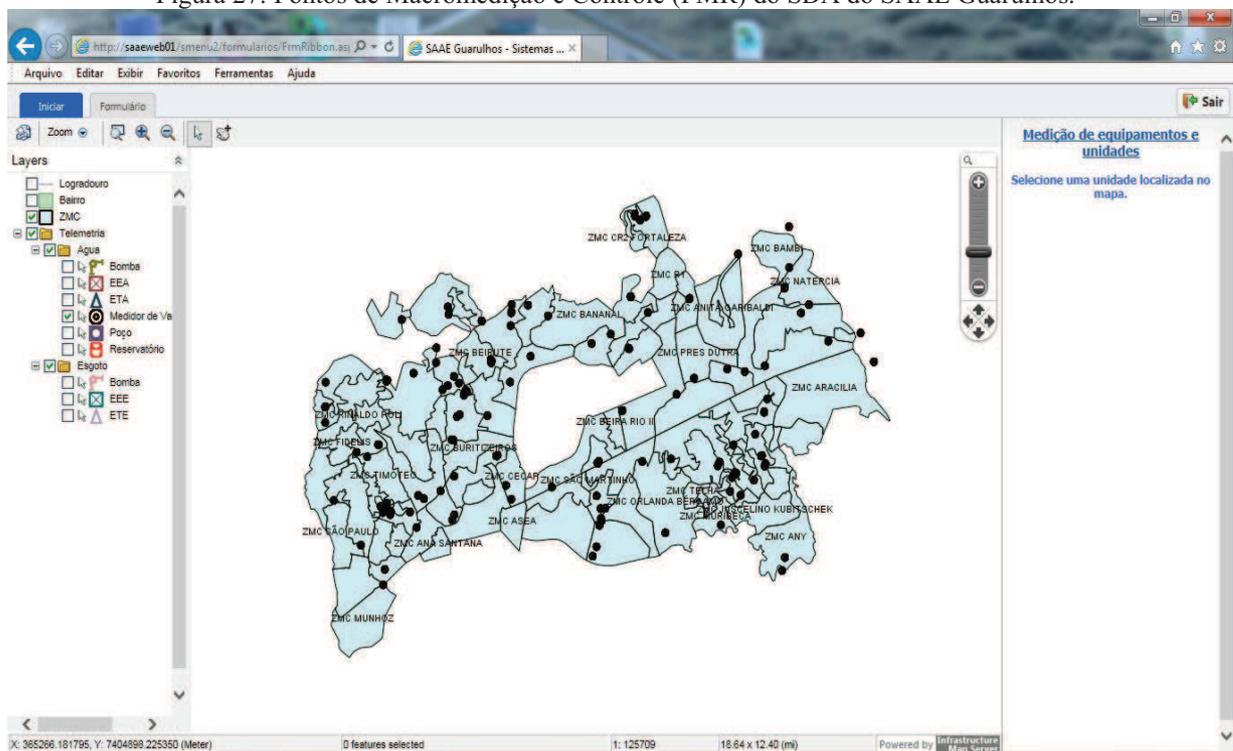
Cabe salientar que pelo fato dos dados de vazão e pressão a serem utilizados no modelo ter origem em medidores instalados e aquisitados em tempo real, os valores estimados

estarão mais próximos da realidade, visto que as vazões de consumo dos setores monitorados e as respectivas vazões mínimas noturnas não mais serão médias, como em outras aplicações.

O sistema de distribuição de água do SAAE, encontra-se setorizado em cerca de 180 Zonas de Macromedição e Controle (ZMCs), todas possuem um macro medidor do tipo eletromagnético de carretel e a maioria delas com a estanqueidade já verificada.

O macro medidor está instalado junto à um transdutor de pressão, essa unidade é denominada Ponto de Macromedição e Controle (PMR), na Figura 27 é mostrado tela do sistema de tele gestão de uma PMR.

Figura 27: Pontos de Macromedição e Controle (PMR) do SDA do SAAE Guarulhos.



Fonte: SIG-SAAE Guarulhos.

As duas grandezas mensuradas, são as variáveis principais do modelo, ou seja, a partir delas são calculadas as vazões distribuídas nos nós de consumo, sendo o consumo total a somatória dos valores entregues nas residências e também as vazões perdidas nos diversos vazamentos, que dependem das pressões resultantes nos nós.

Os quantitativos de perdas são estimados e armazenados e servem para cálculo do balanço hídrico através da metodologia *bottom up*, já citada anteriormente, que será calculado e analisado ao final de cada mês. Além do cálculo de balanço hídrico, também serão feitas simulações para locação de válvulas redutoras de pressão, através de módulo acoplado à customização do programa Epanet, desenvolvido no SAAE.

4 PESQUISA EMPÍRICA

A seguir serão detalhadas as fases de desenvolvimento realizadas no estudo para validação da utilização do modelo de simulação hidráulica na estimativa dos volumes de perdas de água reais em SDAs.

4.1 Escolha da ZMC para construção do modelo

Para verificação da aplicabilidade da modelagem em tempo real, para a determinação das perdas reais, foi definida dentro do sistema de distribuição de água do município de Guarulhos uma das ZMCs, em que está subdividido o SDA . Os critérios para sua escolha foram os seguintes:

Elevada perda de água, onde será utilizado o indicador de perda por ramal em l/lig dia, ou volume disponibilizado;

Pressões elevadas;

Idade da rede;

Elevado número de vazamentos;

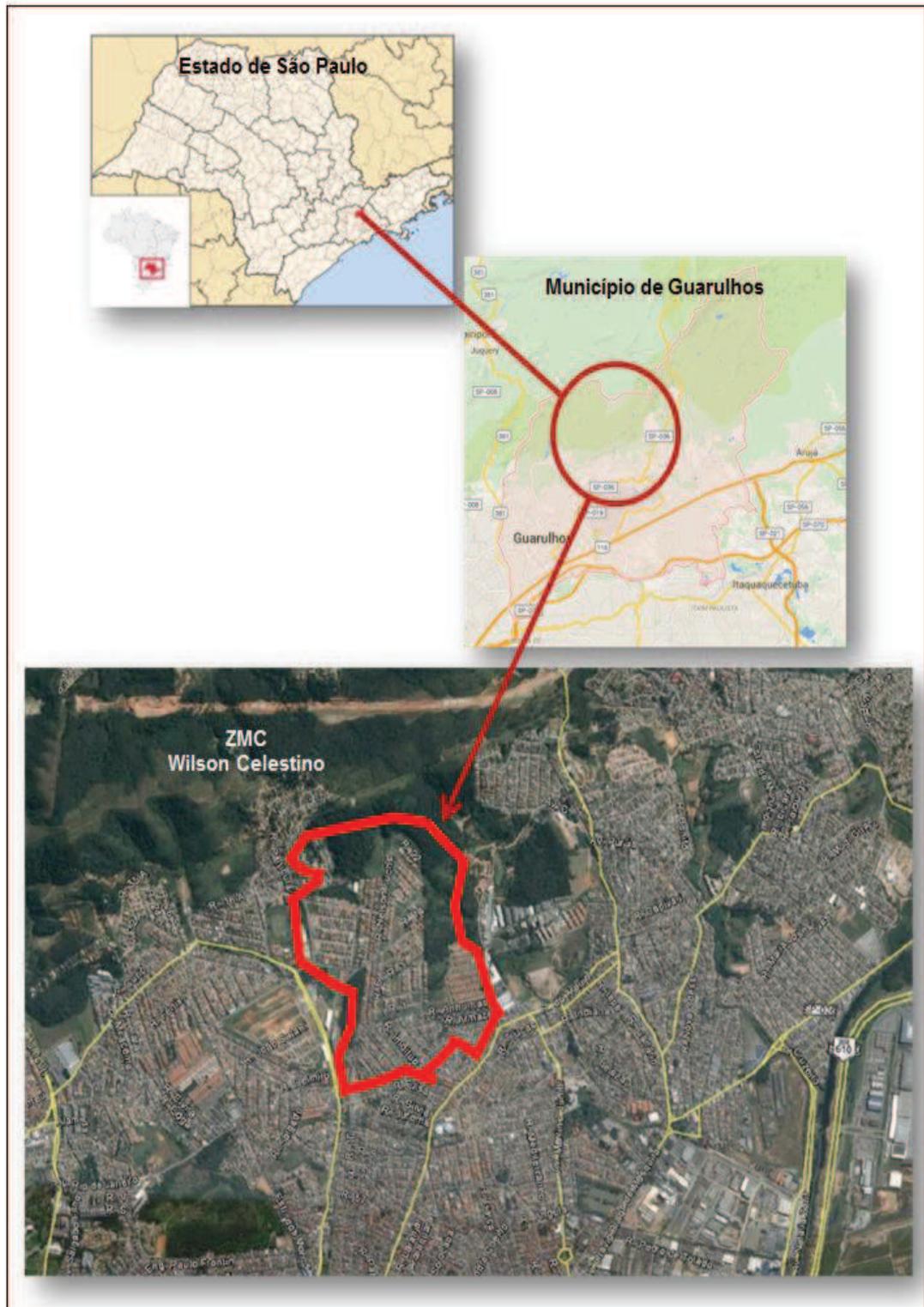
Consumo de energia para o transporte da água.

Entre as ZMCs existentes no sistema de distribuição do SAAE, a que atende a maior parte dos requisitos mencionados acima é a denominada como Wilson Celestino, e faz parte da área do setor de abastecimento do Reservatório de Cidade Martins localizado na porção norte do município de Guarulhos.

As vazões de consumo são aduzidas através de uma estação elevatória de água, as cotas topográficas do setor variam de 757,00 à 803,00 m, o que configura uma variação altimétrica de 46m .

Na Figura 28 é apresentada a localização da área de estudo.

Figura 28: Localização da área de estudo



Fonte: SAAE Guarulhos

A água é distribuída por uma rede de tubulações que possui a configuração apresentada na Tabela 1:

Tabela 1: Caracterização das redes de distribuição da ZMC Wilson Celestino

DIÂMETRO (mm)	MATERIAL	IDADE (anos)	EXTENSÃO (m)
50	PVC-PBA	5	2218
80	PVC-PBA	14	8635
200	PVC DeFoFo	13	2650

Fonte: Sistema de Informações Geográficas (SIG)-SAAE Guarulhos.

Quanto às ligações para abastecimento individual o sistema é caracterizado da seguinte forma:

Tabela 2: Caracterização das ligações domiciliares.

SITUAÇÃO	QUANTIDADE (un)
Ativas	2833
Inativas	15
Cortadas	75
Cortadas em definitivo	303

Fonte: Sistema Comercial (SCOM)-SAAE Guarulhos.

No estudo serão levados em consideração também as tubulações dos ramais de ligação ditos na situação cortados em definitivo, apesar de não mais disponibilizarem água para qualquer domicílio, fisicamente eles ainda existem estando somente “capeados”, e portanto pressurizados, o que representa potencial para ocorrência de vazamentos.

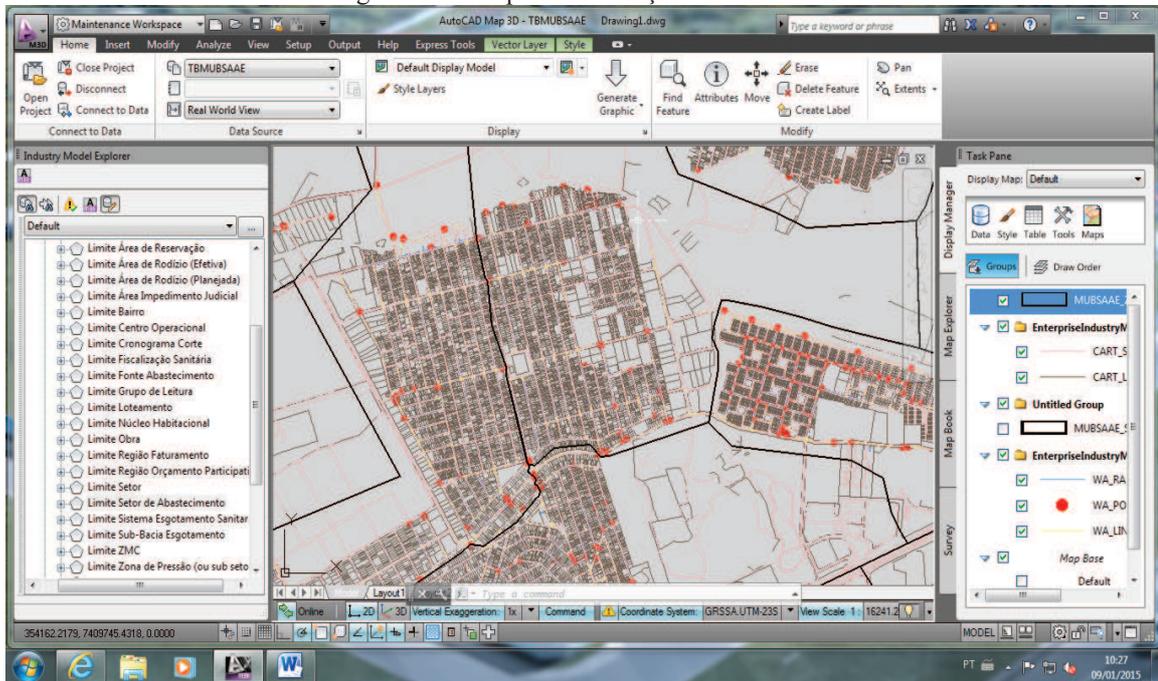
4.2 Delimitação das Áreas das Zonas de Macromedição e Controle (ZMCs)

Uma das opções citadas por Coelho et al., (2006), para o levantamento das características reais das redes de distribuição de água é através da utilização de sistemas do tipo SIG. Porém antes de se poder extrair informações das características reais das redes de distribuição é necessário alimentar os sistemas com tais informações, no caso do sistema do SAAE de Guarulhos como segue:

As ZMCs são inseridas através do lançamento de seus limites em ambiente do programa *AutocadMap* desenvolvido para funcionar como porta de entrada dos dados das redes físicas de água para o banco de dados. O lançamento é feito com uso do comando *polyline*, na área circunscrita todos os objetos existentes passarão a fazer parte de uma determinada área de abastecimento, a já citada ZMC.

Na Figura 29, é apresentada a rotina de lançamento da *polyline* utilizada para delimitação de uma ZMC

Figura 29: Tela para delimitação de uma ZMC

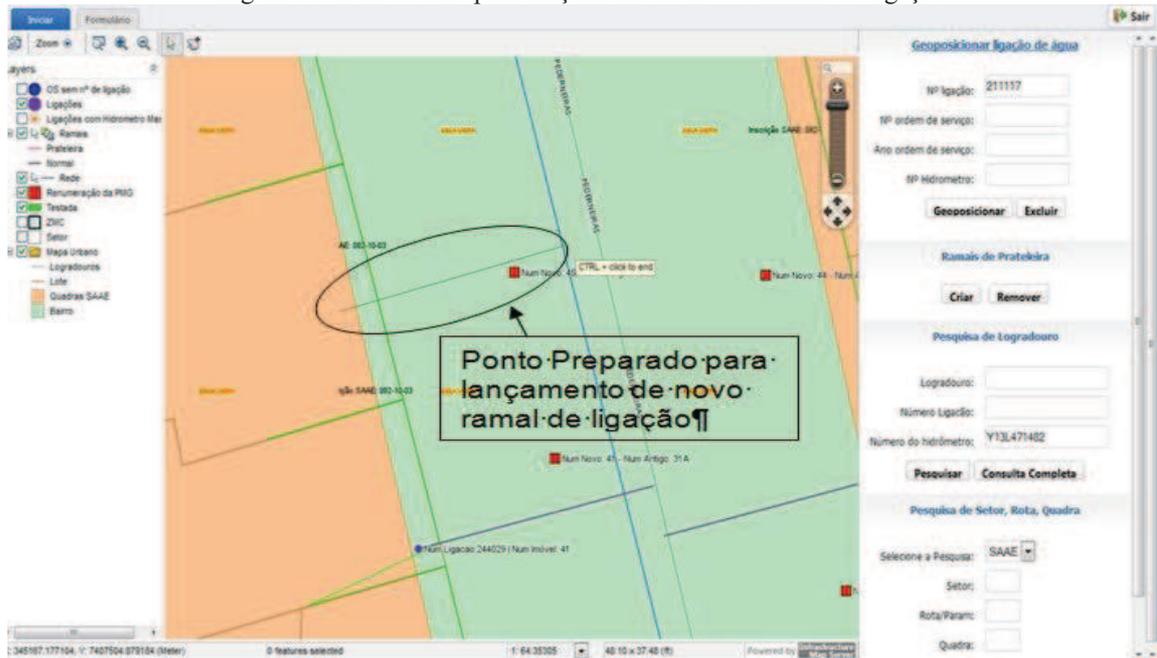


Fonte: Sistema de Informações geográficas-SAAE Guarulhos

Cada uma dessas áreas em média, segundo Alegre et al., (2005), deve possuir uma quantidade de 5000 ramais de ligação de água, dada a dinâmica de ocupação das áreas ainda passíveis de novos empreendimentos e do processo acelerado de verticalização, é necessário um processo constante de atualização cadastral da rede física, além disso é necessário para a correta distribuição das vazões pelos nós de consumo e cálculo dos indicadores de desempenho.

Na Figura 30 sequência de atualização do cadastro de ramais de ligação:

Figura 30: Tela do SIG para lançamento de novos ramos de ligação

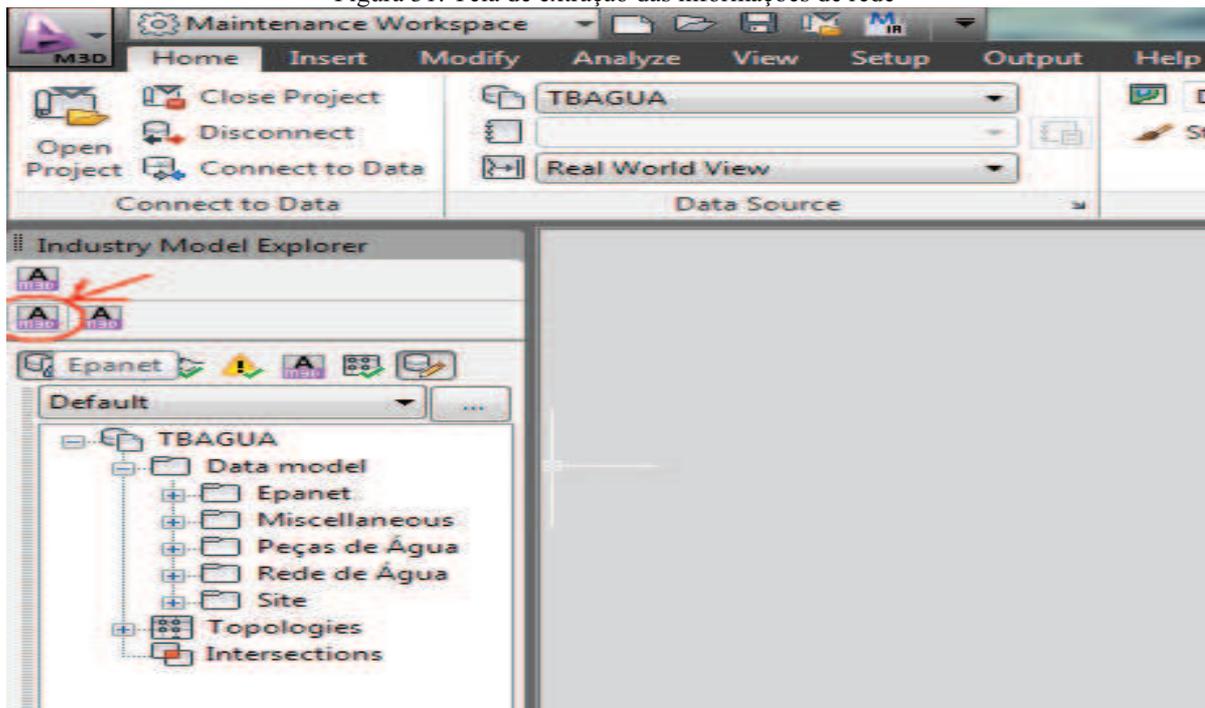


Fonte: Sistema de Informação Geográfica -SAAE Guarulhos

4.3 Construção do modelo físico

A construção do modelo físico da rede de distribuição para o estudo proposto será feita através da extração de dados do SIG, que utiliza o programa *AutocadMap* como interface para inserção e extração de dados de rede e singularidades do banco de dados, através de módulo específico para extração das informações, a seguir na Figura 31 é apresentada tela de extração das informações.

Figura 31: Tela de extração das informações de rede

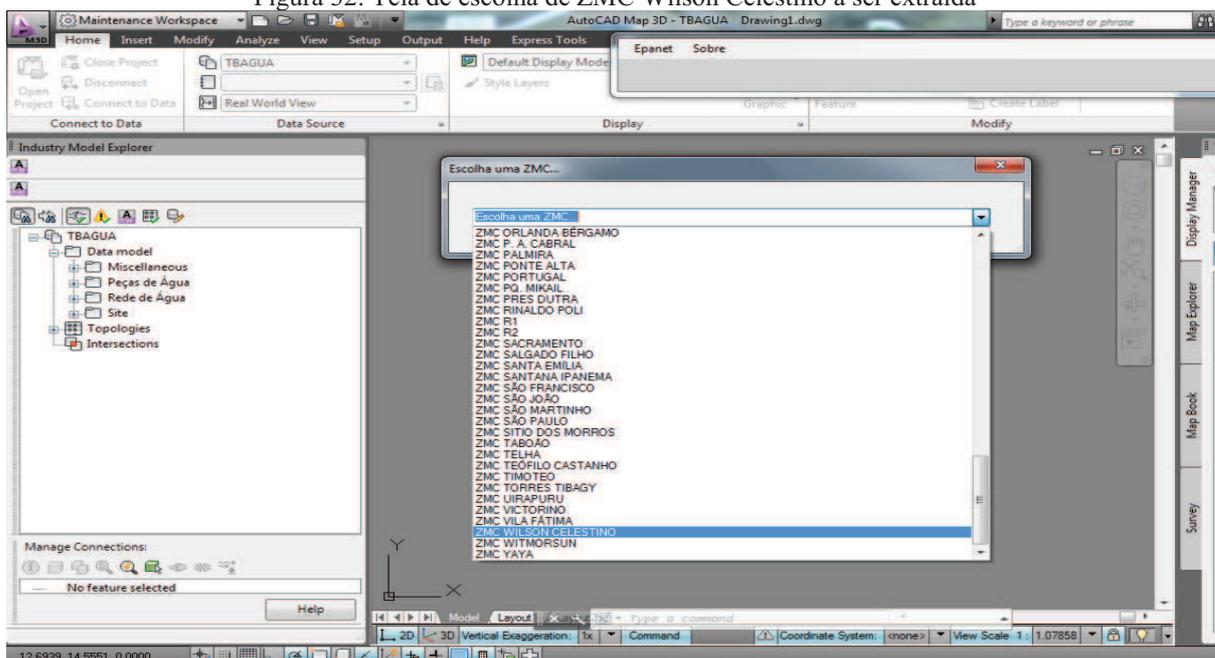


Fonte: Programa Autocad Map- SAAE Guarulhos

4.3.1 Extração de Dados da Topologia

Com a ZMC já escolhida é acessada tela do modulo de customização do Epanet, apresentada na Figura 32. Nela é selecionada a área de estudo para extração de dados da topologia, junto com as vazões de consumo, cuja forma de determinação será apresentada mais a frente, já distribuídas.

