



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

– Doutorado –

# **MODELAGEM COMPUTACIONAL VISANDO A REABILITAÇÃO DE REDES HIDRAULICAS**

Por

Moisés Menezes Salvino

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da  
Paraíba para obtenção do grau de Doutor.*

**João Pessoa – Paraíba**

**Junho, 2012**

**MOISÉS MENEZES SALVINO**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL VISANDO A  
REABILITAÇÃO DE REDES HIDRAULICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

**Orientador: Professor Dr. Heber Pimentel Gomes**

**João Pessoa – Paraíba**

**Junho/2012**

S185m Salvino, Moisés Menezes.  
Modelagem computacional visando a reabilitação de redes  
hidráulicas / Moisés Menezes Salvino.-- João Pessoa, 2012.  
148f. : il.  
Orientador: Heber Pimentel Gomes  
Tese (Doutorado) – UFPB/CT  
1. Engenharia Mecânica. 2. Calibração multivariada –  
modelos hidráulicos. 3. Redes de distribuição de água.  
4. Reabilitação. 5. EPANET. 6. Algoritmos genéticos.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

# MODELAGEM COMPUTACIONAL VISANDO A REABILITAÇÃO DE REDES HIDRÁULICAS

*por*

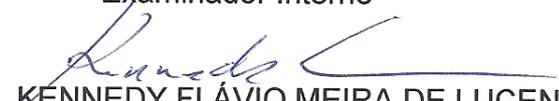
**MOISÉS MENEZES SALVINO**

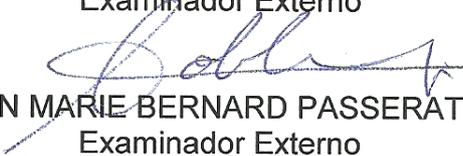
Tese aprovada em 27 de junho de 2012  
Período letivo 2012.1

  
Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES  
Orientador

  
Prof. Dr. ISAAC SOARES DE FREITAS  
Examinador Interno

  
Prof. Dr. LUIZ SIMÃO DE ANDRADE FILHO  
Examinador Interno

  
Prof. Dr. KENNEDY FLÁVIO MEIRA DE LUCENA  
Examinador Externo

  
Prof. Dr. ALAIN MARIE BERNARD PASSERAT DE SILANS  
Examinador Externo

## **DEDICATÓRIA**

*A minha noiva, Laís Pereira Régis.  
Aos meus pais Antônio Salvino Pereira e  
Maria de Fátima Menezes Salvino.  
Aos demais familiares e amigos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela presente existência e por me guiar até aqui.

- Ao professor Dr. Heber Pimentel Gomes pela orientação, ensinamentos e profissionalismo durante todo o período de Mestrado e Doutorado.
- Ao professor Dr. Ângelo Vieira Mendonça, pela orientação durante minha graduação e iniciação científica, amizade e conselhos.
- Aos professores Clovis Dias, Simplicio A. da Silva, Ronildo Inácio Soares de Alencar, Pedro Luiz Christiano pela amizade, conselhos e orientações durante minha vida acadêmica.
- Aos meus queridos amigos do LENHS – Roberta, Magno, Saulo, Leonardo Brasil, Wil Lavor, Nicolle, Flávia, Renato, Gênnisson, Thiago, Allan e Rômulo pelo companheirismo, amizade e préstimos.
- Ao amigo Paulo Sergio Oliveira de Carvalho, pelos conselhos, amizade, desprendimento e ajuda indispensável no desenvolvimento deste trabalho.
- Aos meus alunos das disciplinas de Lab. Mecânica dos Fluidos e Introdução a Programação que fizeram parte da minha iniciação à docência.
- Aos meus familiares, amigos, colegas da pós-graduação, funcionários e professores da UFPB, e a todos que participaram direta ou indiretamente da minha caminhada.
- Ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, coordenado pelo Prof. Heber Pimentel Gomes, pela disponibilidade dos equipamentos necessários para o desenvolvimento experimental deste trabalho.
- A Eletrobras pelo aporte financeiro para o desenvolvimento do Sistema Piloto de Distribuição de Água e aquisição de diversos equipamentos de medição e controle.
- A Capes pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