Figura 32: Tela de escolha de ZMC Wilson Celestino à ser extraída



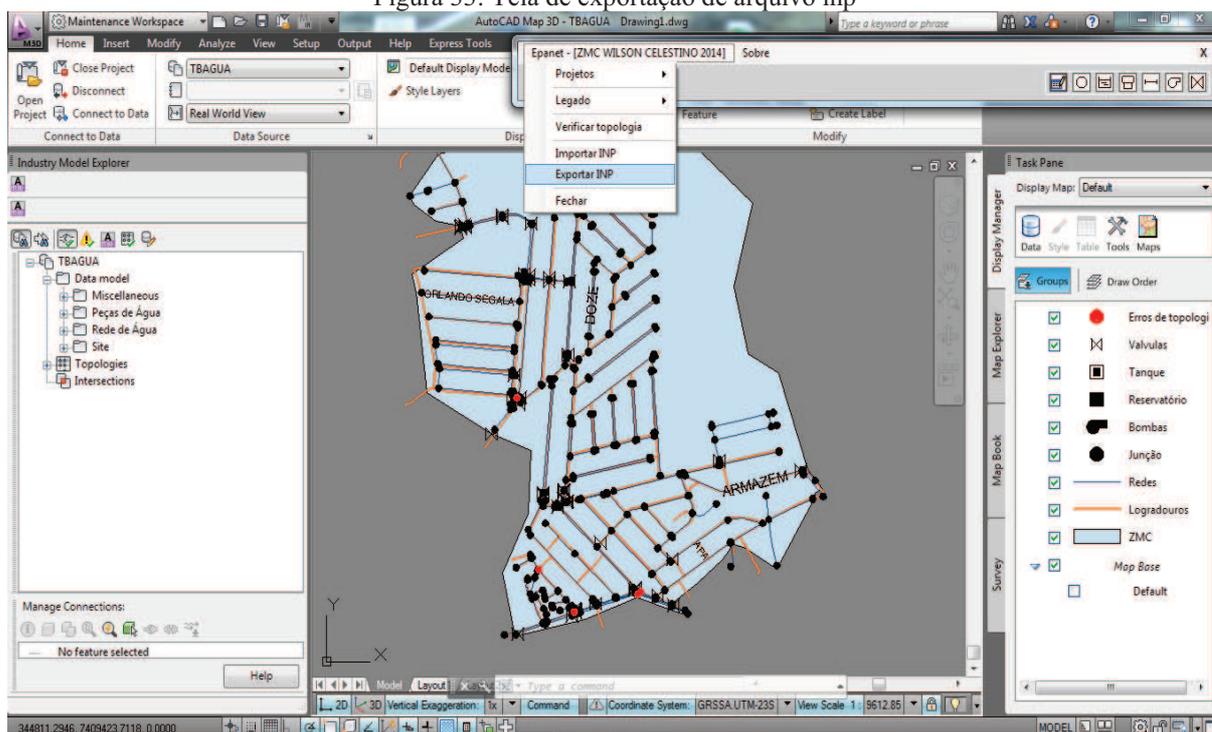
Fonte: Programa Autocad Map- SAAE Guarulhos

As informações extraídas do SIG, são apresentadas diretamente dentro do ambiente *AutocadMap*. Com o modelo construído é possível sua simulação dentro do próprio *AutocadMap*, através de customização do programa Epanet, o que solucionou um problema existente no simulador, que era sua interface gráfica de difícil uso, principalmente aos técnicos já acostumados a utilizarem o ambiente gráfico de outros programas. Todos os comandos e rotina de cálculo foram customizados para funcionarem na mesma interface.

Além das características reais das tubulações e peças componentes das redes de distribuição de água, também são extraídos os dados de topografia da região e cada singularidade de rede tem suas coordenadas geográficas também anexadas ao modelo construído, de forma a ter todas as variáveis necessárias para utilização do modelo da rede.

Outra possibilidade possível é a extração de dados e exportação em um arquivo de texto com extensão *inp*, no anexo 1 é mostrado um exemplo do formato do arquivo mencionado, e o mesmo é o formato de entrada de dados do programa Epanet, na Figura 33, é mostrada a tela de exportação do arquivo *inp*.

Figura 33: Tela de exportação de arquivo inp



Fonte: Programa Autocad Map- SAAE Guarulhos

Não é possível a geração do modelo de rede para simulação sem as informações citadas acima, para sanar o problema, diversas rotinas foram implantadas no módulo de geração do modelo tais como:

Na ausência de diâmetro em singularidade, a mesma assume o diâmetro da rede em que está conectada;

Adoção de um diâmetro de referência, quando da inexistência de outra referência.

Para permitir que sejam complementadas as informações do modelo, o que no caso deverá ser feita de forma manual, é gerado um relatório para que o técnico proceda verificações nos pontos onde o programa utilizou valores de referência.

4.3.2 Dados de Rugosidade das Tubulações

Para se processar o cálculo das perdas de cargas distribuídas pelas diversas tubulações existentes no sistema uma das principais características e das mais difíceis de se quantificar é a rugosidade da tubulação.

A rugosidade pode ser afetada por fatores, que são listados a seguir:

Tipo de material.

Idade.

Existência de revestimento interno da tubulação.

Qualidade da água.

Intermitência no abastecimento.

A perda de carga pode ser determinada por equações de resistência, sendo que a utilizada por este estudo é a chamada universal ou de Darcy-Weisbach, equação 7, para sua estimativa em tubos usados, foi inserida no sistema tabela 3 onde estão inseridos os valores de rugosidade em função da idade da tubulação e do material. Cabe salientar que os valores iniciais de rugosidade poderão ser alterados após o processo de calibração do modelo .

Tabela 3: Coeficientes de rugosidade tubulações-módulo Epanet

COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DAS TUBULAÇÕES UTILIZADAS NO MÓDULO			
EPANET			
MATERIAL	COEFICIENTE	IDADE_TUBULACAO	EQUAÇÃO
PVC/DEFOFO	0,0015	0	DARCY-WEISBACH
Poli Cloreto de Vinila	0,0015	10	DARCY-WEISBACH
Polietileno	0,0015	10	DARCY-WEISBACH
PVC/DEFOFO	0,0010	10	DARCY-WEISBACH
Ferro Ductil	0,0030	10	DARCY-WEISBACH
Ferro Fundido	0,0030	10	DARCY-WEISBACH
Aço Carbono	0,0030	10	DARCY-WEISBACH
Ferro Ductil	0,0030	10	DARCY-WEISBACH
Ferro Fundido	0,0030	10	DARCY-WEISBACH
Aço Carbono	80	10	HAZEN-WILLIANS
Ferro Ductil	90	10	HAZEN-WILLIANS
Ferro Fundido	90	10	HAZEN-WILLIANS
Polietileno	100	10	HAZEN-WILLIANS
PVC/DEFOFO	100	10	HAZEN-WILLIANS
Aço Carbono	140	0	HAZEN-WILLIANS
Ferro Ductil	140	0	HAZEN-WILLIANS
Ferro Fundido	140	0	HAZEN-WILLIANS
Polietileno	150	0	HAZEN-WILLIANS
PVC/DEFOFO	150	0	HAZEN-WILLIANS

Fonte: Módulo Customizado Epanet-SAAE Guarulhos.

A customização desenvolvida permite a utilização também da fórmula de Hazen-Willians, Equação (57), esta uma fórmula empírica que leva em consideração, para o cálculo das perdas de carga somente a rugosidade das paredes da tubulação considerada, que é mostrada .

$$H_f = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} \times D^{4,87}} \quad (57)$$

Onde:

H_f = Perda de carga na tubulação;

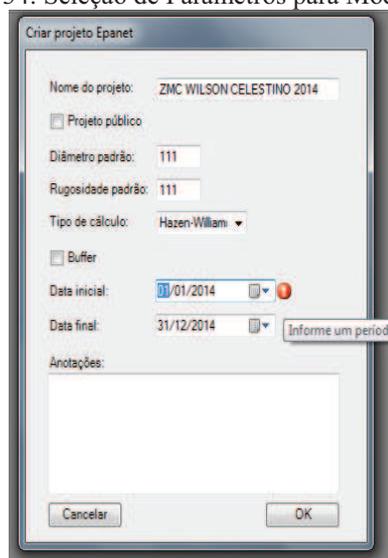
D = diâmetro da canalização;

C = Coeficiente que depende da natureza das paredes;

Q = Vazão.

Na Figura 34 é mostrada tela para seleção da equação de resistência a ser usada na modelagem a ser realizada.

Figura 34: Seleção de Parâmetros para Modelagem



Fonte: Customização EPANET- SAAE Guarulhos

4.3.3 Determinação dos Consumos

Para um modelo de simulação apresentar resultados que simulem as grandezas verificadas em campo, é necessário além das características da topologia das redes, a correta distribuição dos consumos entre os diversos pontos da rede simulada.

Alegre et al., (2005), Araujo (2005), Coelho et al., (2006) e afirmam que a distribuição dos consumos pode ser feita por dois processos a saber:

1. Através do cálculo de pesos onde o consumo de cada nó é dividido pela somatória total dos consumos de base de todos nós, gerando um fator de ponderação das vazões de consumo;
2. Ou podemos realizar a somatória dos volumes micromedidos de cada ligação de sendo convertidos em vazão e distribuídos pelos nós em valores absolutos.

Para os dois métodos é utilizada a totalização dos volumes de micromedição anuais, de forma a embutir a sazonalidade do consumo das diversas categorias de economias, durante todo o ano. No anexo 2, é demonstrado em detalhe o procedimento de cálculo de consumos nodais.

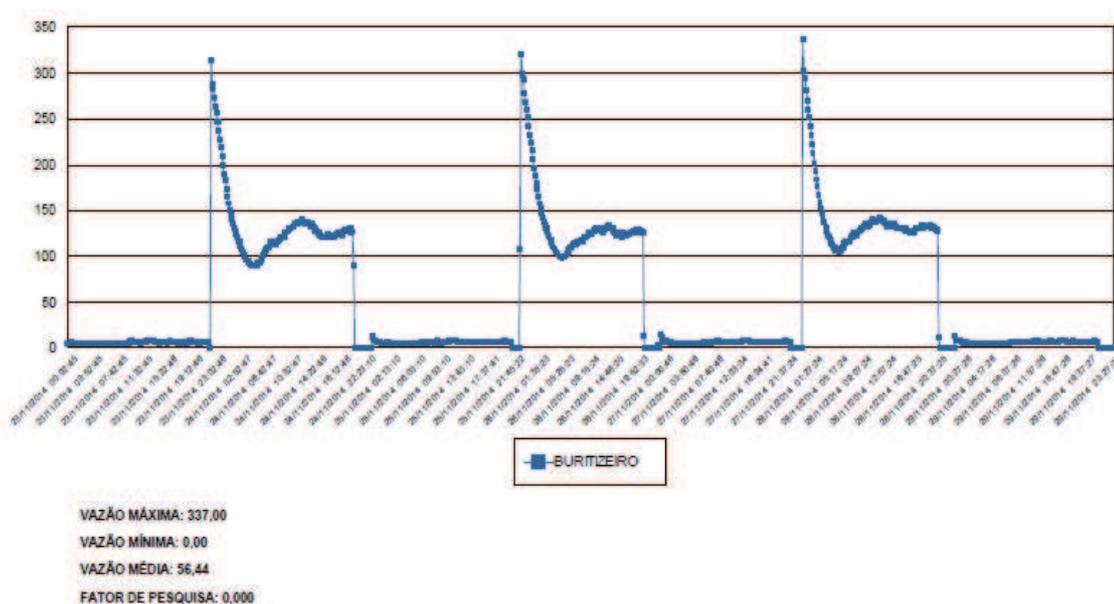
Para o modelo de simulação a vazão nodal, calculada da forma descrita, é chamado de consumo base (Q_b), esse consumo servirá de referência para o cálculo das vazões ao longo das 24 horas do dia, durante todos os dias do ano.

4.3.3.1 Perfis de Vazão

Além do consumo base é necessário estabelecer, com base em medições de vazão ao longo do tempo, um perfil de consumo que descreva a variação do mesmo ao longo das horas, cabe salientar também que esta variação também se altera durante os dias da semana.

Na Figura 35, é mostrado os dados enviados por telemetria do medidor instalado de umas das ZMCs do sistema de distribuição do SAAE, no caso na ZMC Buritizeiro. É possível verificar que a área é abastecida por sistema de rodizio de 24 horas com água e 24 horas sem.

Figura 35: Tela do SIG de extração da curva de consumo



Fonte: Sistema de Informações Geográficas -SAAE Guarulhos.

As medições são feitas através de medidores do tipo eletromagnético de carretel, os dados aquisitados são enviados para um controle lógico programável (CLP), que cuida do armazenamento e posterior envio dos dados para o centro de controle operacional, para a operação em tempo real. Em paralelo são gravados os valores médios a cada dez minutos no banco de dados.

4.3.3.2 Padrões de Consumo

Os programas de simulação podem executar dois tipos de simulação a estática e a dinâmica ou período estendido. A utilização de um tipo ou outro se encerra no tipo de uso que se fará do modelo.

Coelho et al., (2005), salienta que devido a melhoria da capacidade de simulação dos programas e a utilização de tais ferramentas para a operação de sistemas, redução de consumo de energia elétrica, simulação de cenários futuros e para qualidade da água, cada vez mais se utiliza as simulações do tipo período estendido. Também é dito pelo mesmo autor que os simuladores permitem que sejam dadas diversas categorias de consumo, como doméstico, comercial e industrial, individualizar um grande consumidor e estimar de forma independente as perdas reais, em cada uma dessas categorias.

No estudo desenvolvido foi utilizado a simulação de período estendido entre as principais razões destacamos: a impossibilidade de se estimar as perdas reais pela simulação estática, já que temos variações de consumo e por consequência de pressões nos diversos nós das redes de distribuição.

A somatória dos consumos base dos nós do sistema de abastecimento de água resultará no consumo base total do setor modelado, no caso em estudo ZMC Wilson Celestino, a relação entre a vazão medida através do macro medidor e soma dos consumos base.

Para a determinação dos fatores multiplicativos, que serão aplicados aos consumos base, o sistema utiliza a seguinte equação:

$$F_{ct} = \frac{Qm_t}{\sum_i Q_b} \quad (58)$$

Onde:

F_c = Fator de Consumo

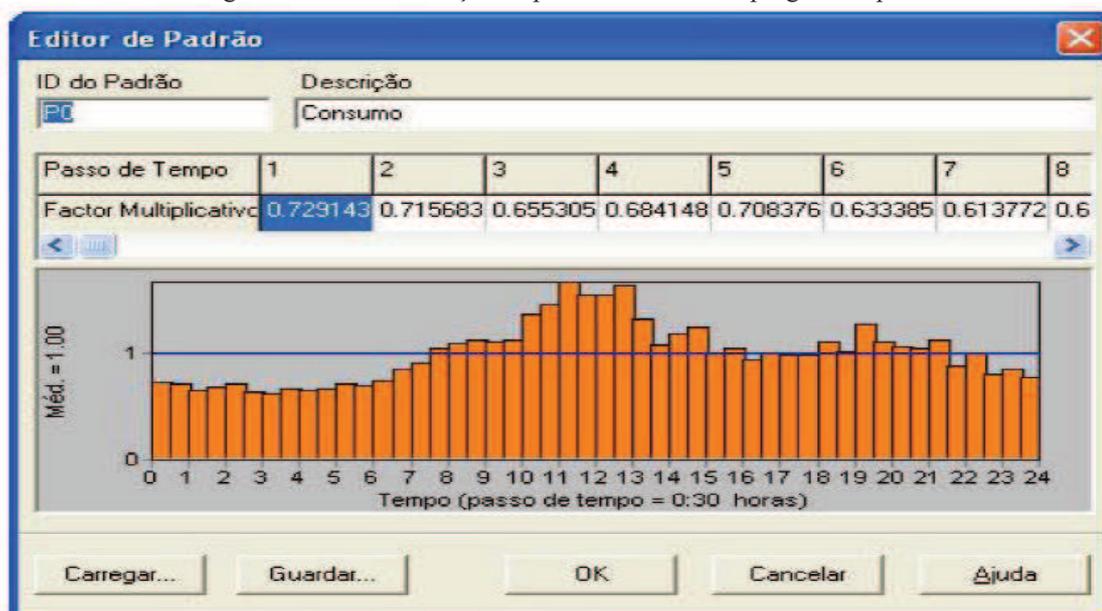
Qm_t : Vazão macro medida no tempo t;

ΣCb_t : Somatória dos consumos bases dos nós;

A equação 55 é aplicada de maneira recursiva nas 24 horas do dia, o fator obtido a cada hora do dia, é aplicado para todos os nós do sistema a ser utilizados, corrigindo os consumos base nodais. É apresentado no anexo 2 o algoritmo de cálculo das vazões de distribuição nos nós utilizados no desenvolvimento da customização do programa.

Na Figura 36 é mostrado a tela de edição de padrões do Epanet.

Figura 36: Janela de edição de padrão de consumo-programa Epanet



Fonte: Coelho (2006) et al.,

4.3.3.3 Determinação do padrão de consumo de perdas

Para o cálculo das estimativas de vazões perdidas por vazamentos será utilizado o algoritmo desenvolvido e utilizado por Araujo (2005). O algoritmo é dividido em duas partes: na primeira, são calculados os fatores de consumo horário (f_c), procedimento já descrito no item anterior, e estabelece-se um valor do coeficiente de vazamento (c), que no estudo foi usado o valor de $c = 5 \times 10^{-5} \text{ l/s}_x \text{m}_x (\text{m c.a.})^{1,18}$; em seguida o módulo customizado do programa Epanet simula a rede em período estendido ou dinâmico.

Os dados assim obtidos são utilizados na segunda parte, em que o próprio modelo estabelece um valor para o coeficiente de vazamento (c) e novos fatores de consumo horários ($f_{c,t}$), por forma a que a rede volte às condições iniciais pré-estabelecidas. Em seguida descrevem-se os procedimentos adotados com maior detalhe:

Primeira parte

1 – Estabelece-se um valor para ser testado, fixo para todas as tubulações da rede, para o coeficiente de escoamento dos orifícios $c = 5 \cdot 10^{-5} \text{ l/s} \cdot \text{m} \cdot (\text{m c.a.})^{1,18}$, valor este baseado nos estudos já citados do National Water Council (1980) e em Lambert et al., (1998);

2 – Calculam-se os valores de K_f , coeficiente de vazamento ou emissor que será usado pelo módulo customizado do programa Epanet para cada nó da rede, conforme equação 56:

$$K_f = c \times \sum_{j=1}^{M_i} 0,5 \times L_{ji} \quad (59)$$

Sendo:

M: n.º de tubulações ligadas ao nó i ;

c: coeficiente de escoamento dos orifícios;

L_{ij} : comprimento total das tubulações adjacentes ao nó;

3 – Determina-se um consumo base (q_{bi}), pré-estabelecido, para cada nó;

4 – Associa-se, para cada nó, um fator de consumo ($f_{c,i}$) para a hora H e um consumo base (q_{bi});

5 – Simula-se a rede, neste caso com o programa Epanet, para uma condição hidráulica de regime estático numa primeira simulação, e regime estendido ou dinâmico para as demais simulações;

6 – Determina-se, com os resultados gerados, um padrão horário de consumo total (*i.e.*, consumo efetivo e vazamento). Os resultados de vazões gerados são posteriormente utilizados para simular uma leitura de vazões na entrada da rede;

7 – Calcula-se a percentagem de vazamento para a hora que corresponde ao menor consumo.

Segunda parte

Nesta parte do procedimento faz-se o percurso inverso. Desta forma, através do modelo obtém-se como resultado uma rede, com consumos em cada nó, semelhante à rede inicial, cujo procedimento se apresenta em seguida:

1 – Com base no padrão horário de consumo total, calculado na primeira parte do procedimento 6, determina-se um novo padrão de consumo redistribui-se o novo consumo, assim estabelecido, por entre os nós de consumo efetivo;

2 – Estabelece-se como dado de entrada para o modelo proposto, uma percentagem de vazamento igual à calculada no procedimento 7 da primeira parte;

3– Executa-se o modelo proposto e analisam-se os resultados.

4.4 Regras Operacionais da ZMC Wilson Celestino

A ZMC estudada faz parte da área de abastecimento do Centro de Reservação Cidade Martins, dentro da área de influência da elevatória do citado centro. A pressão de entrada no setor, que tem seus valores aquisitados juntamente com os valores de vazão, sendo a pressão média de 63 mca, valor que provoca um número grande de vazamentos sejam estes em ramais de ligação domiciliar ou nas redes de distribuição e por consequência a perdas reais elevadas.

Em razão da escassez de recursos hídricos suficientes para o abastecimento de toda a população de Guarulhos todos os dias, aliado à um índice de perdas acima de média, o SDA, é submetido a períodos de intermitência que no caso da ZMC em estudo o período de 48 horas com água e 24 horas sem água, o que vem a agravar os problemas de vazamentos, já que as tubulações são submetidas a um processo de fadiga, para o qual os materiais que constituem as redes não foram preparados.

Para a calibração do modelo a ZMC, foi necessário estimar a vazão de vazamentos, como mencionado no item 2.2.2, a vazão mínima noturna que é a utilizada para o estudo de perdas reais ocorreria as 4:00 e 5:00 da manhã, o que não foi verificado na ZMC estudada, sendo observada sua ocorrência às entre 02:00 e 06:00, tal fato está relacionado à operação do setor, que é duplamente controlado por uma válvula redutora de pressão, além do efeito dos inversores de frequência instalados na estação elevatória do já referido centro de reservação Cidade Martins.

Na Figura 37 é mostrada a curva de consumo com as vazões de entrada onde pode ser verificado, nos pontos assinados em vermelho o efeito da utilização dos inversores de frequência, na vazão de abastecimento, pela redução rápida da vazão.

Figura 37: Vazões de entrada na ZMC Wilson Celestino- Situação 1



Fonte: Sistema SACP-SAAE Guarulhos.

Desde o ano de 2013, em razão da prolongada estiagem o sistema de rodízio teve de ser alterado, de forma a equilibrar a oferta com a demanda de água, para a ZMC, objeto do estudo o novo ciclo de rodízio passou a ser de 19 horas com água e 29 horas sem água, como mostra a curva de consumo na figura 37.

Na Figura 38 é apresentada a curva de consumo da situação operacional 2.

Figura 38: Vazões de entrada na ZMC Wilson Celestino- Situação 2



Fonte: Sistema SACP-SAAE Guarulhos.

Os valores de vazão mostrados acima, são gravados juntamente com os valores de pressão, no banco de dados do sistema SACP, o permite que o modelo possa se ajustar a eventuais alterações operacionais para posterior cálculo dos volumes de perdas reais de água em cada uma das ZMCs existentes.