# **MODELAGEM COMPUTACIONAL VISANDO A REABILITAÇÃO DE REDES HIDRAULICAS**

## **RESUMO**

Este trabalho de tese tem por objetivo desenvolver um modelo computacional robusto com vistas à calibração multivariada de modelos hidráulicos de sistemas de distribuição de água, possibilitando a identificação de possíveis irregularidades como: vazamentos, obstruções nas tubulações, válvulas inoperantes ou estranguladas e incompatibilidades na modelagem referente aos dados reais. O modelo LenhsCalibra – software desenvolvido nesta tese para aplicação do algoritmo de calibração multivariado proposto – incorpora duas alternativas distintas para calibração de redes de distribuição. A primeira alternativa utiliza um Algoritmo Iterativo, a outra é realizada através dos Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. O processo de calibração tem por objetivo, utilizando redes modeladas no simulador hidráulico Epanet, ajustar as diferenças das variáveis de estado da rede produzindo informações compatíveis com suas respectivas redes reais. O processo de calibração proposto permite utilizar até sete variáveis: a rugosidade, a demanda, a perda de carga singular, a cota topográfica, vazamentos, diâmetros e válvulas, simultaneamente, ou qualquer combinação delas. Dependendo das características da rede a ser modelada e calibrada é possível definir limites para as variáveis e escolher quais variáveis calibrar. A aplicação experimental foi realizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da UFPB através do seu Sistema Piloto de Distribuição de Água. Os resultados mostraram que o algoritmo tem uma boa convergência com relação ao tempo de processamento e a aproximação dos dados medidos e calculados, assim como possibilita a identificação de problemas mediante análise dos parâmetros resultantes da calibração, proporcionando assim subsídios para uma reabilitação mais precisa.

Palavras chaves – Calibração, Redes de Distribuição de Água, Reabilitação, EPANET, Algoritmos Genéticos.

# **COMPUTER MODELING IN ORDER TO REHABILITATION OF HYDRAULIC NETWORK**

## **ABSTRACT**

This thesis aims to develop a robust computational model with a view to multivariate calibration of hydraulic models of water distribution systems, enabling the identification of possible irregularities such as leaks, obstructions in the pipes, valves, dead or strangled and incompatibilities regarding the modeling to real data. The model LenhsCalibra - software developed in this thesis for the application of multivariate calibration algorithm proposed - incorporates two distinct alternatives for calibration of distribution networks. The first alternative uses an iterative algorithm, the other is carried out by Multiobjective Genetic Algorithms. The calibration process aims at using networks modeled in Epanet hydraulic simulator, adjust the differences of state variables of the network giving information consistent with their respective real networks. The calibration process allows the proposed use up to seven variables: the roughness, the demand, the pressure drop is unique, the topographic, leaks, valve diameters and, simultaneously, or any combination thereof. Depending on the characteristics of the network to be modeled and calibrated you can set limits for the variables and choose which variables to calibrate. The experimental application was carried out at the Laboratory for Energy Efficiency and Water Sanitation UFPB through its Pilot System for Water Distribution. The results showed that the algorithm has good convergence with respect to processing time and the approximation of the measured and calculated values, as well as enables the identification of problems by analyzing the parameters resulting from calibration, thus providing support for a more accurate rehabilitation.

Keywords – Calibration, Water Distribution Networks, Rehabilitation, EPANET, Genetic Algorithms