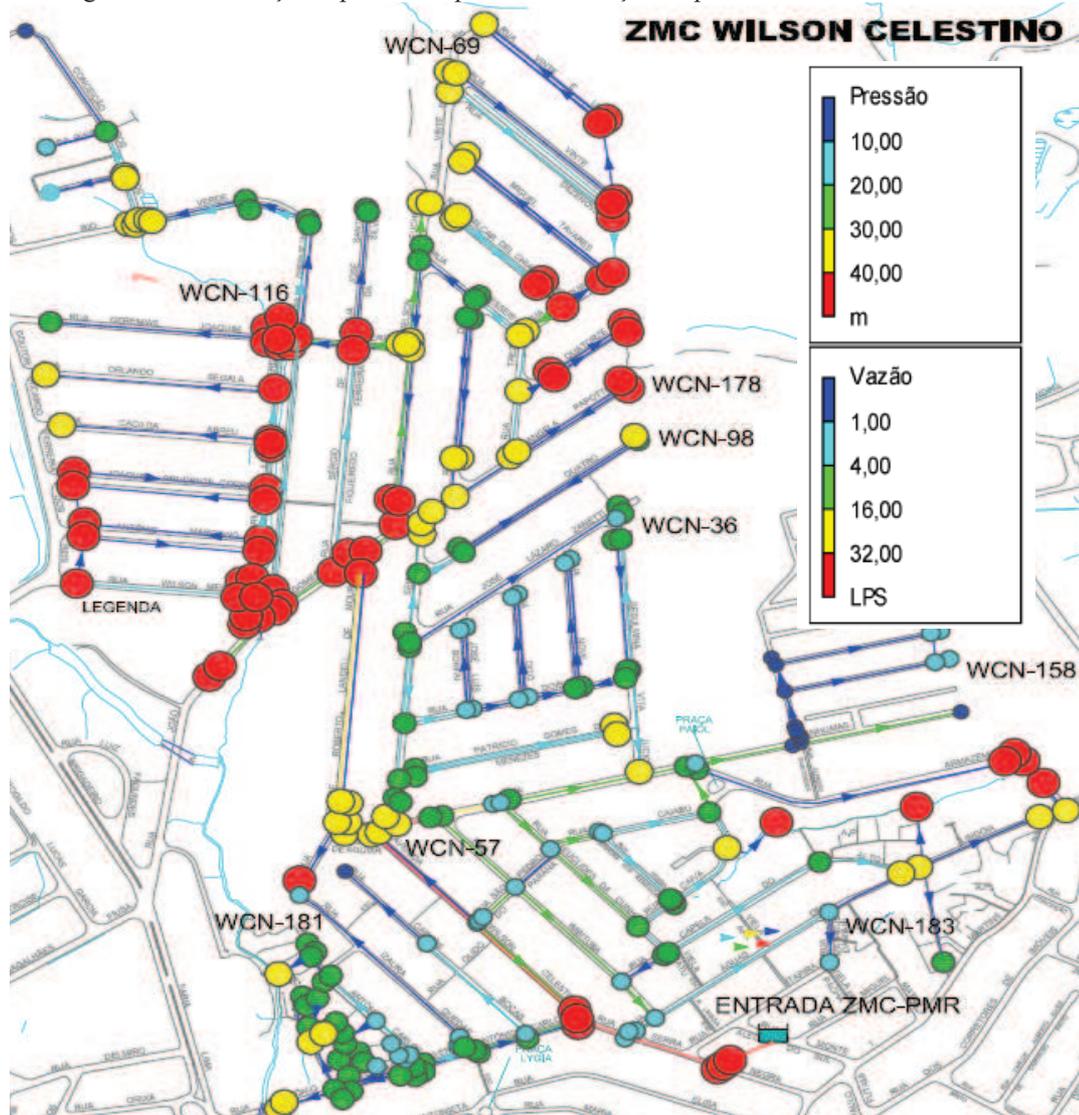
Em razão das alterações operacionais ocorridas durante o estudo, optou-se por realizar duas simulações para determinação dos volumes de perdas na situação 1 e uma verificação de funcionamento do modelo na situação operacional 2

4.5 Calibração do modelo

A calibração do modelo, foi feita para o período de uma semana, sendo utilizados dez pontos de medição de pressão distribuídos pelo setor, essas medições foram realizadas com o uso de registradores de pressão com *dataloggers*, com intervalo de leitura de 10 em dez minutos.

Na Figura 39, é mostrada a distribuição espacial dos equipamentos na ZMC Wilson Celestino.

Figura 39: Distribuição especial dos pontos de medição de pressão- ZMC Wilson Celestino



Fonte: Módulo Epanet/SIG-SAAE Guarulhos

Os equipamentos são instalados junto aos cavaletes de ligação, em que são instalados os micromedidores para apurar a consumo dos usuários. Os dados gerados pelos equipamentos, estão apresentados no anexo 3

Após o levantamento e verificação das informações acima o modelo é calibrado através do método iterativo, a escolha por tal método, foi definida pelo grau de dificuldade de implantar qualquer um dos demais métodos já citados na literatura no momento, visto a necessidade de uma elevada quantidade de levantamento de variáveis de campo.

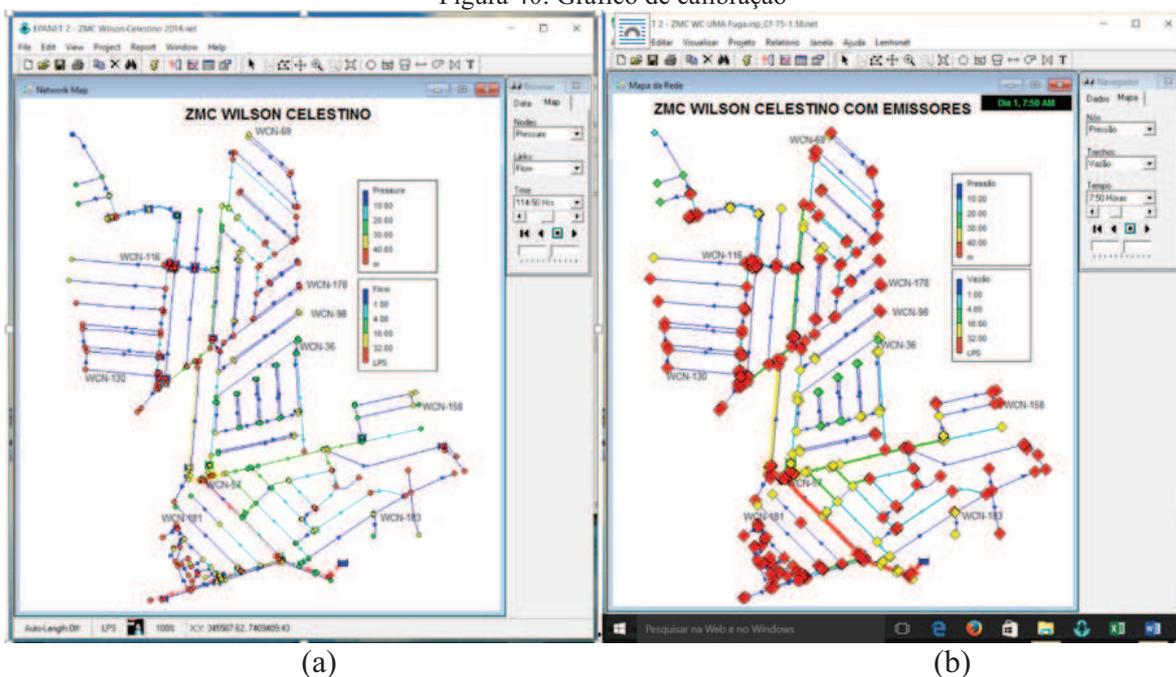
As variáveis utilizadas para calibração foram a rugosidade dos tubos e as vazões de distribuição, sendo a pressão nos nós utilizada como parâmetro de aceitação da calibração.

No anexo 4, são apresentados todos os gráficos dos resultados da calibração. O critério de aceitação de calibração de um modelo depende de seu tipo de utilização, no caso do estudo em desenvolvimento foi adotado como parâmetro de controle a variável pressão.

Outra ação é executada na construção do modelo é inserção dos coeficientes dos emissores de vazão (β), que simulam os vazamentos, no programa Epanet o seu valor é de 0,5, similar ao coeficiente de orifícios.

Abaixo na Figura 40 (a) e (b), podemos verificar o lançamento dos coeficientes através da mudança de simbologia dos nós de abastecimento, na figura (a) os nós tem o formato circular e na (b) assumem a forma de um losango,

Figura 40: Gráfico de calibração



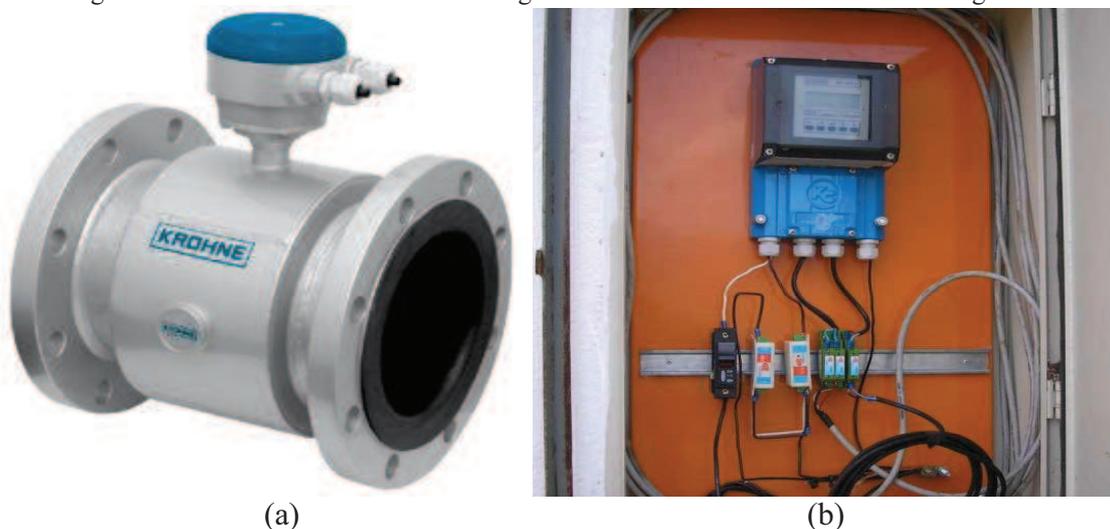
Fonte: Sistema SIG- Epanet-SAAE Guarulhos

4.6 Operação do Modelo com Sistema de Tele-Gestão (Scada)

Como já citado anteriormente as vazões de cada ZMC são medidas através de medidores de vazão do tipo eletromagnético, dentre os medidores disponíveis no mercado é o com maior range de medição e com a melhor precisão a baixas vazões, medindo vazões com velocidades de 0,3 m/s.

Na Figura 41 (a) e (b), são mostrados os elementos primário e secundário de um medidor de vazão eletromagnético

Figura 41: A- Primário Medidor Eletromagnético e B Secundário Medidor Eletromagnético



Fonte: Acervo do autor

O ponto de instalação dos medidores de vazão também recebe um equipamento para medição de pressão, chamado de transdutor de pressão que é instalado em uma derivação da tubulação de água que converte a pressão em uma corrente elétrica que varia de 4 a 20 mA, sendo o valor de início de escala para pressões de valor 0 e o fim de escala é adequado para cada ZMC, costumeiramente é adotado o valor de fim de escala para 100mca, pressão máxima de trabalho das tubulações utilizadas em redes de distribuição de água.

A unidade de medição de vazão e pressão é chamada de PMR, nela é instalado um Controle Lógico Programável (CLP), que é responsável pela transmissão dos dados adquiridos pelos equipamentos de medição até o Centro de Controle Operacional (CCO).

Na Figura 42 é mostrada tela do sistema Scada com a aquisição de dados de PMRs.

Figura 42: A- Primário Medidor Eletromagnético e 43 B Secundário Medidor Eletromagnético



Fonte: SAAE Guarulhos

Ao chegar no servidor do CCO, o dado bruto é trabalhado e gravado no banco de dados do sistema SACP, de onde o módulo customizado no SIG irá acessar os dados de vazão e efetuar o cálculo das estimativas de perdas

Diariamente a 0 hora é realizada uma simulação, a partir dos dados enviados pelo sistema de tele gestão com o cálculo de estimativas de perdas reais de água, em seguida os valores calculados são enviados e gravados no sistema SACP, para o posterior cálculo e emissão do balanço hídrico para cada uma das ZMCs em operação.

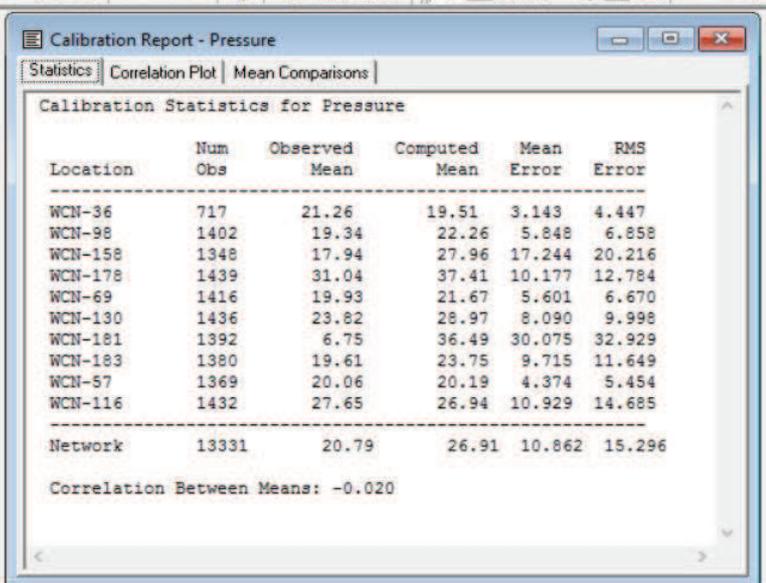
5 RESULTADOS

5.1 Calibração do Modelo

Para execução da calibração, foram executadas simulações a cada dez minutos, intervalo escolhido em razão da gravação dos valores de pressão e vazão no banco de dados, esse intervalo de tempo é chamado de passo de cálculo, e pode ser variado a depender da utilização do modelo.

Após o processo de calibração, terminado foi verificado que a maioria dos pontos apresentaram boa calibração, com exceção do ponto WCN-181, na Figura 43 é apresentado quadro resumo com os resultados estatísticos da calibração.

Figura 43: Tabela de resultados das pressões simuladas e calculadas



Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
WCN-36	717	21.26	19.51	3.143	4.447
WCN-98	1402	19.34	22.26	5.848	6.858
WCN-158	1348	17.94	27.96	17.244	20.216
WCN-178	1439	31.04	37.41	10.177	12.784
WCN-69	1416	19.93	21.67	5.601	6.670
WCN-130	1436	23.82	28.97	8.090	9.998
WCN-181	1392	6.75	36.49	30.075	32.929
WCN-183	1380	19.61	23.75	9.715	11.649
WCN-57	1369	20.06	20.19	4.374	5.454
WCN-116	1432	27.65	26.94	10.929	14.685
Network	13331	20.79	26.91	10.862	15.296

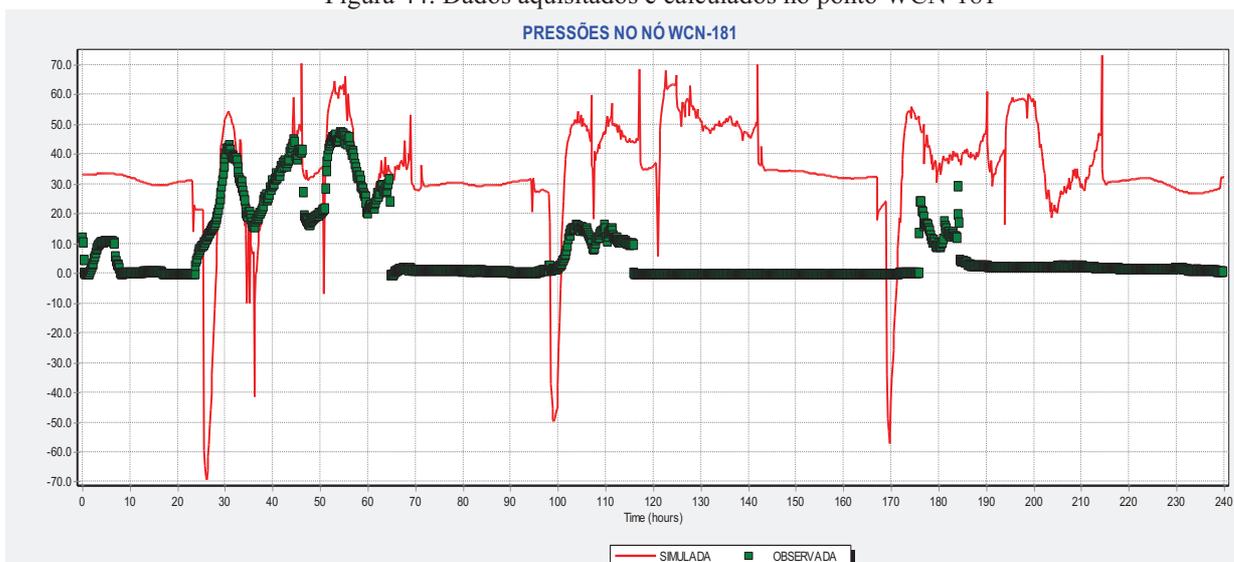
Correlation Between Means: -0.020

Fonte: SAAE Guarulhos

Após verificação do ponto mencionado, foi descoberto que um operador abriu um dos registros de divisa, o que mudou a setorização do trecho de rede coberto medido o que provocou divergência nos valores de pressão.

Apesar do problema apontado acima, optou-se por não descartar a medição, pois como pode ser observado na Figura 44 há uma boa aderência entre os valores de pressão medidos e calculados nas primeiras 60 horas de medição contínua e como os demais dentro dos limites aceitáveis para calibração de modelos já citados.

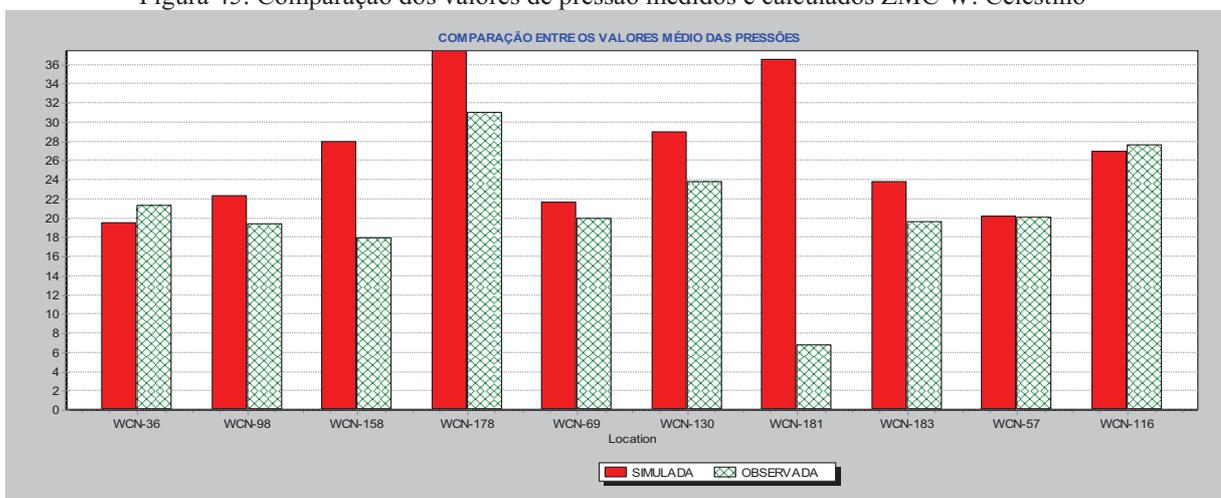
Figura 44: Dados aquisitados e calculados no ponto WCN-181



Fonte: SAAE Guarulhos

A seguir na Figura 45, é apresentado gráfico com a comparação das pressões médias e calculadas nos pontos de controle já mencionados, também nesta apresentação pode-se verificar a anomalia no ponto WCN-181, já mencionado

Figura 45: Comparação dos valores de pressão medidos e calculados ZMC W. Celestino



Fonte: Fonte: Sistema SIG-Epanet- SAAE Guarulhos

A calibração realizada foi utilizada para as duas situações operacionais simuladas, se manterem das condições da rede física inalteradas.

5.2 Estimativa do Volume de Perdas Reais

Após a calibração do modelo, foram executadas as simulações necessárias para o cálculo da estimativa dos volumes de perdas de água dentro da ZMC objeto de estudo, nas situações de operação 1 e 2. Na Figura 46 é apresentada a janela de inserção de parâmetros para o cálculo de perdas reais, através do algoritmo genético desenvolvido por Araujo (2005), que foi adaptado para operação junto ao módulo customizado do Epanet, instalado junto ao SIG utilizado pelo SAAE Guarulhos.

Figura 46: Janela de inserção de parâmetros para cálculo de perdas reais

Dados para o Algoritmo Genético	
Número Máximo de Geração	2000
Tamanho da População	20
Comprimento da Sub_Cadeia	30
Probabilidade de Cruzamento (0,5 <=> 0,95)	0,95
Probabilidade de Mutação (0,1 <=> 0,001)	0,01
Aplicação de Elitismo (Sim <=> Não)	Sim
Constante de Escalonamento Linear (1 <=> 2)	1,2

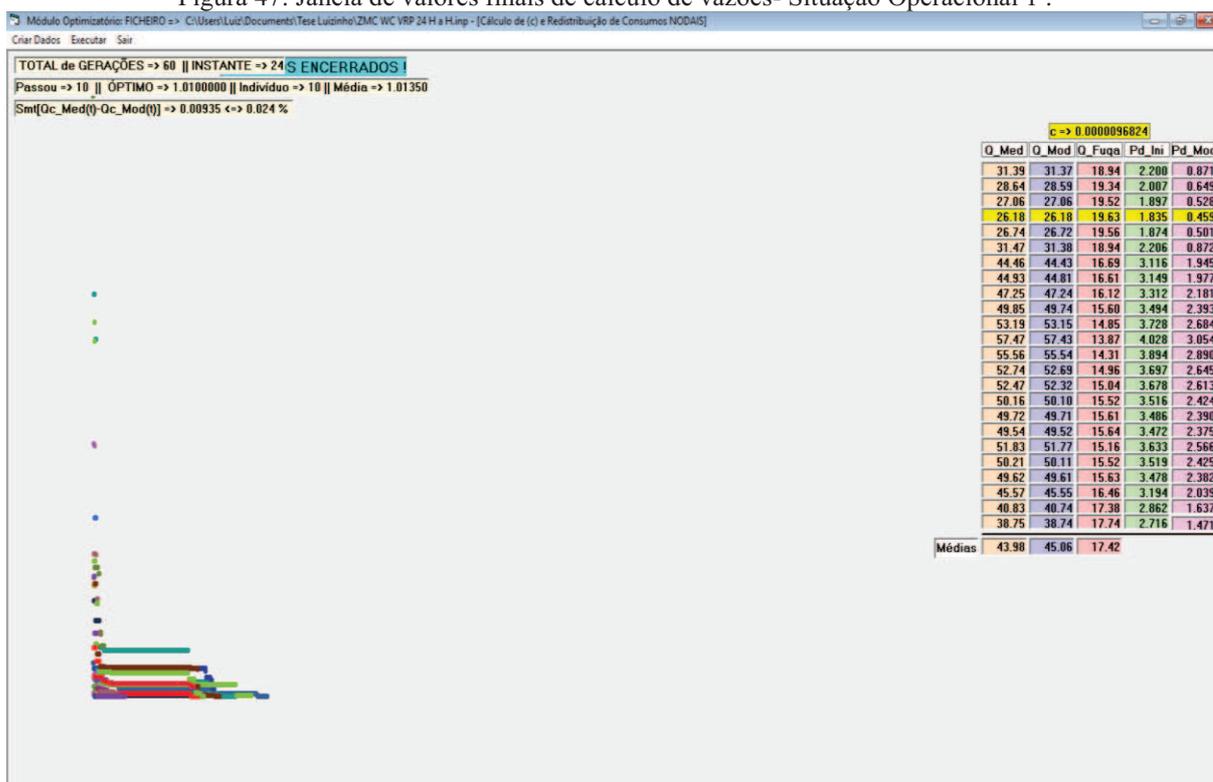
Dados para Simulação	
Número de Horas para Simulação	24
Valor para Expoente do Emissor	1,18
Porcentagem de Fuga (%)	20
Número do Trecho para Iniciar	1
Coef. de Vazão (c)	0000

Fonte: Fonte: Sistema SIG-Epanet- SAAE Guarulhos

5.2.1 Resultados da Estimativa de vazões Situação Operacional 1

As vazões de perdas físicas são calculadas a partir da vazão mínima noturna e expande o cálculo para as demais horas do dia, válidas para as situações operacionais 1 e 2. Na Figura 47, podemos ver a janela com a exibição dos valores e vazões de consumos efetivos e de perdas, calculados pelo módulo e no anexo 5 os valores de todos os fatores de consumo utilizados para o cálculo dos consumos efetivos a cada hora.

Figura 47: Janela de valores finais de cálculo de vazões- Situação Operacional 1 .



Fonte: Fonte: Sistema SIG-Epanet- SAAE Guarulhos

Na Figura 48 são mostrados os padrões de consumo usados para corrigir as vazões de base, com e sem perdas, obtidos através do módulo do algoritmo genético, os valores são apresentados no anexo 5.