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 OBJETIVO GERAL .....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	4
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 MODELAGEM DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA..	6
2.2 VARIÁVEIS APLICADAS AOS MODELOS DE CALIBRAÇÃO.....	11
2.2.1 Variáveis aplicadas aos nós da rede .....	11
2.2.2 Variáveis aplicadas aos trechos da rede .....	15
2.3 O ESTADO DA ARTE.....	20
2.3.1 Conceitos e Equações Fundamentais da Modelagem Hidráulica....	20
2.3.2 Vazamentos dirigidos pela pressão.....	24
2.3.3 Demanda orientada pela pressão .....	24
2.4 ALGORITMO GENÉTICO .....	29
2.4.1 Introdução.....	29
2.4.2 Definições.....	36
2.4.3 Algoritmo Genético Multiobjetivo .....	37
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	38
3.2 METODOLOGIA DO LENHSCALIBRA.....	38
3.2.1 Algoritmo Iterativo .....	39
3.2.2 Algoritmo Genético Desenvolvido.....	41
3.3 SISTEMA PILOTO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DO LENHS .....	50
3.3.1 Características do SPDA do LENHS .....	50
3.4 SOFTWARE DESENVOLVIDO - LENHSCALIBRA.....	58
3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	62

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	66
4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS GENÉTICOS .....	66
4.2.1 População .....	67
4.2.2 População Intermediária .....	68
4.2.3 Probabilidade de Reprodução .....	69
4.2.4 Mutação .....	70
4.2.5 Tipo de Seleção .....	71
4.3 CALIBRAÇÃO DO SPDA DO LENHS UFPB.....	71
4.3.1 Calibração Utilizando Variáveis Isoladamente .....	76
4.3.2 Calibração Multivariada com Algoritmo Genético Multiobjetivo ..	93
4.3.3 Calibração utilizando o processo iterativo.....	97
4.4 CALIBRAÇÃO DE UMA REDE REAL .....	102
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>108</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	108
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNCIDE I – BIBLIOTECA DOS ALGORITMOS .....</b>	<b>116</b>
<b>APÊNCIDE II – MODELAGEM DA REDE DO SPDA LENHS (*.INP) ...</b>	<b>141</b>
<b>APÊNCIDE III – DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS.....</b>	<b>146</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração de um Sistema de Abastecimento de Água.....	6
Figura 2.2 - Índice de Perdas na Distribuição de Água da Paraíba .....	12
Figura 2.3 – Ilustração de um ponto de saída da rede de distribuição.....	13
Figura 2.4 - Curva de demanda de uma rede real - Maceió - AL.....	14
Figura 2.5 - Tubulação com diminuição da seção transversal.....	19
Figura 2.6 - Ilustração do processo da roda da roleta.....	32
Figura 2.7 - Crossover de 1 ponto .....	33
Figura 2.8 - Crossover de n pontos .....	33
Figura 2.9 - Ilustração dos Máximos Locais e Global .....	35
Figura 3.1 - Fluxograma do algoritmo iterativo de calibração .....	41
Figura 3.2 - Ilustração da Codificação de uma Rede .....	43
Figura 3.3 - Exemplo de Arquivo de Dados de Medições do LenhsCalibra.....	47
Figura 3.4 - Fluxograma do algoritmo genético multiobjetivo .....	49
Figura 3.5 - Perspectiva do SPDA modelado no blender®.....	51
Figura 3.6 - Foto panorâmica do laboratório.....	51
Figura 3.7 - Equipamentos diversos existentes no SPDA .....	52
Figura 3.8 - Conjuntos motor-bomba do LENHS UFPB .....	53
Figura 3.9 - Controlador Lógico Programável – CLP.....	54
Figura 3.10 - Manômetro instalado e identificado em uma das saídas do SPDA .....	55
Figura 3.11 - Calibrador de Pressão utilizado nos manômetros.....	56
Figura 3.12 - Gráficos e equações para os manômetros instalados.....	57
Figura 3.13 - Tela principal do sistema supervisorio .....	58
Figura 3.14 - Tela principal do programa LenhsCalibra .....	59
Figura 3.15 - Opções das Variáveis para o processo de calibração.....	60
Figura 3.16 - Detalhes da Função Objetivo e do Critério de Parada.....	61
Figura 3.17 - Executando o modelo de calibração com dados atualizados da FO .....	62
Figura 3.18 - Padrão de Consumo Experimental do SPDA LENHS .....	64
Figura 4.1 - Variação da população inicial como parâmetro do AG.....	67
Figura 4.2 - Comparação com a variação da População Intermediária.....	68
Figura 4.3 - Melhores resultados da FO alterando a população intermediária.....	69
Figura 4.4 - Comparação com a variação da Probabilidade de Reprodução.....	70
Figura 4.5 - Comparação com a variação da Mutação .....	70
Figura 4.6 - Comparação com a variação do tipo de seleção .....	71