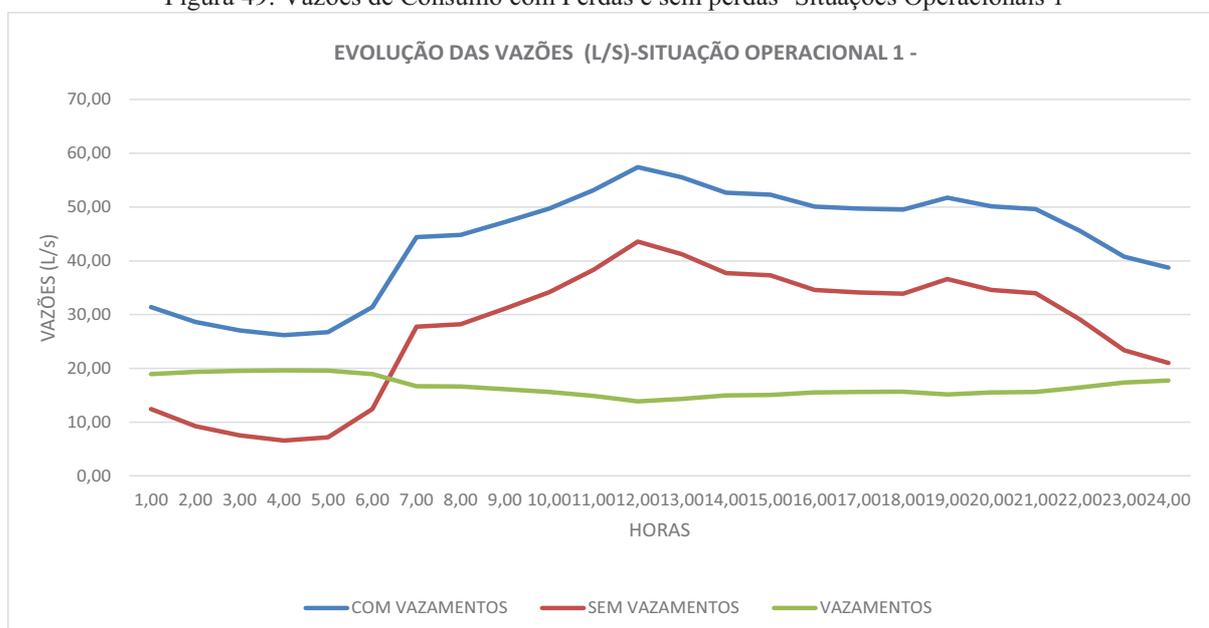
Figura 48: Padrões de Consumo com Perdas e sem perdas- Situação Operacional 1



Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

A partir dos padrões as vazões de perdas são calculadas. Na Figura 49 são mostradas a evolução das curvas de vazões de entrada, de consumo efetivo e de perdas de água, os valores são apresentados no anexo 6 em sua tabela 1.

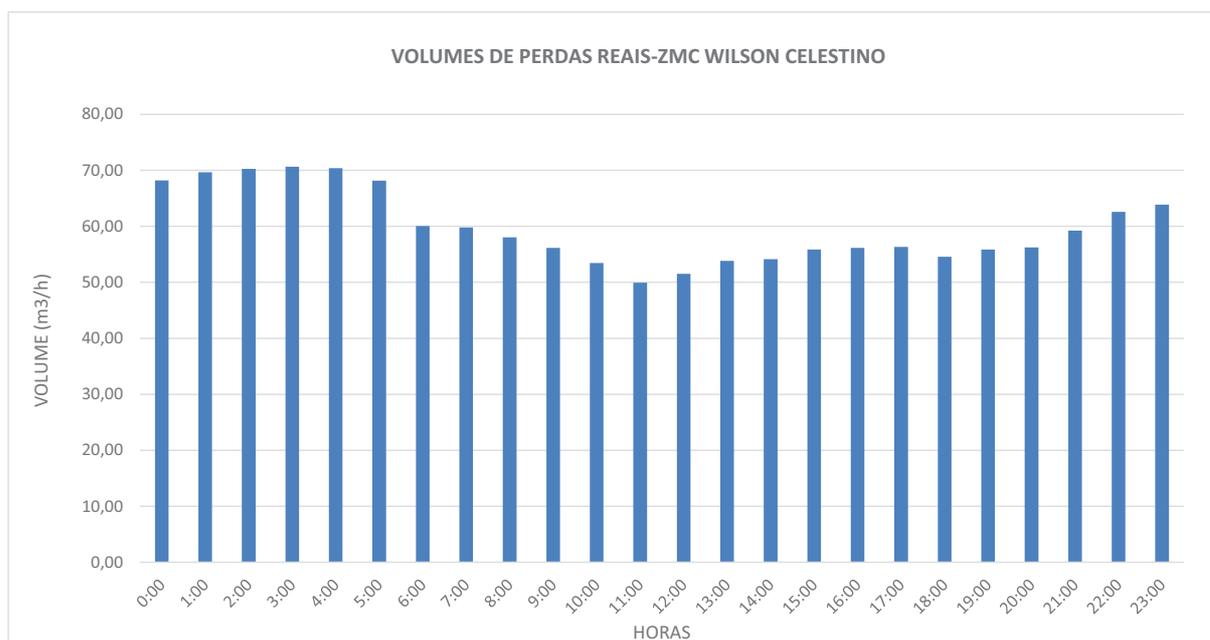
Figura 49: Vazões de Consumo com Perdas e sem perdas- Situações Operacionais 1



Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

Após a determinação das estimativas de perdas reais, é calculado o volume de perdas horário e finalmente totalizado, na ZMC estudada para a situação operacional 1 o volume total de perdas reais, cujo valor total foi de 1434,88 m³/dia

Figura 50: Volume de Perdas Reais- Situação Operacional 1-ZMC Wilson Celestino

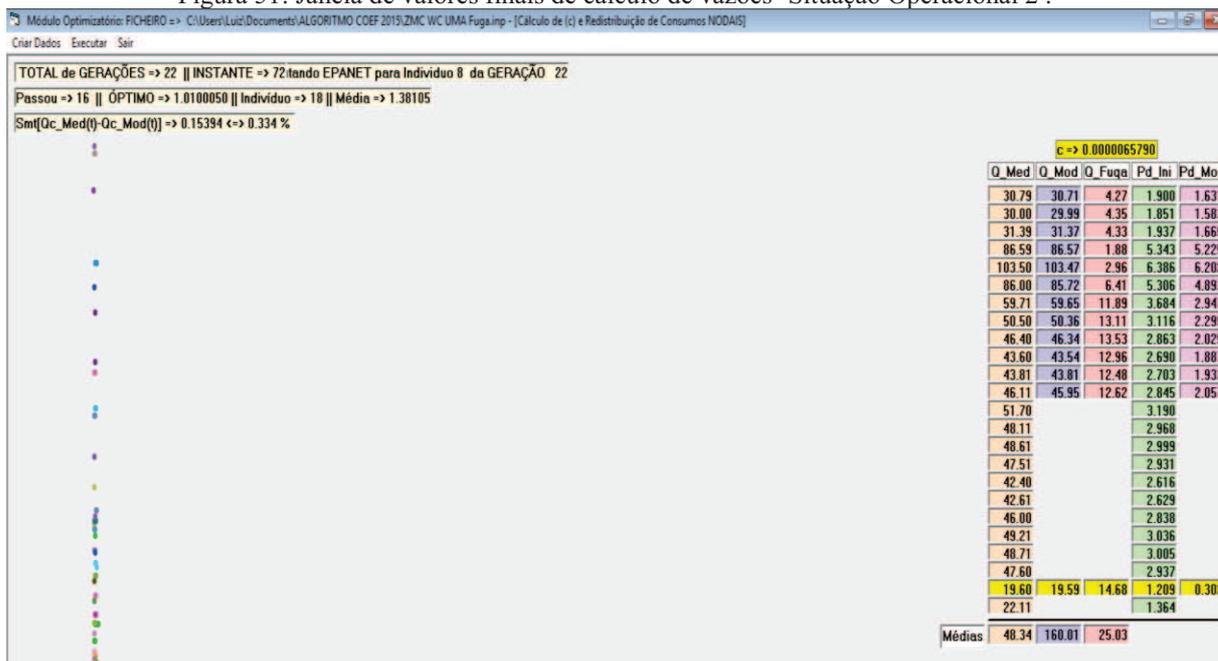


Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulho

5.2.2 Verificação do Funcionamento do Módulo Situação Operacional 2

Na Figura 51 é mostrada a entrada de dados de vazões de acordo com a curva de consumo obtida dos medidores de vazão na entrada da ZMC, na situação de operação de racionamento de água.

Figura 51: Janela de valores finais de cálculo de vazões- Situação Operacional 2 .



Fonte: Fonte: Sistema SIG-Epanet- SAAE Guarulhos

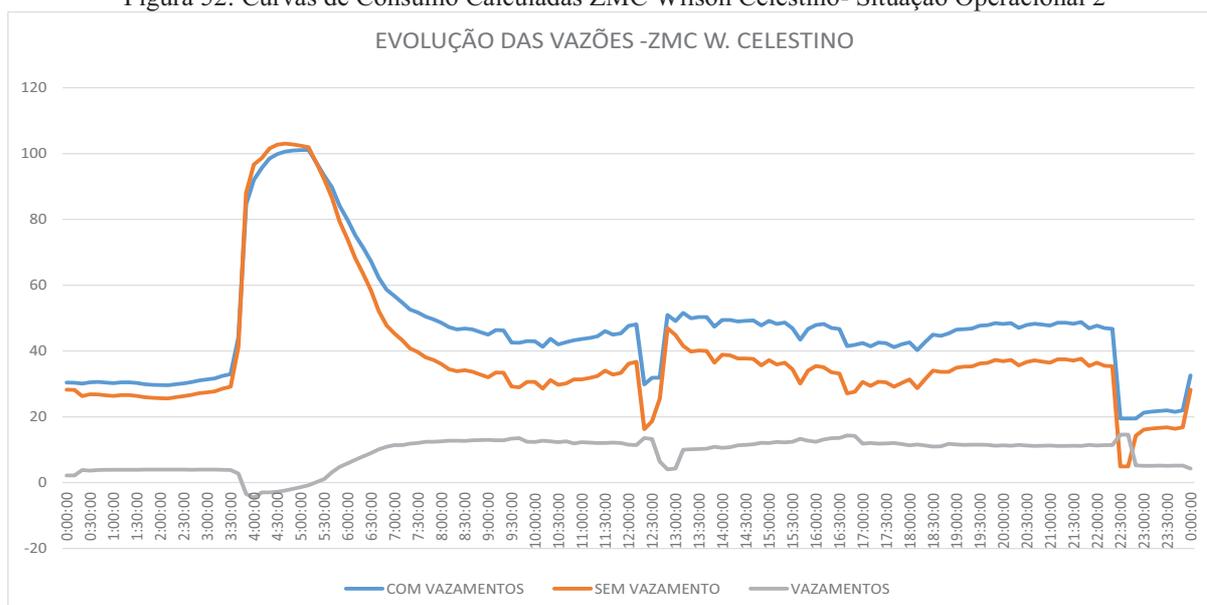
A seguir foi executada a mesma rotina de cálculo para a determinação das vazões de perdas, e foi possível observar, como mostra o gráfico da Figura 52, ao se iniciar o abastecimento do setor, operação realizada no final da madrugada entre cinco e seis horas da manhã, ocorre um valor muitas vezes superior a vazão normal de abastecimento devido as tubulações e reservatórios dos imóveis estarem todos.

O primeiro problema que foi verificado é uma perda de carga excessiva, em segundo lugar é verificado a ocorrência de pressões negativas, que tem como significado físico o não atendimento de algumas partes da rede, ocorrendo somente depois da redução da vazão.

Para a finalidade de totalização das perdas reais de água, este tipo de operação provoca uma anomalia, dada que as vazões de vazamentos variam com a pressão e está na abertura do sistema apresenta diversos nós com pressões negativas, chegam a valores de perdas negativos, o que obrigou a criar um filtro no programa para não contabilizar os volumes calculados.

Tal comportamento do modelo, pode ser notado no período das 12:00 às 13:30 horas, em que o setor de operações reduz a velocidade de rotação das bombas para recuperar o reservatório de distribuição, apesar de não ocorrerem vazões negativas se percebe uma redução que se aproxima do valor zero.

Figura 52: Curvas de Consumo Calculadas ZMC Wilson Celestino- Situação Operacional 2



Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

Na Figura 53 é mostrado gráfico com os volumes de perdas reais diários acumulados, que é emitido pelo módulo Epanet acoplado ao SIG SAAE Guarulhos, onde é evidenciado mais uma vez a ocorrência de vazões negativas.

Figura 53: Volume de Perdas Reais- Situação Operacional 1-ZMC Wilson Celestino



Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

O volume de perdas reais estimado pelo modelo para as condições de rede e pressão e consumos efetivos foi de 746,53 m³/dia

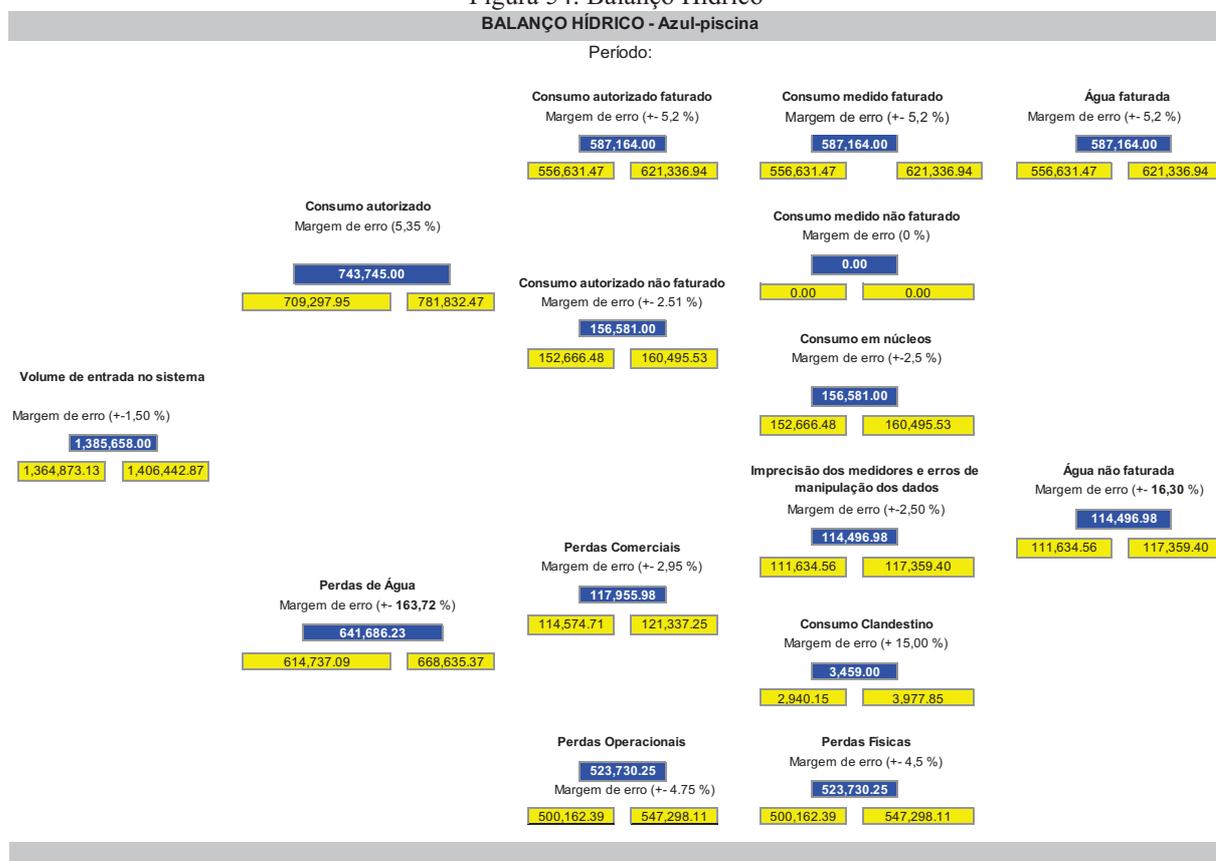
5.2.3 Balanço Hídrico ZMC Wilson Celestino

A determinação da estimativa de volumes de perdas reais é executada todos os dias, sendo que eventuais desvios da média, para cima, acionam um alarme automático para o responsável pela operação do setor para avaliar as ações necessárias para corrigir a anomalia.

Todos os valores de volumes são calculados e enviados para o SACP, aqui junto com as outras variáveis do sistema é construído o balanço hídrico, abaixo é apresentado o balanço hídrico mensal da ZMC estudada somente para efeito de verificar o funcionamento do método adotado, pois a emissão para análise do balanço hídrico deve ser anual, rotina esta, que já está inserida no SACP.

Abaixo na Figura 54 é apresentado o balanço hídrico emitido de forma automática pelo sistema SACP, onde os valores dentro dos quadros em azul são os valores medidos ou estimados pelo sistema, já os inseridos nos quadros em amarelo são os valores calculados levando-se em conta as incertezas, estas calculadas como o já relatado anteriormente em 2.7.

Figura 54: Balanço Hídrico



Fonte: SACP-SAAE Guarulhos

5.3 Otimização de Operação de Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs)

Outra aplicação desenvolvida por Araujo (2005), adaptada e aplicada no sistema SIG existente no SAAE Guarulhos é um algoritmo genético desenvolvido para otimizar junto com o programa Epanet a operação das VRPs existentes, bem como sugerir novas.

Para o funcionamento do módulo é necessário que o técnico, faça a locação de um número de VRPs que julgue necessário, para que seja selecionado o conjunto de válvulas. O conjunto que atingir o melhor desempenho, definido pelos valores médios de pressão na ZMC.

Além da seleção do conjunto é dado o melhor ponto de operação de cada uma das válvulas do conjunto, baseado em um critério de desempenho inserido nos dados de entrada, que para o caso são os valores de pressão resultante nos nós de consumo.

Na ZMC modelada, existem hoje instaladas 04 VRPs, que foram definidas através de modelagem, mas sem qualquer estudo de otimização das mesmas, os pontos de trabalho das mesmas são listados na Tabela 4 abaixo:

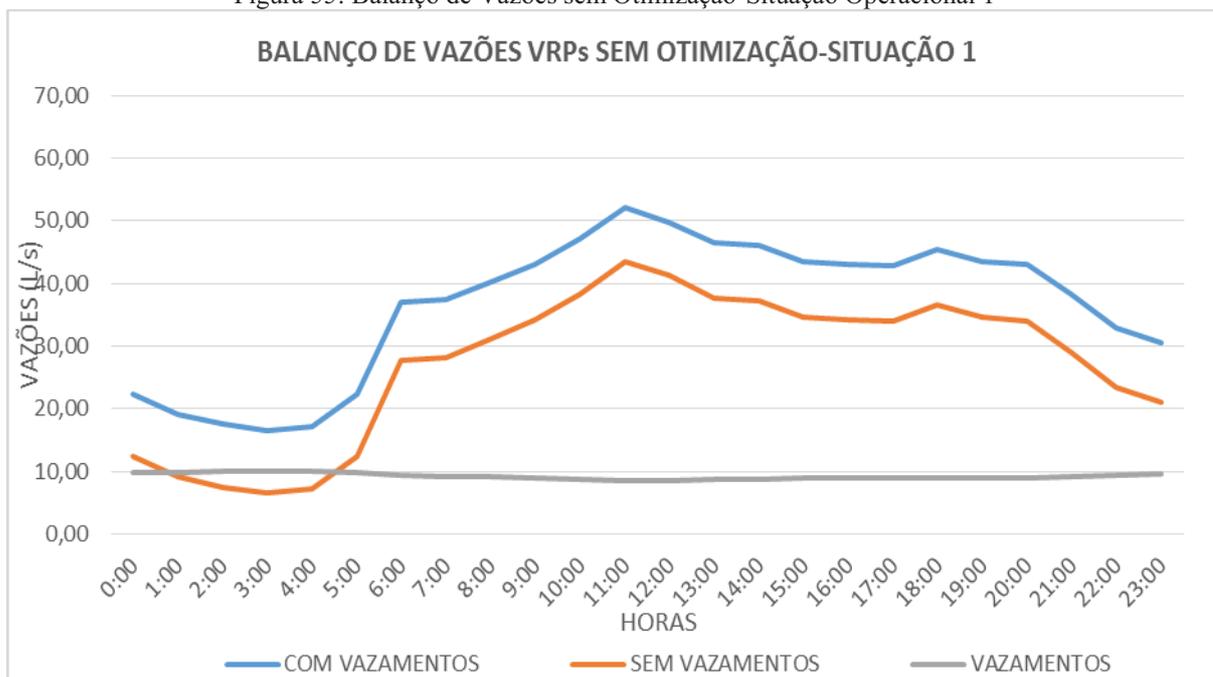
Tabela 4: Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) Existentes da ZMC Wilson Celestino

VRP	DIÂMETRO	PRESSÃO MONTANTE (MCA)	PRESSÃO JUSANTE (MCA)
09	80	45	23
12	150	53	20
15	80	38	17
16	80	29	14

Fonte: Sistema SIG SAAE Guarulhos

O efeito sobre as vazões de consumo e de perdas, provocado pelas VRPs existentes é mostrado na Figura 55.

Figura 55: Balanço de Vazões sem Otimização-Situação Operacional 1

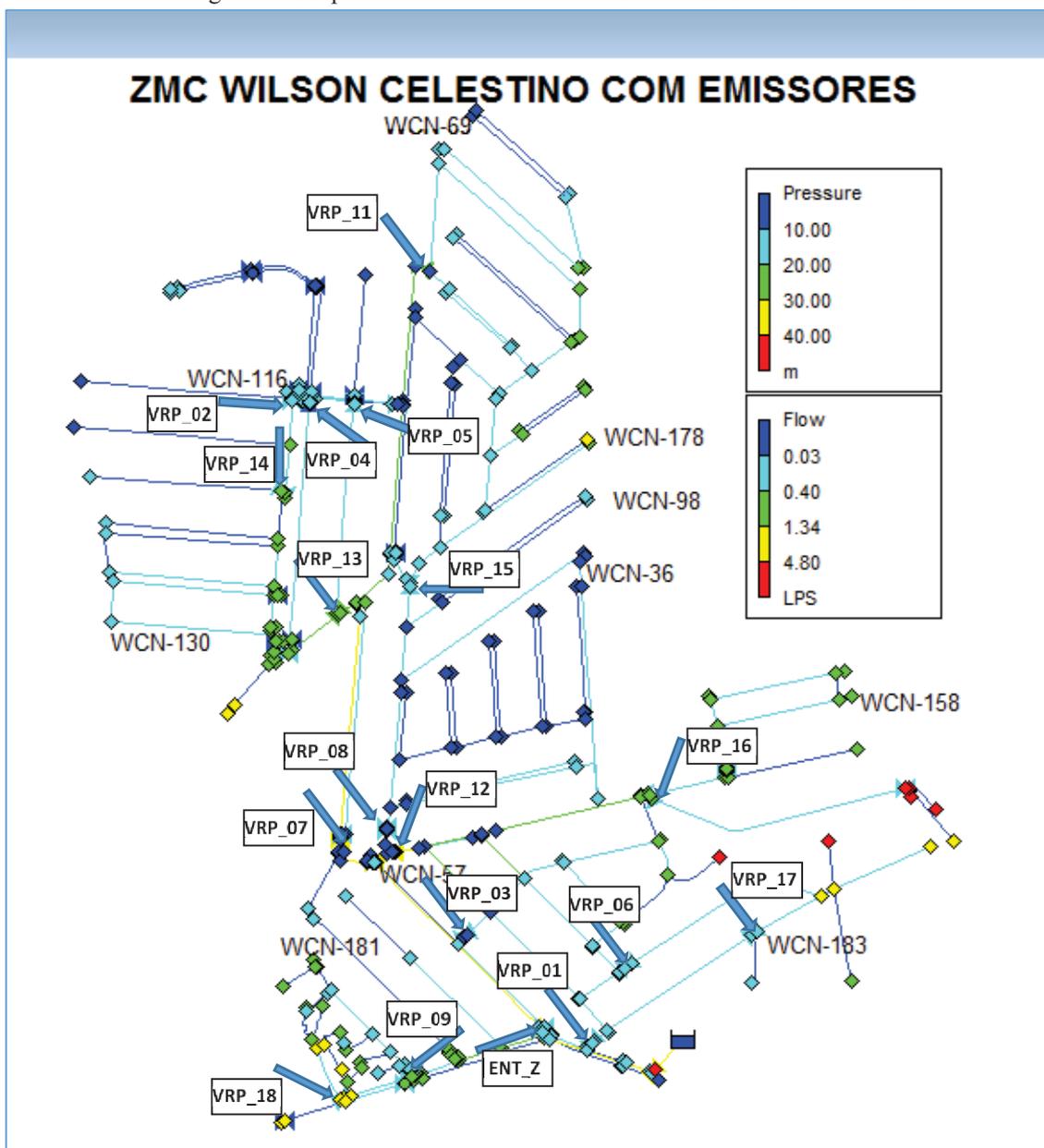


Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

Para testar o módulo, além das válvulas existentes foi proposta a instalação de mais 13 válvulas distribuídas por diversos pontos da ZMC Wilson Celestino, nas condições operacionais da situação 1 com a finalidade de verificar a possibilidade de otimização ou até o remanejamento das VRPs existentes e se há necessidade de instalar as que foram sugeridas, sendo que se for confirmada a necessidade quais seriam seus pontos de operacionais para produzir o melhor efeito sobre a redução de vazamentos.

A seguir na figura 56 é apresentada a ZMC citada com os pontos de válvulas existentes e sugeridos para teste no presente estudo. As mesmas válvulas adicionais foram testadas para as duas situações operações já citadas anteriormente.

Figura 56: Proposta Válvulas Redutoras de Pressão ZMC Wilson Celestino



Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

Com o posicionamento das válvulas o módulo procura estabelecer, a cada geração, as válvulas que produzam a melhor performance em relação a redução de pressão e por consequência redução de vazamentos, além de estabelecer os melhores pontos de trabalho das mesmas, e se realmente é necessário a instalação da VRP.

Na figura 57 é mostrada tela do módulo do algoritmo genético, que é utilizada para entrada dos parâmetros de otimização e os índices de eficiência a serem buscados pelo programa.

Figura 57: Tela de Entrada de Dados Módulo de Otimização

MÓDULO OPTIMIZAÇÃO DE VÁLVULAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO (MINIMIZAÇÃO DE PERDAS)

Criar Dados Executar Sair

Dados para Otimização

Dados para o Algoritmo Genético:

Número Máximo de Geração: 10000

Tamanho da População: 30

Comprimento da String para Cada Variável: 6

Probabilidade de Cruzamento (0,5 ↔ 0,95): 0,75

Probabilidade de Mutação (0,1 ↔ 0,001): 0,01

Aplicação de Elitismo (Sim ↔ Não): Sim

Constante de Escalonamento Linear (1 ↔ 2): 1,25

Cancelar

Salvar

Salvar e Executar

Dados para Simulação:

Duração da Simulação: 24

Hora para Iniciar a Simulação: 0

Nó para iniciar a Simulação: 1

Senário Global Senário Hora a Hora

Dados para o Gráfico de Eficiência:

Efi. Máx. 4

Pres. Mín. Efi. Máx. Pres. Máx. Efi. Máx.

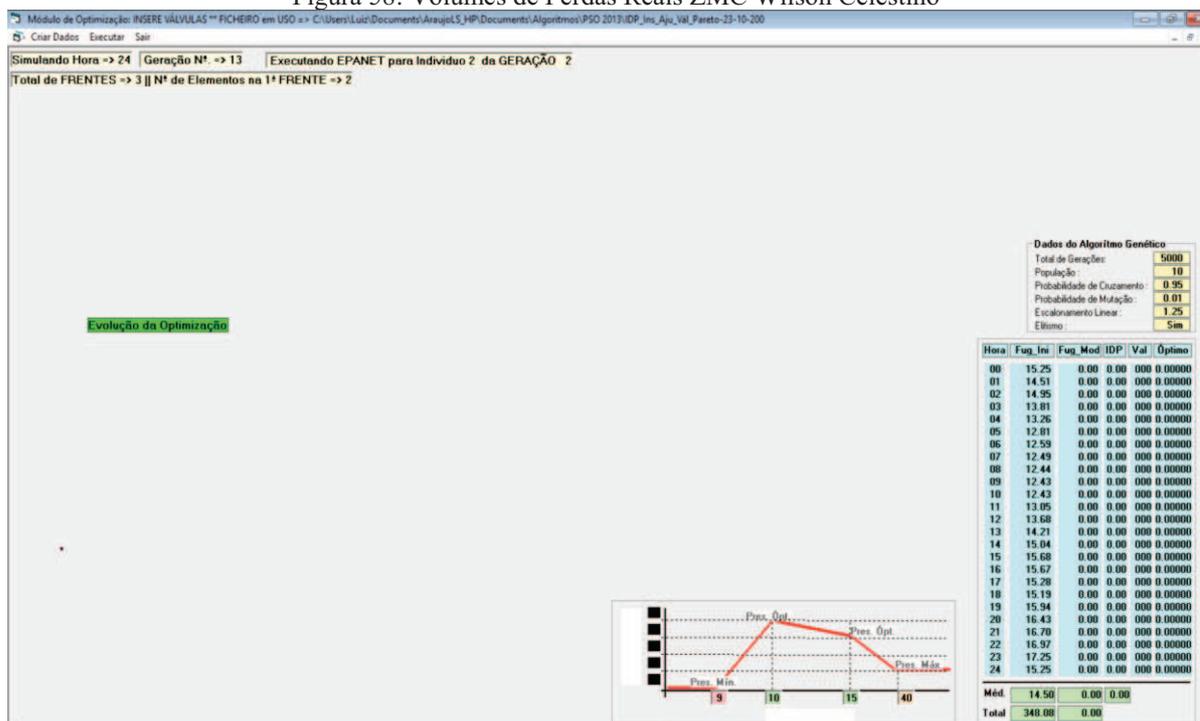
Efi. Mín. Pres. Mín. Efi. Mín. Pres. Máx. Efi. Mín.

9 10 15 40

Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

A tela de valores calculados de otimização das VRPs é mostrada na Figura 58, no quadro em azul da figura são listadas os valores obtidos de vazões de perdas reais de água com os controles de pressão propostos.

Figura 58: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino

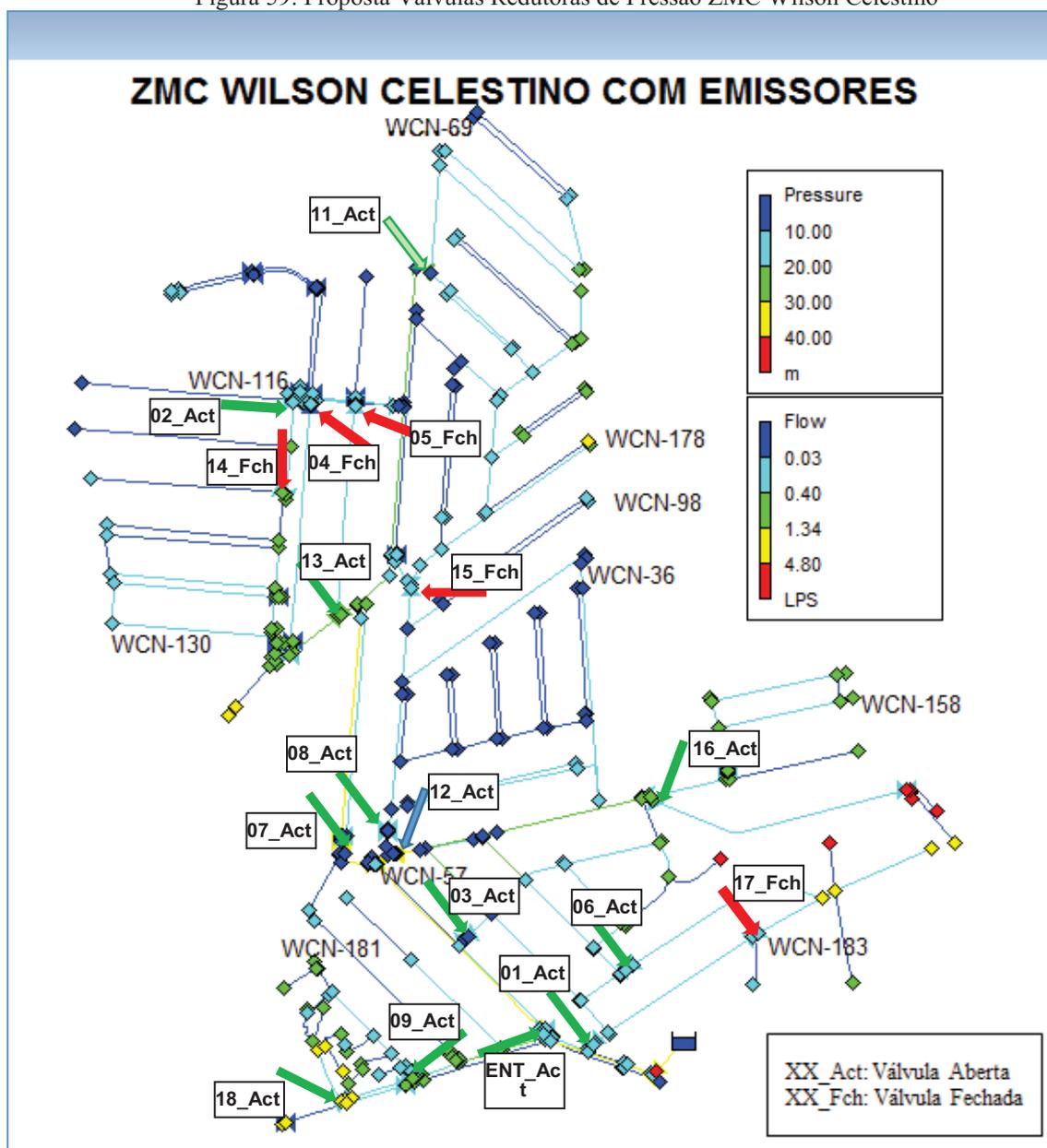


Fonte: Módulo SIG-Epanet, SAAE Guarulhos

As válvulas indicadas com setas em vermelho, não são necessárias, pois estão com indicação de fechadas, fisicamente no local deverão ser seccionadas os tubos ou instaladas válvulas para setorização das redes de abastecimento, já que o modelo indicou os pontos como de limite de setores de abastecimento de determinadas válvulas.

Como operacionais o módulo indicou 10 válvulas no total, que são as assinaladas com as setas em verde, sendo que 03 já existentes permaneceram em operação, com algumas alterações em seus pontos operacionais.

Figura 59: Proposta Válvulas Redutoras de Pressão ZMC Wilson Celestino



Fonte-SAAE Sistema SIG Epanet

A seguir na tabela 5 são apresentados os resultados das simulações realizadas no setor.

Tabela 5: Válvulas Redutoras de Pressão (VRPs) Sugeridas da ZMC Wilson Celestino

VRP	DIÂMETRO	PRESSÃO MONTANTE (MCA)	PRESSÃO JUSANTE (MCA)
01	80	43	16
02	80	27	13
03	80	34	12
06	80	28	18
07	80	31	14
08	80	23	11
09	80	45	19
10	80	31	14
11	80	48	22
12	150	53	14
13	80	35	21
16	80	42	18
18	80	29	14

Fonte: Sistema SIG SAAE Guarulhos

Com a otimização foi possível verificar uma alteração nos valores dos pontos de operação das VRPs 9, 12 e 16, reduzindo duas pressões de saída, e por consequência a redução das pressões nas redes de distribuição do setor. Já a de número 15 o módulo indicou sua desativação.

Para avaliar o resultado da utilização do módulo executou-se duas avaliações, a primeira a uma adaptação a partir dos índices de desempenho de Coelho (1999), com escala variando de 0 à 4, em função da pressão em que se dá o consumo. Na tabela 6 apresentamos a escala adotada para a elaboração dos gráficos.

Tabela 6: Escala de Desempenho- ZMC Wilson Celestino

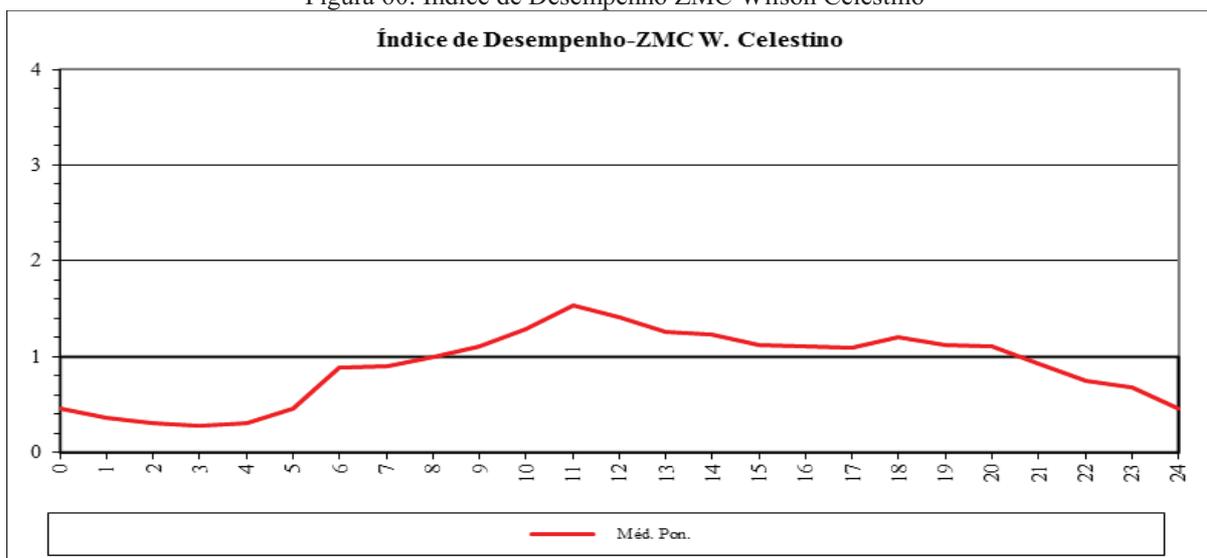
ESCALA	PRESSÃO NÓ DE CONSUMO
0-1- Inaceitável	Consumos com pressões inferiores à 10 mca e superiores à 40
1-2-Sofrível	Consumos com pressões inferiores à 40 mca e superiores à 30 mca
2-3-Aceitável	Consumos com pressões inferiores à 30 mca e superiores à 20 mca
3-4- Ótimo	Consumos com pressões inferiores à 20 mca e superiores à 10 mca

Fonte: Sistema SIG SAAE Guarulhos

A segunda avaliação na apuração dos possíveis volumes de recuperação de água com a otimização das VRPs.

Na Figura 60, é apresentada o desempenho do setor sem qualquer intervenção para reduzir as pressões. É possível notar que a ZMC estudada apresentava boa parte do tempo índices de desempenho de sofrível à inaceitável, cuja média era de 0,90, ao longo das 24 horas do dia, devido a prevalência de pressões com valores iguais ou superiores a 40 mca.

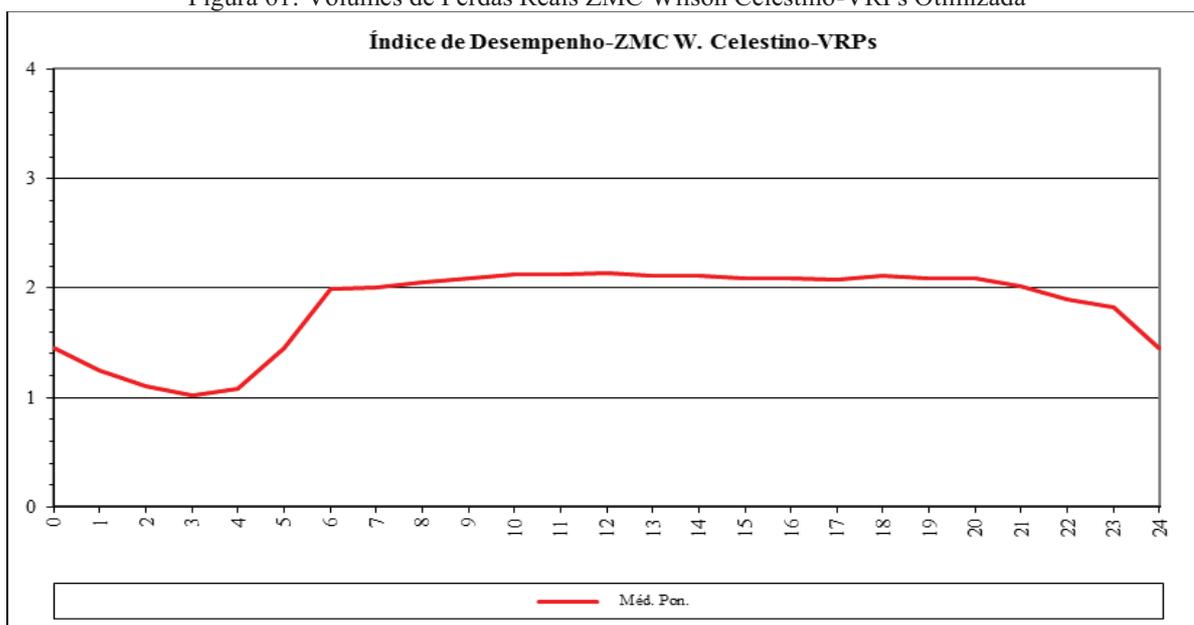
Figura 60: Índice de Desempenho ZMC Wilson Celestino



Fonte: Sistema SIG SAAE Guarulhos

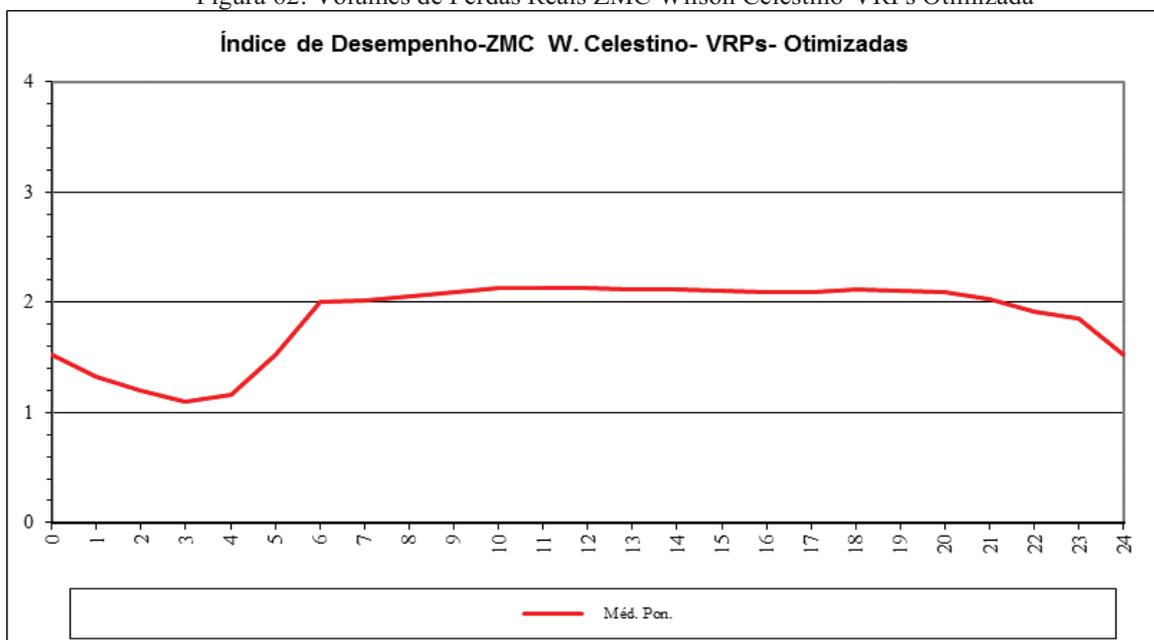
Na Figura 61, após a implantação de VRPs sem a utilização do módulo de otimização é notada uma melhora considerável do desempenho da rede, onde é verificado uma elevação do índice de desempenho médio para 1,83.

Figura 61: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino-VRPs Otimizada



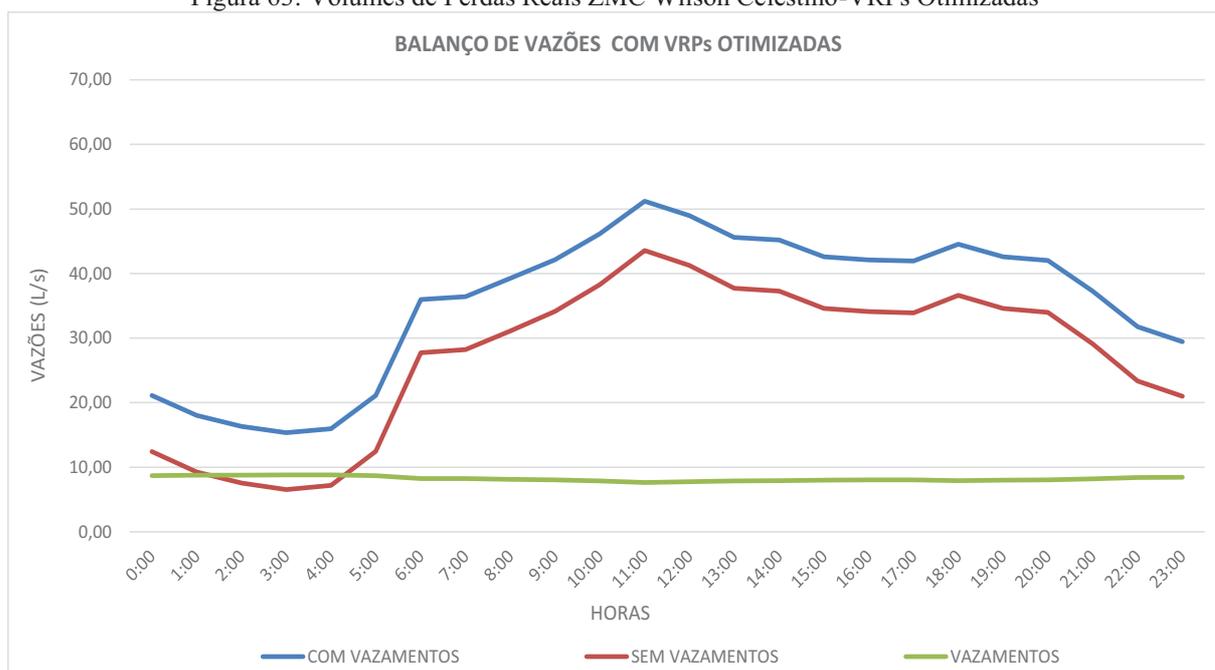
Na Figura 62, com a utilização do módulo de otimização foi possível elevar o índice de desempenho para 1,90.

Figura 62: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino-VRPs Otimizada



A seguir é apresentado os volumes de recuperação de água. Na Figura 63 é apresentado gráfico com as vazões após a otimização.

Figura 63: Volumes de Perdas Reais ZMC Wilson Celestino-VRPs Otimizadas



Fonte: Sistema SIG SAAE Guarulhos

Quanto aos resultados de perdas de água foi possível constatar que houve uma redução considerável ao compararmos os cenários sem inserção das válvulas redutoras e uma melhora na redução com a otimização da VRPs.

Tabela 7: Redução de Perdas Reais de Água ZMC Wilson Celestino

Situação	VAZÃO VAZAMENTO (L/s)	VOLUME DE PERDAS (m³/dia)	REDUÇÃO RELATIVA (%)
Sem redução de pressão	16,60	1434,88	-
Redução de pressão sem otimização	9,22	797,14	44,45
Redução de pressão após otimização	8,21	709,73	10,96

Fonte: Sistema SIG Epanet-SAAE Guarulhos

6 CONCLUSÃO

No levantamento dos requisitos necessários para a implementação da automação do cálculo de perdas reais, foi possível atender as solicitações indicadas pela literatura e também verificar a procedência de algumas observações feitas pelos autores, mas podemos levantar alguns outros pontos que não foram mencionados, a saber:

A manutenção da operação e da precisão dos medidores de vazão, quesito que costuma ser relegado pelas concessionárias e quando o fazem não seguem critérios rígidos de calibração.