Figura 4.7 - Modelagem do SPDA do LENHS no Epanet.....	72
Figura 4.8 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA antes da calibração.....	74
Figura 4.9 - Comparação dos valores de vazão do SPDA antes da calibração .....	75
Figura 4.10 – Modelo da Rede SPDA do LENHS calibrado pela rugosidade .....	77
Figura 4.11 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA após calibração .....	79
Figura 4.12 - Válvulas Instaladas do SPDA do LENHS .....	79
Figura 4.13 - Resultado da calibração das perdas de carga singular .....	83
Figura 4.14 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA após calibração .....	84
Figura 4.15 - Rede SPDA calibrada através da demanda.....	85
Figura 4.16 - Comparação dos valores de vazão nos trechos após calibração .....	86
Figura 4.17 - Rede do SPDA calibrada – Vazamentos .....	87
Figura 4.18 - Comparação dos valores de vazão dos trechos após calibração .....	88
Figura 4.19 - Rede SPDA calibrada através da Topografia .....	89
Figura 4.20 - Comparação entre os valores de pressão após calibração .....	90
Figura 4.21 - Rede SPDA calibrada através dos Diâmetros Internos.....	91
Figura 4.22 - Comparação dos valores de pressão medidos e calibrados .....	93
Figura 4.23 - Curva de demanda para a rede SPDA .....	94
Figura 4.24 - Correlação dos valores de pressão.....	95
Figura 4.25 - Correlação dos valores de vazão .....	95
Figura 4.26 – Comparação da média ao longo do tempo dos valores de pressão .....	96
Figura 4.27 - Comparação média ao longo do tempo dos valores de vazão .....	96
Figura 4.28 - Vazões nos trechos de saída da rede.....	97
Figura 4.29 - Rede calibrada através da rugosidade absoluta .....	98
Figura 4.30 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Pressão.....	99
Figura 4.31 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Vazão .....	99
Figura 4.32 - Rede calibrada através da demanda.....	100
Figura 4.33 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Vazão .....	101
Figura 4.34 - Modelagem no Epanet do Complexo Lagunar .....	103
Figura 4.35 - Comparação dos valores de pressão - Complexo Lagunar.....	103
Figura 4.36 - Comparação dos valores de pressão do iterativo-Complexo Lagunar.....	104
Figura 4.37 - Complexo Lagunar calibrado pelo processo iterativo .....	105
Figura 4.38 - Convergência da função objetivo .....	106
Figura 4.39 - Complexo Lagunar calibrado pelo algoritmo genético .....	107
Figura 4.40 – Comparação dos valores de pressão após calibração via AGM.....	107