A determinação da submedição do parque de micromedidores, que influencia diretamente o cálculo dos consumos base e da vazão mínima noturna;

Individualização do consumo de grandes usuários.

Os itens acima expostos foram levados em consideração na montagem do módulo de cálculo de estimativa de perdas reais desenvolvido, dentro do tempo disponível para esta pesquisa.

Quanto à determinação de estimativas dos volumes de perdas reais, a ferramenta demonstrou ser factível seu uso, ainda que demonstre algumas ressalvas que devam ser levadas em consideração, como na ocorrência de pressões negativas, seja por interrupção no abastecimento ou por alguma outra alteração nas condições operacionais, o que provocou a ocorrência de volumes negativos de perdas, sendo necessário prever no sistema um filtro para a não contabilização destes volumes.

Em relação aos resultados obtidos na simulação de operação das VRPs, com o uso do módulo de otimização em AG, acoplado ao Epanet, mostrou ser possível potencializar os ganhos da redução de perdas de água, com a instalação a até a desativação de válvulas redutoras de pressão, o ganho estimado foi de 80 m³/dia, embora possa parecer pequeno, quando aplicado a um número maior de ZMCs é potencializado. Ainda se comparado com o custo de produzir e transportar volumes adicionais ao sistema referentes às perdas, estes relacionados à infraestrutura e operação. A aplicação da adaptação de índices de desempenho aplicada na pesquisa, precisa ser adequada de forma a incorporar aspectos econômicos.

Não se pode esquecer que antes de sua utilização uma série de requisitos devem ser observados, o principal deles é referente a existência de técnicos com experiência suficiente para sua construção e análise dos resultados apurados pelo modelo. Pois a construção do mesmo é relativamente simples, mas a observância de quanto de representatividade existe entre o modelo construído e a realidade de campo requer treinamento e experiência do técnico.

A constatação acima explicita a dificuldade de se implantar tais modelos em larga escala em todos os concessionários de serviços de água e esgoto pelo Brasil, visto a carência de técnicos para a execução das mais simples tarefas do cotidiano da operação dos sistemas.

Outra colocação que se pode fazer é quanto ao custo de implantação de um sistema do tipo mostrado, apesar do simulador Epanet, ser um software gratuito e possuir uma imensa rede de colaboradores em seu aprimoramento pelo mundo, o trabalho de desenvolvimento de módulo e sua interligação com o sistema SIG teve um custo que para a maioria dos operadores públicos é proibitivo.

Além da utilização estudada os módulos customizados permitem, a utilização em diversos outros campos da operação de um SDA, tais como:

Redução do consumo de energia elétrica;

Prever impacto no sistema com grandes consumidores;

Permitir que as equipes de operação testem com rapidez e segurança alterações operacionais, sejam elas emergenciais ou não;

Com o modelo calibrado hidraulicamente, aplicar na qualidade de água.

Ferramenta para estudo do impacto de expansão do sistema.

Também foi possível observar que para melhorar a aplicação da ferramenta é necessária implantação e desenvolvimento das seguintes melhorias:

Desenvolver novos métodos para calibração dos modelos, utilizando algoritmos como o genético;

Necessidade de determinar como quantificar o número de pontos de medição de pressão para calibração do modelo;

Melhorar a velocidade de cadastramento das alterações executadas no sistema de distribuição;

Implementar rotina de determinação da submedição do parque de micro medidores;

Metodologia para manutenção e calibração da precisão dos macromedidores;

Introdução do cálculo do nível econômico de perdas;

Procurar agregar a operação do módulo a uma ferramenta de SIG que seja de uso livre, e que permita a adequação para realidade de cada concessionária.

Determinar a existência de trechos de redes subdimensionados;

A partir do estudo desenvolvido podemos vislumbrar como novas possibilidades de estudo quanto à aplicação do método nos seguintes campos:

Determinação de áreas com potencial de intrusão de efluentes nas redes de distribuição;

Com a introdução dos micromedidores com telemetria desenvolver modelos para localização de vazamentos;

Em razão do racionamento atual, modelar a redes que tenham a tendência de provocar o retrocesso da leitura dos submedidores;

O estudo desenvolvido e acrescido das mencionadas melhorias e novas observações que possam ser feitas por outros pesquisadores, permite um grande salto de qualidade dos na operação dos sistemas de abastecimentos de água, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos, na redução dos custos operacionais, bem como auxiliar na universalização dos serviços de saneamento no Brasil.

REFERÊNCIAS

AINOLA, L.; KOPPEL, T. & VASSILJEV, A. Complex approach to the water network model calibration and the leakage distribution. **Hydraulic Engineering Software VIII**, Ed. W. R. Blain & C. A. Brebbia, WIT Press, Southampton, Boston, p. 91-100, 2000.

AINOLA, L; KOPPEL, T; KANDLER, N. & VASSILIEV, A.(2001).– **Principle of locality and its Application to Eater Network Model Calibration** – Water Software Systems: Theory and Applications, Volume 1, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England, pp. 111 – 120.

ALEGRE, H. Modelos de simulação de sistemas de distribuição de água. **Métodos de avaliação e distribuição de consumos na rede**, Lisboa, LNEC, ITH 25, 1986.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J.M.; PARENA, R. Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. **Série guias técnicos nº 1**, Lisboa, LNEC, IRAR, 2004.

ALEGRE, H.; COELHO, S.T.; ALMEIDA, M.C; VIEIRA, P. Controle de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. **Série guias técnicos nº 3**, Lisboa, IRAR, 2005.

ALEGRE, H. et al., Performance indicators for water supply servicer. **Manual of best practice**, London, IWA Publishing, 2 ed., 389 p., 2006.

ARAÚJO, Luiz S. **Controlo de perdas na gestão sustentável dos sistemas de abastecimento de água**. 302 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005.

AWWA. **Water audits and leak detection**. 2. ed. Denver: American Water Works Association, 1999.

AWWA.; VALENTINE, Melissa. **Manual of water supply practices - M36**. 3. ed. Denver: IWWA, 2009. 285 p. v. 1.

BARBOSA, H. J. C. (1996) – **Algoritmos Genéticos para Otimização em Engenharia: Uma Introdução** – IV Seminário sobre Elementos Finitos e Métodos Numéricos em Engenharia, Juiz de Fora, Brasil

BEZERRA, S.T.M.; CHEUNG, P.B. **Perdas de água, tecnologias de controle**, João Pessoa, UFPB, 220 p., 2013.

BRASIL. Programa nacional de combate ao desperdício de água. **Documento técnico de apoio – DTA C3**, Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano, Brasília, v. n, n. n, 31 p., 1999.

BOULOS, P.F.; WOOD, D.J. Explicit calculation of pipe. **Network parameters**, ASCE, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.

BOULOS, P.F.; ORMSBEE, L.E. **Explicit network calibrations for multiple loading conditions**. Civil Engineering Systems, v. 8, p. 153-160, 1991.

CASTRO, R.E. (1999) – **Otimização** – Monografia apresentada a COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, fevereiro

Cesário, A.L. Computer modeling programs. **Tools for model operation**, Journal of the AWWA, v. 79, n. 9, p. 508-513, 1980.

COELHO, S.T. Um sistema para análise e previsão de consumos em sistemas de abastecimento de água. **Informação Científica de Hidráulica INCH 3**, Lisboa, LNEC, 116 p., 1990.

Coelho, S.T. & Alegre, H. (1999) – **Indicadores do Desempenho de Sistemas de Saneamento Básico** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, Lisboa.

COELHO, S.T.; LOUREIRO, D.; ALEGRE, H. **Modelagem e análise de sistemas de abastecimento de água**, Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 335 p., 2006.

CONAUT, Curso índice de Perdas e Confiabilidade Metrológica, São Paulo, 2014.

DE JONG, K.A. (1975) – **An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive System** – PhD. Thesis, University of Michigan, ANN Arbor, MIT.

FILITTO, D. **Algoritmos Genéticos: Uma visão explanatória**. Revista Multidisciplinar da UNIESP. Saber Acadêmico n. 06. São Paulo - SP, 2008.

GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P.W. **Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network**. Institution Civ. Engrs., n. 2, p. 195-214, 1989.

GOLDBERG, D.E. (1989) – **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning** – Adison-Wesley, USA.

GOLDBERG, D.E. (1994) – **Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age** – Communications of the ACM, vol. 37, nº 3.

GOLDBERG, D.E. (1985) – Alleles, Loci and the TSP – In: **Proceeding of the First International Conference on genetic Algorithms**, Hillsdade: Lawrence Erlbon Associates, pp. 161 – 165.

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias**. 2. ed. João Pessoa: UFPB, Editora Universitária, 2004. 242 p.

INMETRO. **Guia para a expressão da incerteza da medição**, INMETRO, ABNT, 3 ed. brasileira, agosto 2003.

JOWITT, P.W.; XU, C. Optimal valve control in water. **Distribution networks**, Journal of Water Resources Planning and Management, v. 116, n. 4, p. 455-472, 1990.

JOHNSON, E.H. **Case studies demonstrate the implications of metering errors**, IWA WATER LOSS 2012, Manila, 2012.

LAMBERT, A.; MYERS, S.; TROW, S. Managing Water Leakage: economic and technical issue. **Financial Times Energy**, London, 1998.

MARTÍNEZ, F.; SIGNES, R.; SAVALL, R.; ANDRÉS, M.; PONZ, R. & CONEJOS, P. **Construction and use of a dynamic simulation model for the valencia metropolitan water supply and distribution network**. Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England, v. 1, p. 155-174, 1999.

MIRANDA, C. M. **Avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água: Indicadores de perdas e metodologias para análise de confiabilidade**. 200 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2002.

MIRANDA, C. M. Gerenciamento de perdas de água, In: HEELER; L; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**, UFMG, Belo Horizonte, 2 ed., p. 801-828, 2010.

ORMSBEE, L.E. **Implicit network calibration**, Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), v. 115, n. 2, p. 243-257, 1989.

ORMSBEE, L.E. & LANSEY, K.E. **Optimal control of water supply pumping systems**, Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), v. 120, n. 2, p. 237-252, 1994.

ORMSBEE, L.E. & LINGIREDDY, S. **Calibrating hydraulic network models**, Journal of AWWA, v. 89, n. 2, p. 42-50, 1997.

ORMSBEE, L.E. & REDDY, S.L. **Nonlinear heuristic for pump operations**, Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE), v. 121, n. 4, p. 302-309, 1995.

ORMSBEE, L.E. & WOOD, D.J. **Hydraulic design algorithms for pipe network**, Journal of Hydraulic Engineering, v. 112, n. 12, p. 1195-1207, 1986a.

ORMSBEE, L.E. & WOOD, D.J. **Explicit pipe network calibration**, Journal of Water Resources Planning and Management, v. 112, n. 2, p. 166-182, 1986b.

OLIVEIRA, Djalma de Pinho Rebouças de. **Sistemas de informações gerenciais: estratégias táticas operacionais**. São Paulo: Editora Atlas, 2008. 12 ed. 299 p.

OLIVEIRA, H. A. **Uso de simuladores hidráulicos e aplicativos de geoprocessamento para diagnóstico operacional de sistemas de distribuição de água: estudo de caso: setor Sacomã, município de São Paulo**. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2011.

PALO, R.P.. **Avaliação da eficácia de modelos de simulação hidráulica na obtenção de informações para diagnóstico de perdas de água**. 169 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2010.

POZO, A; CAVALHEIRO,F; ISHIDA,C; RODRIGUES,E,M. **Computação Evolutiva**.-61 p.- Apostila –Universidade Federal d Paraná-UFPR-Curitiba-Pr-2007.

PINTO, T.M.V. **Modelagem e calibração de um sistema de abastecimento de água**. 48p Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, 2010.

ROSSMAN, L. (2002). Epanet 2.0 em Português – **Manual do Utilizador. Tradução e adaptação de D. Loureiro e S. T. Coelho. Manual, LNEC, Lisboa (241 pág.)**. Edição impressa: Manual do Utilizador do Epanet 2.0. Edições IRAR (Instituto Regulador de Águas e Resíduos), série IRAR-LNEC, Lisboa, 2004.

SÁ MARQUES, J.A.A.; CARDOSO, F.J.; SOUSA, J.J.; FRANCISCO, F.F. **H-NetCad: sistemas urbanos de abastecimento de água**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2000.

SÁ MARQUES, J.A.A. & SOUSA, J.J.O. **Hidráulica Urbana: sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais**. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2011. 3 ed.

SANTOS, A. C. N. **Estudo de calibração de uma rede de distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os algoritmos genéticos**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2010. 72 p.

SILVA, Fernando G.B. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos, 2003.

SOUZA, E. R. (2001). **Sistemas de Abastecimento de Água. Documentação de apoio a disciplina de Saneamento Ambiental**, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura; Secção de Hidráulica e dos Recursos Hídricos e Ambientais - Instituto Superior Técnico, Lisboa (2001).

SOUZA, J. J. O. **Métodos Numéricos para a Obtenção do Equilíbrio Hidráulico em Sistemas de Distribuição de Água**. Tese submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra (1996).

SNIS - **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 3 maio de 2014

TARDELLI FILHO, J. Controle e redução de perdas. In: TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**, São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 3 ed., p. 457-525, 2006.

TELLES, Dirceu D' Alkmin.; COSTA, Regina P.G. **Reúso da Água: Conceitos, Teorias e Práticas**. São Paulo: Blücher, 2007. 1.ed.

THORNTON, J.; STHURM, R.; KUNKEL, G. **Water loss control manual**, New York, Mc Graw-Hill, 632 p., 2 ed., 2008.

TODINI, E. & PILATI, S. A gradient algorithm for the analysis of pipe network. **Proc., Int. Conf. of Computer Applications for Water Supply and Distribution**, Leicester, United Kingdom, 1987.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A. & TERMINI, D. **Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation**, Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, n. 3, 1999.

TONETO JÚNIOR, R.; SAIANI, C.C., RODRIGUES, R.L. **Perdas de água: entraves ao**

avanço do saneamento básico e riscos de agravamento à escassez hídrica no Brasil. Ribeirão Preto: Fundace, 2013. 51 p.

TSUTIYA, M. T. **Redução dos custos de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental, 2001. 185 p.

VICENTINI, Liliansa Pedroso. **Componentes do balanço hídrico para avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água**. 196 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

INMETRO. Vocabulário internacional de metrologia. **Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**, Duque de Caxias, INMETRO, 94 P., 2012.

WALSKI, T.M. **Technique for calibrating network models**. J. Water Res. Plng and Mgmt, ASCE, v. 109, n.4, p.360-372, 1983.

WALSKI, T. M. **Case study: pipe network model calibration issues**, Journal of Water Resources Planning and Management, v. 112, n. 2, p. 238-249, 1986.

WALSKI, T.M; DEFRANK, N.; VOGLINO, T.; WOOD, R E WHITMAN, B.E. 2006. **Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models**. Disponível em < <http://Epanet.com/whitepapers.asp>>. Acessado em 01/set. de 2007.

WRC. **Water industry: managing leakage (Reports A to F)**, Engineering and Operations Committee, UK, 1994.

Ulanicka, K.; Bounds, P.; Ulanicki, B. & Rance, j. (2001) – **Pressure Control of a Large Scale Water Distribution Network with Interacting Water Sources – A Case Study – Water Software Systems: Theory and Applications**, Volume 2, Research Studies Press Lt

ANEXO 1 - ARQUIVO INP EPANET (REDE EXEMPLO)

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern	
10	44.8	0		;
15	9.8	1	3	;
20	39.3	0		;
35	3.8	1	4	;
40	40.2	0		;
50	35.5	0		;
60	0.0	0		;
61	0.0	0		;
101	12.8	11.98		;
103	13.1	8.4		;
105	8.7	8.54		;
107	6.7	3.45		;
109	6.2	14.60		;
111	3.0	8.96		;
113	0.6	1.26		;
115	4.3	3.29		;
117	4.1	7.43		;
119	0.6	11.11		;
120	0.0	0		;
121	-0.6	2.63		;
123	3.4	1	2	;
125	3.4	2.88		;
127	17.1	1.11		;
129	15.5	0		;
131	1.8	2.7		;
139	9.4	0.37		;
141	1.2	0.62		;
143	-1.4	0.39		;
145	0.3	1.74		;
147	5.6	0.54		;
149	4.9	1.71		;
151	10.2	9.12		;
153	20.2	2.79		;
157	4.0	3.27		;
159	1.8	2.61		;
161	1.2	1.00		;
163	1.5	0.59		;
164	1.5	0.00		;
166	-0.6	0.16		;
167	-1.5	0.92		;
169	-1.5	0		;
171	-1.2	2.48		;
173	-1.2	0		;
177	2.4	3.67		;
179	2.4	0		;
181	2.4	0		;
183	3.4	0		;
184	4.9	0		;
185	4.9	1.62		;
187	3.8	0		;
189	1.2	6.81		;
191	7.6	5.17		;
193	5.5	4.50		;
195	4.7	0.00		;
197	7.0	1.08		;
199	-0.6	7.53		;

201	0.03	2.81		;
203	0.6	1	5	;
204	6.4	0.00		;
205	6.4	4.12		;
206	0.3	0.00		;
207	2.7	4.38		;
208	4.9	0.00		;
209	-0.6	0.05		;
211	2.1	0.55		;
213	2.1	0.88		;
215	2.1	5.82		;
217	1.8	1.53		;
219	1.2	2.61		;
225	2.4	1.44		;
229	3.2	4.05		;
231	1.5	1.04		;
237	4.3	0.98		;
239	4.0	2.81		;
241	4.0	0.00		;
243	4.3	0.27		;
247	5.5	4.44		;
249	5.5	0.00		;
251	9.1	1.52		;
253	11.0	3.44		;
255	8.2	2.55		;
257	5.2	0		;
259	7.6	0		;
261	0	0		;
263	0	0		;
265	0	0		;
267	6.4	0		;
269	0	0		;
271	1.8	0		;
273	2.4	0		;
275	3.0	0		;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern	
Rio	67.1		;
Lago	50.90		;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol
VolCurve						
1	40.2	4.0	.03	9.8	26	0
2	35.5	7.2	2.0	12.3	15	0 ;
3	39.3	8.8	1.2	10.8	50	0 ;

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss
Status						
20	3	20	30	2500	200	0 Open
40	1	40	30	2500	200	0 Open
50	2	50	30	2500	200	0 Open
60	Rio	60	375	600	140	0 Open
101	10	101	4328	450	110	0 Open
103	101	103	411	400	130	0 Open
105	101	105	774	300	130	0 Open
107	105	107	448	300	130	0 Open
109	103	109	1201	400	130	0 Open

111	109	111	610	300	130	0	Open
112	115	111	354	300	130	0	Open
113	111	113	512	300	130	0	Open
114	115	113	610	200	130	0	Open
115	107	115	594	200	130	0	Open
116	113	193	506	300	130	0	Open
117	263	105	831	300	130	0	Open
119	115	117	664	300	130	0	Open
120	119	120	223	300	130	0	Open
121	120	117	570	300	130	0	Open
122	121	120	625	200	130	0	Open
123	121	119	610	750	141	0	Open
125	123	121	457	750	141	0	Open
129	121	125	283	600	130	0	Open
131	125	127	988	600	130	0	Open
133	20	127	239	500	130	0	Open
135	127	129	274	600	130	0	Open
137	129	131	1975	400	130	0	Open
145	129	139	838	200	130	0	Open
147	139	141	625	200	130	0	Open
149	143	141	427	200	130	0	Open
151	15	143	503	200	130	0	Open
153	145	141	1070	300	130	0	Open
155	147	145	671	300	130	0	Open
159	147	149	268	300	130	0	Open
161	149	151	311	200	130	0	Open
163	151	153	357	300	130	0	Open
169	125	153	1390	200	130	0	Open
171	119	151	1055	300	130	0	Open
173	119	157	634	750	141	0	Open
175	157	159	887	750	141	0	Open
177	159	161	610	750	141	0	Open
179	161	163	131	750	141	0	Open
180	163	164	46	350	130	0	Open
181	164	166	149	350	130	0	Open
183	265	169	180	750	141	0	Open
185	167	169	18	200	130	0	Open
186	187	204	30	200	130	0	Open
187	169	171	387	750	141	0	Open
189	171	173	15	750	141	0	Open
191	271	171	232	600	130	0	Open
193	35	181	9	600	130	0	Open
195	181	177	9	300	130	0	Open
197	177	179	9	300	130	0	Open
199	179	183	64	300	130	0	Open
201	40	179	363	300	130	0	Open
202	185	184	30	200	130	0	Open
203	183	185	155	200	130	0	Open
204	184	205	1381	300	130	0	Open
205	204	185	404	300	130	0	Open
207	189	183	411	300	130	0	Open
209	189	187	152	200	130	0	Open
211	169	269	197	300	130	0	Open
213	191	187	780	300	130	0	Open
215	267	189	375	300	130	0	Open
217	191	193	158	300	130	0	Open
219	193	195	110	300	130	0	Open
221	161	195	701	200	130	0	Open
223	197	191	351	300	130	0	Open
225	111	197	850	300	130	0	Open

229	173	199	1219	600	141	0	Open
231	199	201	192	600	141	0	Open
233	201	203	37	600	130	0	Open
235	199	273	221	300	130	0	Open
237	205	207	366	300	130	0	Open
238	207	206	137	300	130	0	Open
239	275	207	436	300	130	0	Open
240	206	208	155	300	130	0	Open
241	208	209	270	300	130	0	Open
243	209	211	369	400	130	0	Open
245	211	213	302	400	130	0	Open
247	213	215	1306	400	130	0	Open
249	215	217	506	400	130	0	Open
251	217	219	625	350	130	0	Open
257	217	225	475	300	130	0	Open
261	213	229	671	200	130	0	Open
263	229	231	597	300	130	0	Open
269	211	237	634	300	130	0	Open
271	237	229	241	200	130	0	Open
273	237	239	155	300	130	0	Open
275	239	241	11	300	130	0	Open
277	241	243	671	300	130	0	Open
281	241	247	136	250	130	0	Open
283	239	249	131	300	130	0	Open
285	247	249	3	300	130	0	Open
287	247	255	424	250	130	0	Open
289	50	255	282	250	130	0	Open
291	255	253	335	250	130	0	Open
293	255	251	335	200	130	0	Open
295	249	251	442	300	130	0	Open
297	120	257	197	200	130	0	Open
299	257	259	107	200	130	0	Open
301	259	263	427	200	130	0	Open
303	257	261	427	200	130	0	Open
305	117	261	197	300	130	0	Open
307	261	263	107	300	130	0	Open
309	265	267	482	200	130	0	Open
311	193	267	357	300	130	0	Open
313	269	189	197	300	130	0	Open
315	181	271	79	600	130	0	Open
317	273	275	680	200	130	0	Open
319	273	205	197	300	130	0	Open
321	163	265	366	750	141	0	Open
323	201	275	91	300	130	0	Open
325	269	271	393	200	130	0	Open
329	61	123	13868	750	140	0	Open
330	60	61	1	750	140	0	Closed

[PUMPS]

```

;ID      Node1      Node2      Parameters
10       Lago        10         HEAD 1 ;
335      60          61         HEAD 2 ;

```

[VALVES]

```

;ID      Node1      Node2      Diameter  Type Setting  MinorLoss

```

[TAGS]

[DEMANDS]

```

;Junction Demand  Pattern  Category

```

[STATUS]

;ID Status/Setting
10 Closed

[PATTERNS]

;ID Multipliers

;Padrão Geral de Consumo por Defeito

1	1.34	1.94	1.46	1.44	.76	.92
1	.85	1.07	.96	1.1	1.08	1.19
1	1.16	1.08	.96	.83	.79	.74
1	.64	.64	.85	.96	1.24	1.67

;Padrão de Consumo para o Nó 123

2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	76.96
2	0.00	0.00	0.00	117.80	115.91	114.77
2	114.77	115.03	115.03	114.71	115.15	114.65
2	115.72	114.71	115.53	114.52	116.16	117.36