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valor do coeficiente C e rugosidade absoluta $\epsilon$ para diversos tubos .....	17
Tabela 2.2 - Coeficientes de perdas k (extraídas de Netto <i>et al.</i> 1998).....	18
Tabela 2.3 - Resumo dos modelos de demanda x pressão segundo Soares (2003).....	26
Tabela 2.4- Análise das terminologias utilizadas na Biologia e no Algoritmo Genético.....	36
Tabela 3.1 - Codificação para o exemplo proposto.....	42
Tabela 3.2 - Calibração dos Manômetros Analógicos Instalados .....	56
Tabela 3.3 - Coeficientes e Vazões obtidos experimentalmente do SPDA.....	63
Tabela 4.1 - Dados das Tubulações da Rede do LENHS - SPDA .....	73
Tabela 4.2 - Resultado após calibração utilizando a Rugosidade como variável.....	78
Tabela 4.3 - Coeficientes das perdas de carga nos trechos do SPDA .....	80
Tabela 4.4 - Coeficientes das perdas de carga nos trechos do SPDA (continuação) .....	81
Tabela 4.5 - Resultados dos coeficientes da perda de carga singular.....	82
Tabela 4.6 - Resultado da calibração utilizando a variável demanda.....	86
Tabela 4.7 - Resultado da calibração através da variável vazamento .....	88
Tabela 4.8 - Resultado da calibração referente a variável Topografia .....	90
Tabela 4.9 - Resultado dos diâmetros internos após calibração .....	91
Tabela 4.10 - Demandas encontradas após a calibração do modelo .....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Algoritmo Genético
AGM	Algoritmo Genético Multiobjetivo
BWCN	Battle of Water Calibration Networks
CASAL	Companhia de Abastecimento de Alagoas
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
D	Descarga
DMCs	Distritos de Monitoramento e Controle
DN	Diâmetro Nominal
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EA	Erro Absoluto
ELETOBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
EPA	Environmental Protection Agency
EPANET	Software de simulação hidráulica disponibilizado pela EPA
ETA	Estação de Tratamento de Água
FCV	Válvula reguladora de vazão
FO	Função Objetivo
FT	Transdutor de Vazão
GPV	Válvula genérica
IHM	Interface Homem-Máquina
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
LPS	Litros por segundo
N	Nó
NBR	Norma da ABNT
PBV	Válvula de perda de carga fixa

PRFV	Poliéster Revestido com Fibra de Vidro
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para o setor de
SANEAR	Saneamento
PSO	Particle Swarm Optimization
PSV	Válvula sustentadora de pressão
PT	Transdutor de Pressão
PVC	Policloreto de Vinila
RAM	Memória de Acesso Aleatório
SCADA	Supervisory Control and Data Aquisition
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SPDA	Sistema Piloto de Distribuição de Água
T	Trecho
TCV	Válvula de controle de perda de carga
TXT	Texto
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
VM	Valor Medido
VP	Valor Padrão
VRPs	Válvulas Reguladoras de Pressão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N_{OR}$	Número de objetos da rede
$N_B$	Número de bits para representar cada elemento da tabela de codificação
$P_{min}$	Pressão mínima da rede
$P_{ref}$	Pressão de referência
TXT	Extensão de um arquivo do tipo texto
D	Nó de descarga
T	Trecho
N	Nó
$p_A$	Pressão manométrica no ponto A
$V_A$	Velocidade da água no ponto A
$Z_A$	Cota no ponto A
$p_B$	Pressão manométrica no ponto B
$V_B$	Velocidade da água no ponto B
$Z_B$	Cota no ponto B
g	Aceleração da gravidade
$\rho$	Densidade da água
$h_{fAB}$	Perda de carga equivalente entre os pontos A e B
$h_f$	Perda de carga contínua unitária
L	Comprimento da tubulação
V	Velocidade da água
D	Diâmetro interno
f	Coefficiente adimensional
Q	Vazão
C	Coefficiente característico da fórmula de Hazen-Williams
Re	Número de Reynolds
$\epsilon$	Rugosidade absoluta da tubulação

$k$	Coeficiente de perdas
$h_s$	Perda de carga localizada ou singular
$n_k$	Número de trechos com vazões chegando ao nó $k$
$m_k$	Número de trechos com vazões saindo do nó $k$
$(Q_{entra})_i$	Vazões dos trechos $i$ que chegam ao nó $k$
$(Q_{sai})_j$	Vazões dos trechos $j$ que saem do nó $k$
$d_k$	Demanda referente ao nó $k$
$(h_f)_i$	perda de carga referente ao trecho $i$
$(E)_j$	Energia adicionada no anel $k$
$q$	vazão
$p$	Pressão no orifício
$C$	Coeficiente de vazão
$y$	Expoente do emissor
$N$	Numero de nós
$M_i$	Número total de tubos conectados ao nó $i$
$H_j$	Carga hidráulica total
$Q_i$	Perda de água por unidade de tempo de um pequeno vazamento próximo ao nó $i$
$z_i$	Cota topográfica no nó $i$
$\delta_i$	Igual a 1 ou 0 se a carga total no nó $i$ for maior ou menor que a cota topográfica
$P$	Demanda nodal
$S_i$	Fator espacial de distribuição para a demanda total referente ao nó $i$
$a$	Expoente de perda
$L_{ij}$	Comprimento da tubulação
$D_{ij}$	Diâmetro do tubo
$\theta_{ij}$	Superfície de vazamento por superfície do tubo que liga os nós $i$ e $j$
$S_i^0$	Fator de distribuição espacial da demanda para o nó $i$
$h^0$	É a pressão mínima requerida (5 – 10 m).
$A_i$	é a aptidão associada a cada indivíduo $i$
$N$	é o tamanho da população
$p_i$	probabilidade para seleção de cada indivíduo
$F$	função objetivo