;Padrão de Consumo para o Nó 15

3	39.14	39.14	39.14	39.14	39.14	22.73
3	22.73	0.00	0.00	0.00	0.00	22.73
3	22.73	22.73	22.73	22.73	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	22.73	22.73

;Padrão de Consumo para o Nó 35

4	103.35	107.70	108.52	108.52	113.07	114.84
4	112.18	116.29	114.58	115.21	117.17	113.70
4	114.84	109.41	105.05	102.27	101.83	102.27
4	102.02	103.98	102.71	102.71	105.49	105.30

;Padrão de Consumo Nó 203

5	280.24	286.05	284.79	289.27	286.05	289.27
5	288.64	291.22	293.12	293.12	289.90	291.22
5	286.05	285.42	280.87	280.24	280.87	281.57
5	280.24	278.98	275.76	277.71	282.20	282.83

[CURVES]

;ID X-Value Y-Value

;PUMP: Bomba: Curva Característica para a Bomba 10 (Origem - Lago)

1	0	31.7
1	126.	28.
1	252.	19.2

;PUMP: Bomba: Curva Característica para a Bomba 335 (Origem - Rio)

2	0	61
2	505	42.1
2	883	26.2

[CONTROLS]

;A captação de água a partir do lago é efectuada apenas durante uma parte do dia

Link 10 OPEN AT TIME 1

Link 10 CLOSED AT TIME 15

Link 335 OPEN IF Node 1 BELOW 5.2

Link 335 CLOSED IF Node 1 ABOVE 5.8

Link 330 CLOSED IF Node 1 BELOW 5.2

Link 330 OPEN IF Node 1 ABOVE 5.8

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency 75
Global Price 0.0
Demand Charge 0.0

[EMITTERS]

;Junction Coefficient

[QUALITY]

;Node InitQual

[SOURCES]

;Node Type Quality Pattern

[REACTIONS]

;Type Pipe/Tank Coefficient

[REACTIONS]

Order Bulk 1
Order Wall 1
Global Bulk 0.0
Global Wall 0.0
Limiting Potential 0.0
Roughness Correlation 0.0

[MIXING]

;Tank Model

[TIMES]

Duration 24:00
Hydraulic Timestep 1:0
Quality Timestep 0:05
Pattern Timestep 1:00
Pattern Start 0:00
Report Timestep 1:0
Report Start 0:00
Start ClockTime 12 am
Statistic NONE

[REPORT]

Status Yes
Summary No
Page 0

[OPTIONS]

Units LPS
Headloss H-W
Specific Gravity 1.0
Viscosity 1.0
Trials 40
Accuracy 0.001
Unbalanced Continue 10
Pattern 1
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 1.18
Quality Trace Lago
Diffusivity 1.0
Tolerance 0.01

[COORDINATES]

Node	X-Coord	Y-Coord
10	9.00	27.85
15	38.57	23.83
20	29.44	26.91
35	25.46	10.52
40	27.02	9.81
50	33.01	3.01
60	23.90	29.94
61	23.71	29.03
101	13.81	22.94
103	12.96	21.31
105	16.97	21.28
107	18.45	20.46
109	17.64	18.92
111	20.21	17.53
113	22.04	16.61
115	20.98	19.18
117	21.69	21.28
119	23.70	22.76
120	22.08	23.10
121	23.54	25.50
123	23.37	27.31
125	24.59	25.64
127	29.29	26.40
129	30.32	26.39
131	37.89	29.55
139	33.28	24.54
141	35.68	23.08
143	37.47	21.97
145	33.02	19.29
147	30.24	20.38
149	29.62	20.74
151	28.29	21.39
153	28.13	22.63
157	24.85	20.16
159	23.12	17.50
161	25.10	15.28
163	25.39	14.98
164	25.98	15.14
166	26.48	15.13
167	25.88	12.98
169	25.68	12.74
171	26.65	11.80
173	26.87	11.59
179	25.71	10.40
181	25.72	10.74
183	25.45	10.18
184	25.15	9.52
185	25.01	9.67
187	23.64	11.04
189	24.15	11.37
191	22.10	14.07
193	22.88	14.35
195	23.18	14.72
197	20.97	15.18
199	29.42	8.44
201	30.89	8.57
203	31.14	8.89
204	23.80	10.90

205	29.20	6.46
206	31.66	6.64
207	31.00	6.61
208	32.54	6.81
209	33.76	6.59
211	34.20	5.54
213	35.26	6.16
215	39.95	8.73
217	42.11	8.67
219	44.86	9.32
225	43.53	7.38
229	36.16	3.49
231	38.38	2.54
237	35.37	3.08
239	35.76	2.31
241	35.87	2.11
243	37.04	0.00
247	35.02	2.05
249	35.02	1.81
251	34.15	1.10
253	32.17	1.88
255	33.51	2.45
257	21.17	23.32
259	20.80	23.40
261	20.79	21.45
263	20.32	21.57
265	25.39	13.60
267	23.38	12.95
269	25.03	12.14
271	25.97	11.00
273	29.16	7.38
275	31.07	8.29
Rio	24.18	30.53
Lago	7.53	27.11
1	27.40	9.93
2	32.99	3.45
3	29.41	27.27

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
330	23.67	29.79
330	23.56	29.31

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
24.92	30.92	"Rio"
8.42	29.91	"Lago"

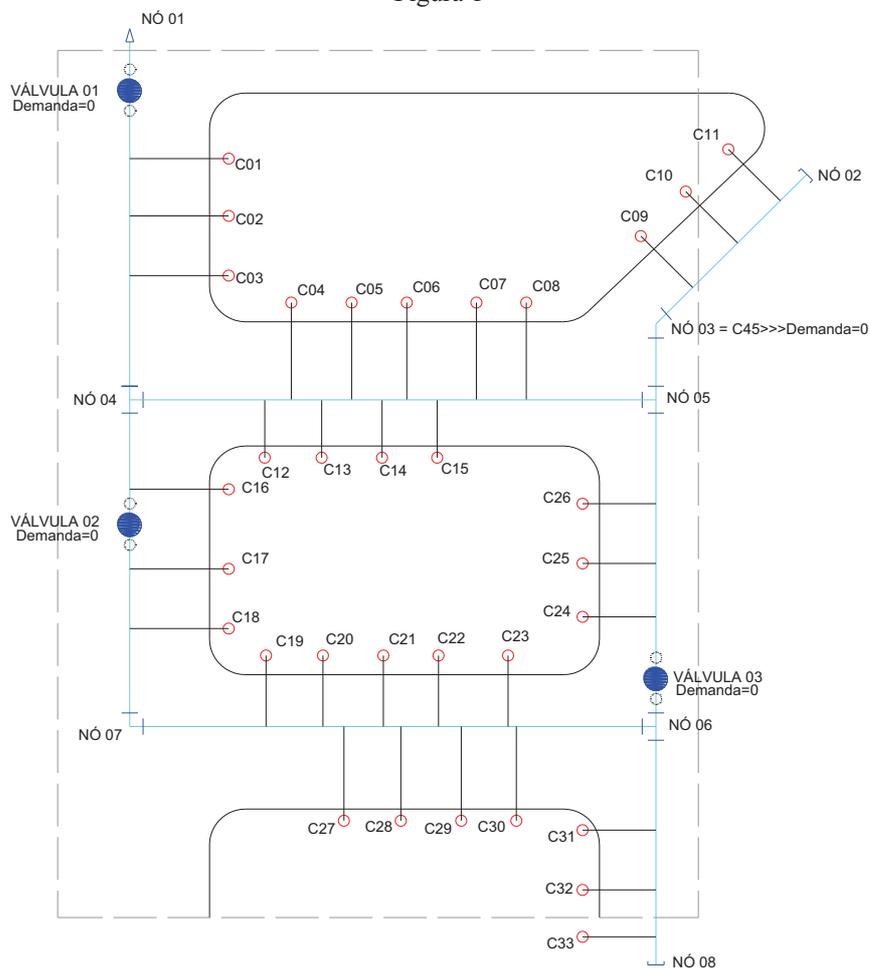
[BACKDROP]

DIMENSIONS	6.16	-1.55	46.70	32.61
UNITS	None			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

[END]

ANEXO 2 - EXEMPLO DE CÁLCULO DE DEMANDA PARA ILUSTRAÇÃO A SEGUIR

Figura 1



Conforme requisitos, o usuário deverá selecionar uma área de interesse, aleatória ou um polígono existente no SIG (ZMC ou Setor de Abastecimento), e informar o consumo total (macro medido) da área de interesse...O programa deve incluir na exportação os "Nós" de extremidade das redes "cortadas" pela seleção). Exemplo Nó 01, Nó 02 e Nó 08 da ilustração estão fora do tracejado que representa um limite de interesse.

O consumo micro medido do SCOM será utilizado apenas como referência para determinar uma ponderação do consumo total (macro medido) entre os nós da área de interesse.

Para o exemplo de cálculo de demanda da ilustração apresentada assumiu-se que:

Consumo por ligação = 120 m³/ano (Serão utilizados os últimos doze meses de consumo do SCOM);

Consumo Macro Medido = 400 m³/mês, os dados serão obtidos a partir usuário pelo banco de dados SCADA, cujos dados tem sua origem nas medições dos macro medidores instalados em campo

O usuário deve ficar atento, pois a unidade de medida apresentada do arquivo INP será igual àquela dada como entrada. Ex. m³/mês, m³/h, l/s, etc.

Assim, têm-se:

\sum Consumo SCOM na área de interesse (C1...C33) = 120*33= 3960 m³ (Será a soma de consumo do SCOM de todas as ligações associadas as redes englobadas pela seleção de interesse - mesmo que localizadas fora do polígono de seleção mas associadas as redes "cortadas" - (Exemplo: As ligações C11 e C10, serão incluídas pois devem estar associadas no TB ao trecho de rede entre os Nós 02 e 03, bem como a ligação C33 que estar entre os Nós 06 e 08).

Fator de Demanda NÓ-01 - Será igual a metade da demanda do trecho compreendido entre os Nós 01 e 04 dividido pelo somatório do consumo do SCOM (\sum Consumo SCOM), ou seja:

$$\text{Fator de Demanda NÓ-01} (F = \frac{(\text{Consumo de C01} + \text{Consumo de C02} + \text{Consumo de C03})/2}{\sum \text{Consumo SCOM}})$$

$$\text{Fator de Demanda NÓ-01} = \frac{(120+120+120)/2}{3960} = 0,045454545$$

Obs.: A demanda a ser informada no arquivo INP será o "Fator de demanda no Nó", multiplicado pelo "Consumo macro medido".

Assim, a Demanda do NÓ-01 = **Fator de Demanda NÓ-01 * Consumo Macro-Medido**

$$\text{Demanda do NÓ-01} = 0,0454545... * 400$$

$$\text{Demanda do NÓ-01} = \mathbf{18,18 \text{ m}^3/\text{mês}}$$

Fator de Demanda NÓ-04 - Será igual a **metade** da demanda dos trechos compreendidos entre os Nós 01-04 , 04-05 e 04-07, divida pelo somatório do consumo do SCOM , ou seja:

$$\text{Demanda Trecho 01 - 04} \gg 03 \text{ ligações} = 360 \text{ m}^3$$

$$\text{Demanda Trecho 04 - 05} \gg 09 \text{ ligações} = 1080 \text{ m}^3$$

Demanda Trecho 04 - 07 >> 03 ligações = 360 m³

Total de Trechos 01 - 04, 04 - 05 e 05 - 07 = 1800 m³

Logo,

$$\text{Fator de Demanda Nó - 04} >> \frac{(1800/2)}{3960} = 0,2272727272\dots$$

Demanda do Nó - 01 = 0,2272727272... * 400

Demanda do Nó - 04 = 90,90 m³/mês

E sucessivamente

$$\text{Fator de Demanda Nó - 05} >> \frac{(1800/2)}{3960} = 0,2272727272\dots$$

Demanda do Nó - 05 = 0,2272727272... * 400

Demanda do Nó - 05 = 90,90 m³/mês

$$\text{Fator de Demanda Nó - 07} >> \frac{(1440/2)}{3960} = 0,181818\dots$$

Demanda do Nó - 01 = 0,181818... * 400

Demanda do Nó - 07 = 72,72 m³/mês

$$\text{Fator de Demanda Nó - 06} >> \frac{(1800/2)}{3960} = 0,2272727272\dots$$

Demanda do Nó - 06 = 0,2272727272... * 400

Demanda do Nó - 06 = 90,90 m³/mês

$$\text{Fator de Demanda Nó - 08} >> \frac{(360/2)}{3960} = 0,0454545\dots$$

Demanda do Nó - 08 = 0,0454545... * 400

Demanda do Nó - 08 = 18,18 m³/mês

$$\text{Fator de Demanda Nó - 02} >> \frac{(360/2)}{3960} = 0,0454545\dots$$

Demanda do Nó - 02 = 0,0454545... * 400

Demanda do Nó - 02 = 18,18 m³/mês

Ao final, o somatório das demandas em todos os Nós deverá ser igual àquela informada pelo usuário. Neste caso 400 m³/mês, assim: Demanda do NÓ-01 = 18,18 m³/mês + Demanda do Nó - 04 = 90,90 m³/mês + Demanda do Nó - 05 = 90,90 m³/mês + Demanda do Nó - 07 = 72,72 m³/mês + Demanda do Nó - 06 = 90,90 m³/mês + Demanda do Nó - 08 = 18,18 m³/mês + Demanda do Nó - 02 = 18,18 m³/mês = 400 m³/mês.

Alternativa 2

O Nó será carregado com todo o consumo anual retirado do SCOM, assim teremos o seguinte:

A Demanda NÓ-01 - Será igual a metade da demanda do trecho compreendido entre os Nós 01 e 04 (\sum Consumo SCOM/2), ou seja:

$$\text{Demanda NÓ-01} = (\text{consumo de C01} + \text{consumo de C02} + \text{consumo de C03})/2$$

$$\text{Demanda NÓ-01} = (120 + 120 + 120)/2 = 80 \text{ m}^3/\text{ano}$$

Demanda NÓ-04 - Será igual a metade da demanda dos trechos compreendidos entre os Nós 01-04 , 04-05 e 04-07, ou seja:

$$\text{Demanda Trecho 01 - 04} \gg 03 \text{ ligações} = 360/2 = 180 \text{ m}^3$$

$$\text{Demanda Trecho 04 - 05} \gg 09 \text{ ligações} = 1080/2 = 540 \text{ m}^3$$

$$\text{Demanda Trecho 04 - 07} \gg 03 \text{ ligações} = 360/2 = 180 \text{ m}^3$$

$$\text{Total de Trechos 01 - 04, 04 - 05 e 05 - 07} = 900 \text{ m}^3$$

$$\text{Demanda NÓ-04} = 900 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$$\text{Demanda Nó - 05} = 1800/2 = 900$$

$$\text{Demanda do Nó - 05} = 900 \text{ m}^3/\text{ano}$$

E para o cálculo das demandas no arquivo inp para simulação, o valor macro medido será dividido pela somatória dos valores de consumos base resultantes da rotina acima descrita, que resultará no fator de demanda (F_d) a ser aplicado, a cada hora, em cada uma das demandas nodais, consumo de base calculados.

ANEXO 3 - CÁLCULO DOS CONSUMOS TOTAIS DOS NÓS (APLICAÇÃO DO FATOR DE PADRÃO DE CONSUMO)

Para haver simulação dinâmica é necessário o modelo ter um padrão de distribuição dessas vazões ao longo do dia, esse padrão é formado por coeficientes multiplicativos, ou seja para um dado período de tempo a simular existirão n fatores multiplicadores com intervalos de tempo regulares.

Por exemplo, para um período de simulação dinâmica de 24 horas com intervalos regulares de 1 hora entre eles, teremos 24 fatores que irão da 0 hora até as 23 horas.

Método:

Figura 2:

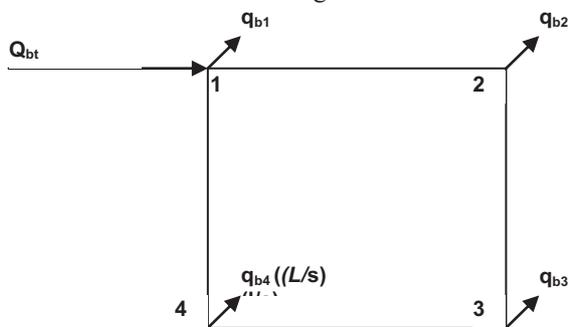
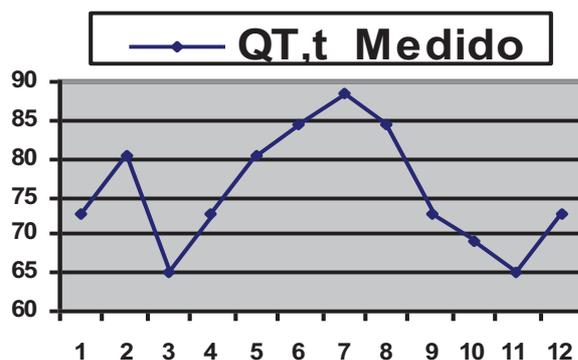


Figura 3: Padrão Médio de Consumo



$$\sum_{1}^{4} q_{bi} = Q_b$$

Sendo:

Q_{bt} = Vazão de base total (L/s);

q_{bi} = Vazão de base para cada nó (L/s).

O padrão será um termo adimensional calculado a partir das vazões medidas pelos macro medidores

$$P_i = \frac{Q_{t_1}}{Q_b}$$

Sendo:

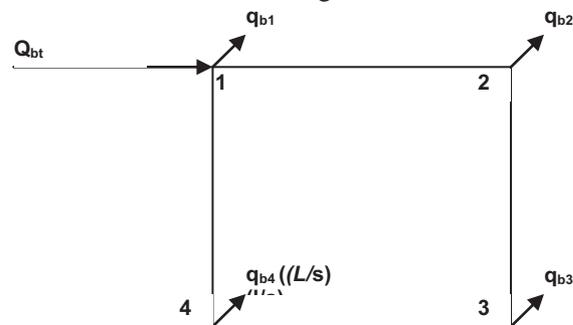
P_i = Padrão adimensional da hora i (L/s)

Q_{ti} = Vazão medida na entrada do setor na hora i (L/s);

Q_{bi} = Vazão de base total (L/s).

O padrão calculado será multiplicado por cada uma das vazões de base de cada nó e o resultado será a vazão total de consumo de cada um dos nós, em cada instante que se pretende simular.

Figura 4:



ANEXO 4 - PONTOS DE CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Figura 5-Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino



Figura 6 Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

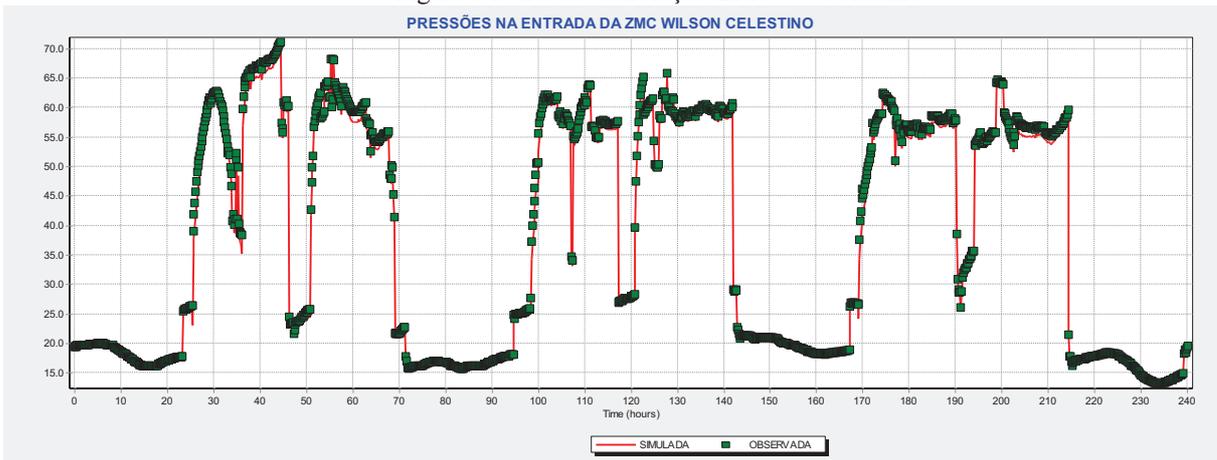


Figura 7: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

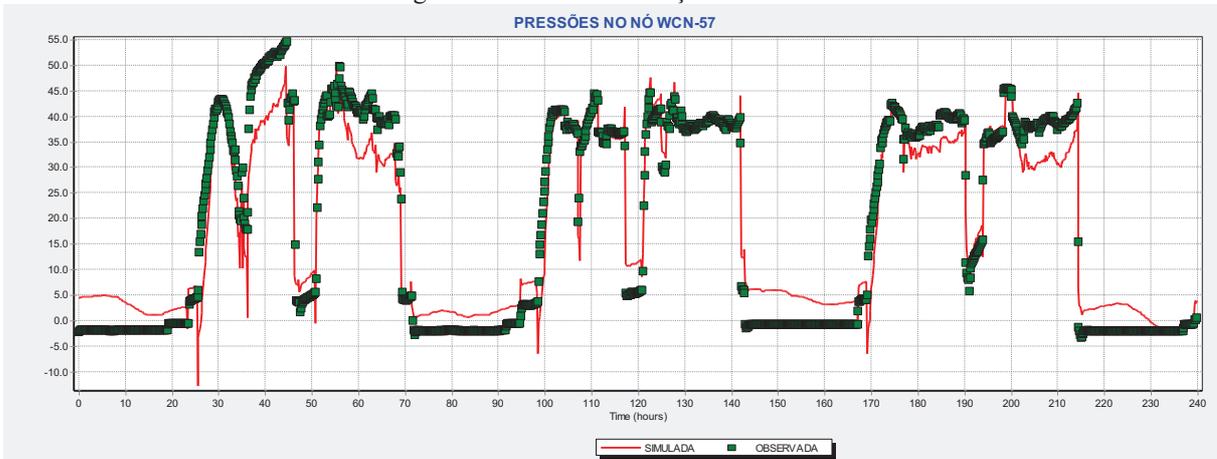


Figura 8: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

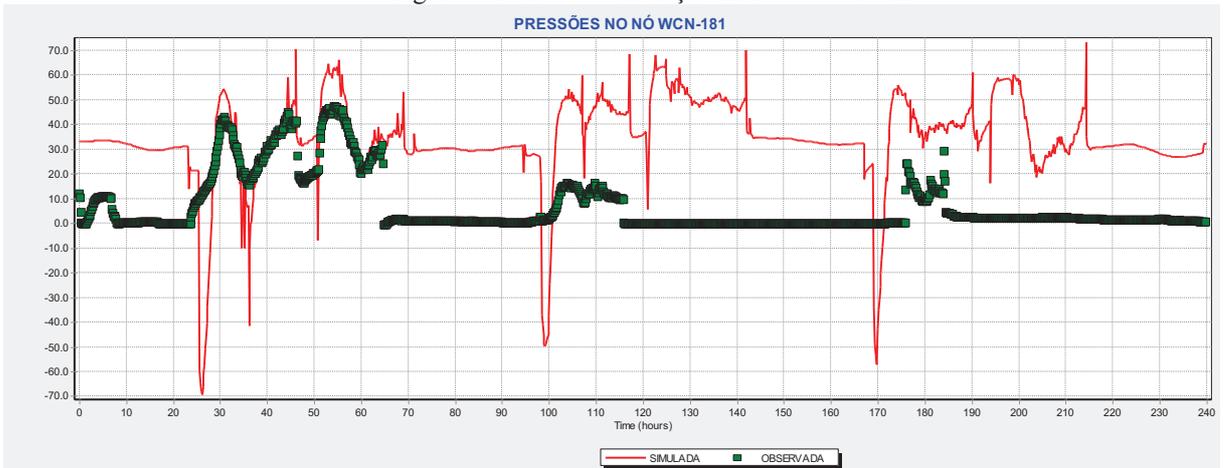


Figura 9: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

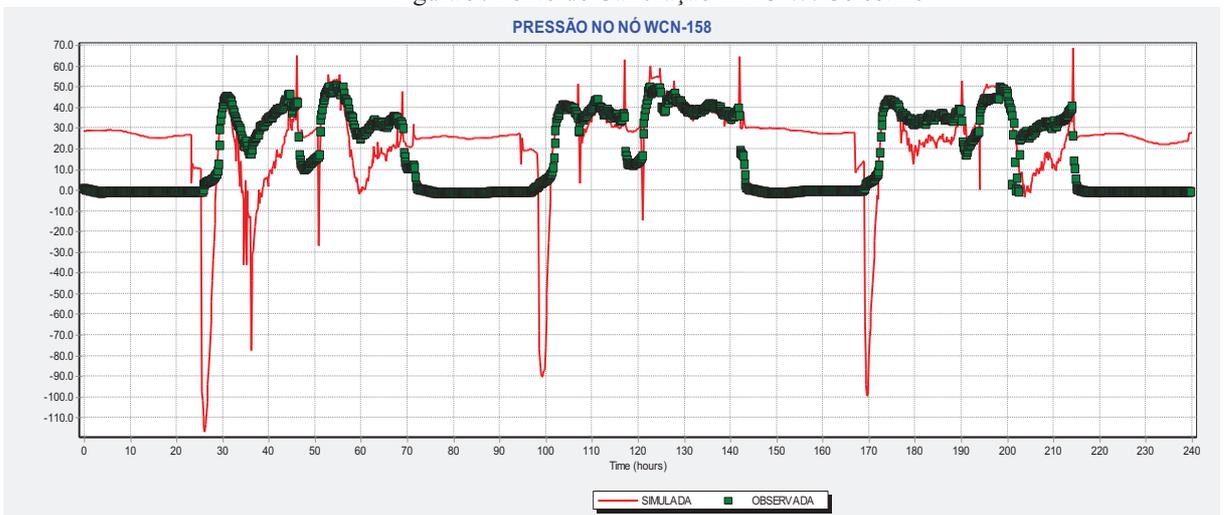


Figura 10: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

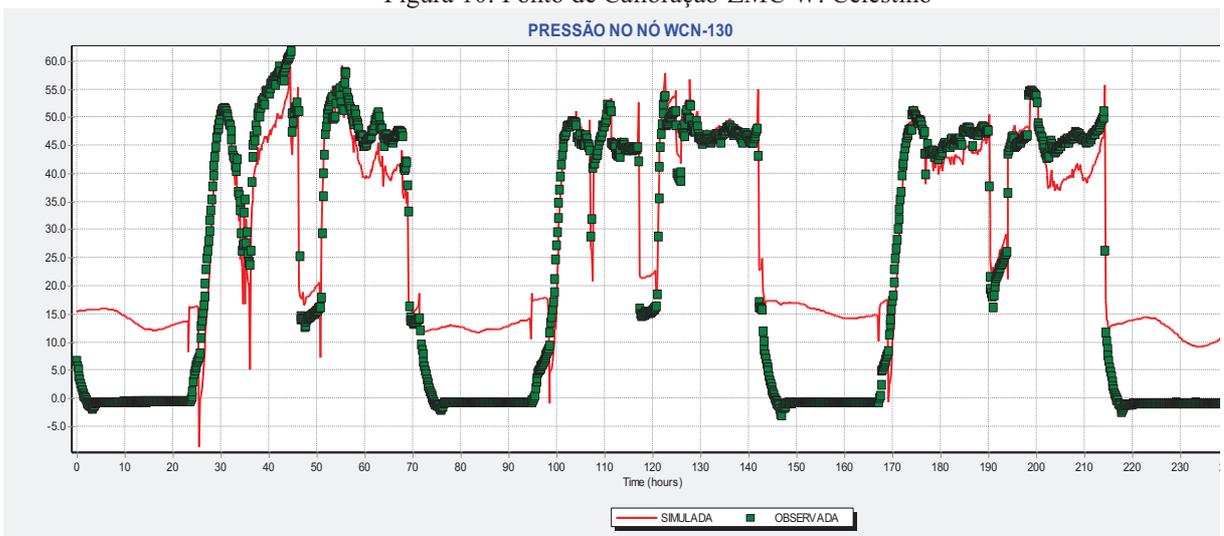


Figura 11: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

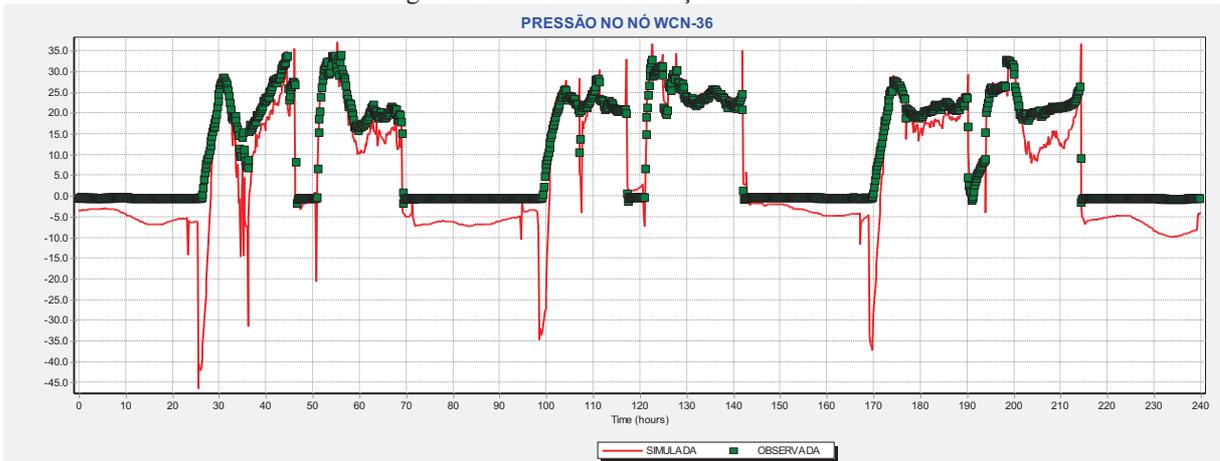


Figura 12: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

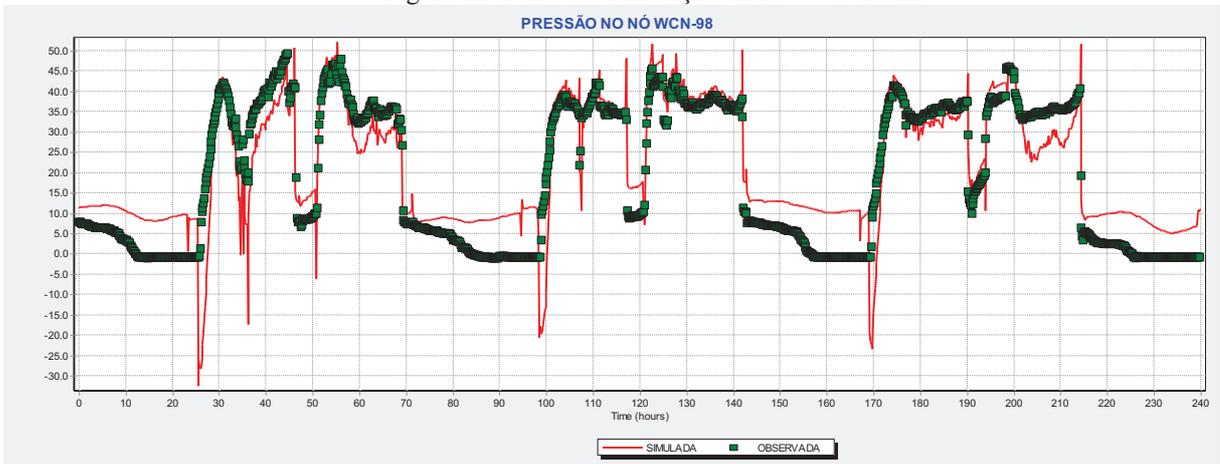


Figura 13: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

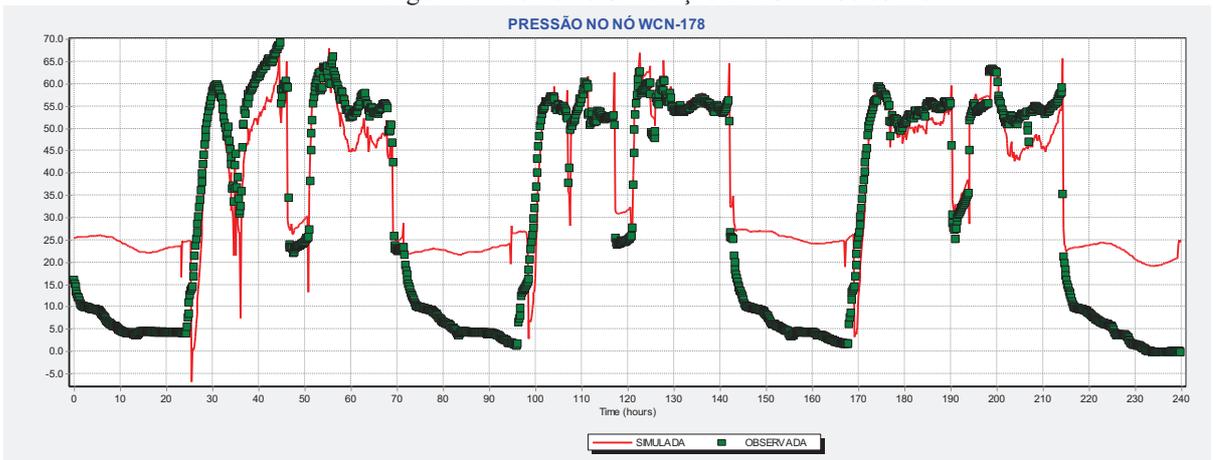


Figura 14: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino

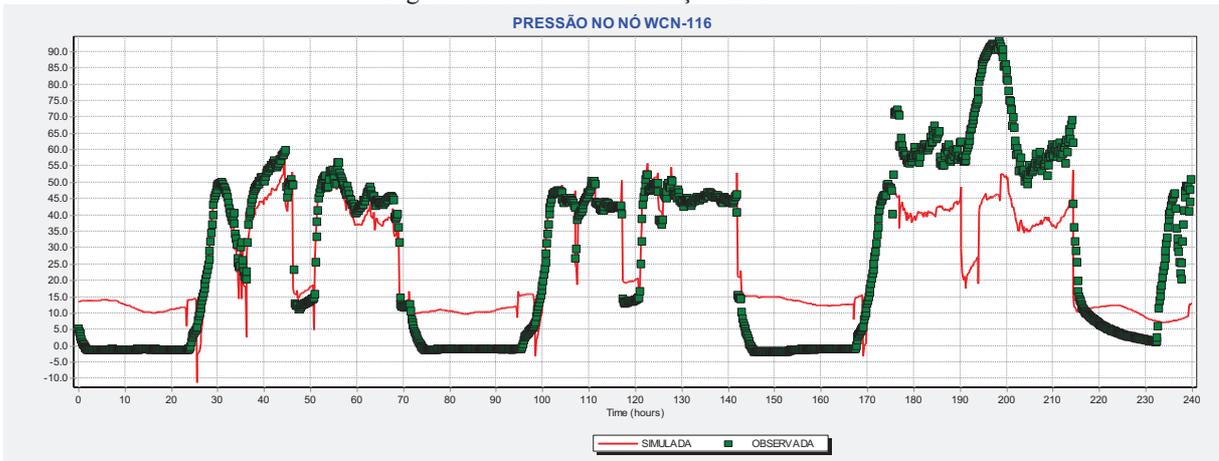
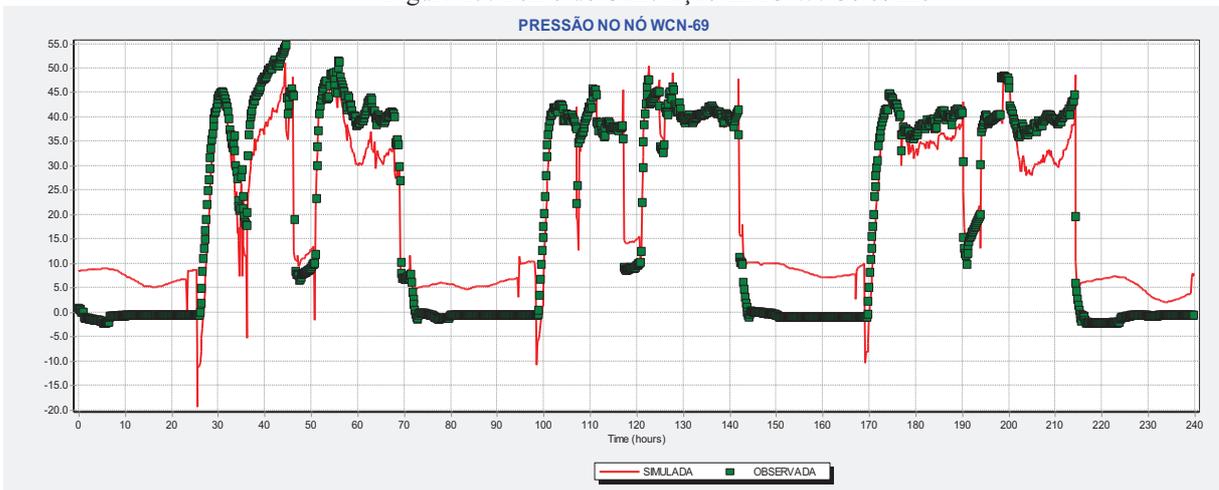


Figura 15: Ponto de Calibração-ZMC W. Celestino



ANEXO 5 - PADRÕES DE CONSUMO CALCULADOS

TEMPO	PADRÕES DE CONSUMO	
	HORA:MIN	INICIAL
0:00	2,200	0,871
1:00	2,007	0,649
2:00	1,897	0,528
3:00	1,835	0,459
4:00	1,874	0,502
5:00	2,206	0,872
6:00	3,116	1,945
7:00	3,149	1,977
8:00	3,312	2,181
9:00	3,494	2,393
10:00	3,728	2,684
11:00	4,028	3,054
12:00	3,894	2,890
13:00	3,697	2,645
14:00	3,678	2,613
15:00	3,516	2,424
16:00	3,485	2,390
17:00	3,472	2,375
18:00	3,633	2,566
19:00	3,519	2,425
20:00	3,478	2,382
21:00	3,194	2,039
22:00	2,862	1,637
23:00	2,716	1,471
padrão 24 h		

ANEXO 6 – VAZÕES E VOLUMES DE PERDAS ZMC WILSON CELESTINO

Tabela 01-Resultado Simulação da Determinação do Volume de Perdas Situação operacional 1

ZMC WILSON CELESTINO-SITUAÇÃO 1					
Balanco de Vazão na Rede					
Séries	Tempo (h:min)	VAZÕES (L/s)			VOLUMES(m ³ /h)
		COM VAZAMENTOS	SEM VAZAMENTOS	VAZAMENTOS	VAZAMENTOS
Produzido	0:00	31,37	12,43	18,94	68,18
Produzido	1:00	28,61	9,26	19,35	69,66
Produzido	2:00	27,06	7,54	19,52	70,27
Produzido	3:00	26,17	6,55	19,62	70,63
Produzido	4:00	26,72	7,16	19,56	70,41
Produzido	5:00	31,38	12,45	18,94	68,18
Produzido	6:00	44,43	27,75	16,68	60,06
Produzido	7:00	44,81	28,21	16,60	59,78
Produzido	8:00	47,24	31,12	16,12	58,03
Produzido	9:00	49,74	34,14	15,59	56,14
Produzido	10:00	53,15	38,30	14,85	53,46
Produzido	11:00	57,43	43,56	13,87	49,92
Produzido	12:00	55,54	41,23	14,31	51,51
Produzido	13:00	52,69	37,74	14,95	53,82
Produzido	14:00	52,32	37,29	15,04	54,13
Produzido	15:00	50,10	34,58	15,52	55,87
Produzido	16:00	49,71	34,10	15,60	56,16
Produzido	17:00	49,53	33,88	15,64	56,31
Produzido	18:00	51,77	36,61	15,16	54,56
Produzido	19:00	50,11	34,60	15,52	55,86
Produzido	20:00	49,61	33,99	15,62	56,24
Produzido	21:00	45,55	29,10	16,46	59,24
Produzido	22:00	40,74	23,36	17,38	62,58
Produzido	23:00	38,74	21,00	17,74	63,87
				VOLUME TOTAL DE PERDAS (m3/h)	1434,88

Tabela 02-Redução de Perdas com a Utilização de VRPs sem Otimização

ZMC WILSON CELESTINO-SITUAÇÃO 1					
Balanço de Vazão na Rede VRPs SEM OTIMIZAÇÃO					
Séries	Tempo (h:min)	VAZÕES (L/S)			VOLUMES(m ³ /h)
		COM VAZAMENTOS	SEM VAZAMENTOS	VAZAMENTOS	VAZAMENTOS
Produzido	0,00	22,25	9,82	9,12	35,36
Produzido	1,00	19,17	9,91	9,44	35,67
Produzido	2,00	17,49	9,95	9,57	35,83
Produzido	3,00	16,52	9,97	9,65	35,90
Produzido	4,00	17,12	9,96	9,60	35,85
Produzido	5,00	22,27	9,82	9,12	35,36
Produzido	6,00	37,02	9,27	7,41	33,37
Produzido	7,00	37,45	9,25	7,36	33,29
Produzido	8,00	40,24	9,12	7,00	32,83
Produzido	9,00	43,12	8,97	6,62	32,31
Produzido	10,00	47,06	8,77	6,08	31,56
Produzido	11,00	52,05	8,49	5,38	30,55
Produzido	12,00	49,85	8,61	5,70	31,00
Produzido	13,00	46,53	8,80	6,15	31,66
Produzido	14,00	46,11	8,82	6,22	31,75
Produzido	15,00	43,53	8,95	6,57	32,23
Produzido	16,00	43,08	8,98	6,62	32,32
Produzido	17,00	42,87	8,99	6,65	32,35
Produzido	18,00	45,47	8,85	6,30	31,88
Produzido	19,00	43,55	8,95	6,56	32,23
Produzido	20,00	42,97	8,98	6,64	32,33
Produzido	21,00	38,30	9,21	7,25	33,15
Produzido	22,00	32,81	9,45	7,93	34,02
Produzido	23,00	30,54	9,54	8,20	34,34
				VOLUME TOTAL DE PERDAS (m3/h)	797,14

ZMC WILSON CELESTINO-SITUAÇÃO 1					
Balanço de Vazão na Rede VRPs SEM OTIMIZAÇÃO					
Séries	Tempo (h:min)	VAZÕES (L/S)			VOLUMES(m ³ /h)
		COM VAZAMENTOS	SEM VAZAMENTOS	VAZAMENTOS	VAZAMENTOS
Produzido	0,00	21,10	11,28	8,67	31,22
Produzido	1,00	18,00	8,09	8,75	31,48
Produzido	2,00	16,32	6,37	8,78	31,60
Produzido	3,00	15,34	5,37	8,80	31,66
Produzido	4,00	15,94	5,98	8,78	31,62
Produzido	5,00	21,12	11,30	8,68	31,23
Produzido	6,00	35,99	26,72	8,24	29,68
Produzido	7,00	36,43	27,19	8,23	29,61
Produzido	8,00	39,25	30,13	8,13	29,26
Produzido	9,00	42,16	33,19	8,02	28,87
Produzido	10,00	46,16	37,39	7,86	28,30
Produzido	11,00	51,21	42,72	7,64	27,51
Produzido	12,00	48,98	40,36	7,74	27,87
Produzido	13,00	45,62	36,82	7,88	28,38
Produzido	14,00	45,19	36,37	7,90	28,45
Produzido	15,00	42,58	33,63	8,00	28,81
Produzido	16,00	42,13	33,15	8,02	28,88
Produzido	17,00	41,93	32,94	8,05	28,96
Produzido	18,00	44,54	35,69	7,93	28,54
Produzido	19,00	42,60	33,65	8,00	28,81
Produzido	20,00	42,01	33,03	8,03	28,89
Produzido	21,00	37,29	28,08	8,20	29,51
Produzido	22,00	31,74	22,29	8,38	30,17
Produzido	23,00	29,44	19,90	8,44	30,40
Consumido			VOLUME TOTAL DE PERDAS (m3/h)	709,73	

ANEXO 7 - PADRÕES DE CONSUMO E VAZÕES CALCULADAS- SITUAÇÃO 1

Padrões de consumo antes e após as correções nos fatores multiplicadores feitos pelo modelo, para considerar os vazamentos na simulação.

FATORES INCLUINDO PERDAS

WC	1.894	1.888	1.876	1.900	1.907	1.900
WC	1.882	1.900	1.907	1.888	1.870	1.851
WC	1.845	1.845	1.863	1.882	1.907	1.937
WC	1.956	1.981	2.024	2.055	2.752	5.343
WC	5.825	6.053	6.238	6.325	6.368	6.386
WC	6.392	6.392	6.139	5.880	5.658	5.306
WC	5.023	4.726	4.492	4.239	3.906	3.684
WC	3.560	3.431	3.301	3.246	3.159	3.116
WC	3.042	2.956	2.912	2.931	2.912	2.863
WC	2.820	2.900	2.894	2.659	2.653	2.690
WC	2.684	2.579	2.740	2.629	2.672	2.703
WC	2.727	2.752	2.789	2.882	2.814	2.845
WC	2.980	3.011	1.863	1.987	1.987	3.190
WC	3.073	3.233	3.128	3.153	3.153	2.968
WC	3.097	3.097	3.067	3.079	3.085	2.999
WC	3.079	3.017	3.048	2.931	2.715	2.931
WC	2.999	3.017	2.943	2.919	2.598	2.616
WC	2.653	2.592	2.659	2.647	2.573	2.629
WC	2.666	2.517	2.672	2.814	2.795	2.838
WC	2.912	2.919	2.931	2.986	2.999	3.036
WC	3.017	3.036	2.943	2.999	3.023	3.005
WC	2.993	3.042	3.048	3.023	3.054	2.937
WC	2.993	2.937	2.925	1.209	1.209	1.209
WC	1.320	1.345	1.351	1.364	1.339	1.364

FATORES SEM PERDAS

WC	1.7430	1.7368	1.6213	1.6560	1.6513	1.6376
WC	1.6236	1.6422	1.6440	1.6252	1.6002	1.5888
WC	1.5823	1.5798	1.6002	1.6188	1.6438	1.6749
WC	1.6928	1.7122	1.7625	1.7968	2.5484	5.4308
WC	5.9633	6.0874	6.2661	6.3359	6.3563	6.3422
WC	6.3199	6.2893	5.9925	5.6900	5.3437	4.8939
WC	4.5619	4.2044	3.9151	3.5967	3.2140	2.9466
WC	2.7982	2.6699	2.5161	2.4481	2.3467	2.2985
WC	2.2245	2.1273	2.0868	2.1074	2.0788	2.0246
WC	1.9747	2.0656	2.0587	1.7999	1.7862	1.8873
WC	1.8873	1.7636	1.9234	1.8343	1.8621	1.9328
WC	1.9339	1.9618	1.9994	2.0985	2.0253	2.0581
WC	2.2278	2.2657	1.0012	1.1510	1.5732	2.8966
WC	2.7660	2.5635	2.4581	2.4768	2.4700	2.2491
WC	2.3988	2.3878	2.3257	2.3251	2.3206	2.1992
WC	2.2942	2.2116	2.2489	2.1241	1.8576	2.0979
WC	2.1866	2.1640	2.0680	2.0432	1.6736	1.7045
WC	1.8870	1.8131	1.8935	1.8803	1.7983	1.8685
WC	1.9340	1.7701	1.9423	2.0994	2.0745	2.0740
WC	2.1545	2.1724	2.1787	2.2346	2.2459	2.2989
WC	2.2753	2.2991	2.1961	2.2609	2.2919	2.2693
WC	2.2492	2.3096	2.3115	2.2895	2.3241	2.1875
WC	2.2492	2.1916	2.1801	0.3024	0.3022	0.8796
WC	0.9947	1.0138	1.0241	1.0376	1.0098	1.0359