$X_s$	valores simulados
$X_r$	valores reais
$P_s$	é a pressão simulada no nó $i$
$P_M$	é a pressão medida ou real no nó $i$
$Q_s$	é a vazão simulada no trecho $j$
$Q_M$	é a vazão medida no trecho $j$
$F_R$	é a função objetivo resultante

# **CAPÍTULO I**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A água potável, é um recurso natural limitado, e deve ser distribuída em quantidade suficiente para atender, com qualidade, às necessidades de consumo da população. Entretanto, nos dias de hoje, as companhias de abastecimento têm dificuldades de atender essa demanda devido o grande crescimento populacional e a verticalização das residências agrupando-as em edificações robustas, principalmente nos grandes centros urbanos, concentrando em pontos específicos consumos acima do previsto em projeto, e também, pelo envelhecimento e desgaste das estruturas, equipamentos e tubulações que compõem o sistema de abastecimento como um todo.

As perdas de água reais e aparentes são realidades nos sistemas de abastecimentos atuais, onde, no Brasil, em média, 46,87% da água tratada é perdida segundo informações do SNIS (2009), e sua redução torna-se um desafio para as empresas e companhias da área de abastecimento. As soluções referentes às perdas reais, provocadas principalmente por vazamentos, é a reabilitação das redes, ou seja, a substituição de tubulações antigas, válvulas, registros e outros equipamentos que fazem parte do sistema, assim como, o melhoramento dos seus sistemas de impulsão para proporcionar a pressão necessária, reduzindo pressões elevadas na rede, e ainda, sistemas de medição e monitoramento para quantificar e acompanhar a produção de água em pontos específicos da rede. Muitos desses procedimentos têm custos elevados e encontrar uma melhor solução implica na melhor identificação dos pontos onde serão realizadas as reabilitações. Uma das formas de se

identificar tais pontos é através da análise dos resultados da calibração de um modelo hidráulico aplicado à rede.

A modelagem hidráulica consiste em um modelo numérico, com base nos conceitos físicos, desenvolvido para reproduzir da melhor forma possível o comportamento do fluxo da água no interior das tubulações e acessórios da rede de distribuição modelada. Em todo processo de modelagem há considerações que simplificam e resultam em um conjunto de equações que governam o modelo físico aplicado ao equilíbrio hidráulico; além disto, as propriedades da água, em diversas condições, e a imprecisão dos equipamentos de medição implicam em divergências, por menores que sejam, entre os valores de uma rede real e sua respectiva modelagem. A aproximação dos valores medidos com o modelo se dá com a calibração numérica.

A calibração de um sistema de medição difere da calibração numérica aplicada a um sistema de abastecimento. A calibração de um sistema de medição consiste em um conjunto de operações, sob condições específicas e controladas, que relaciona os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. A calibração de modelos numéricos de um sistema de abastecimento aproxima os valores calculados ou simulados de um modelo hidráulico tomando por referência as medições em diversos pontos da rede real. A calibração ainda utiliza dados das medições de pressão e vazão, simultaneamente, propiciando uma tentativa de ajuste mais complexa quando comparada com uma calibração de um sistema de medição.

O estudo na área de calibração de redes de distribuição de água tem se intensificado nos últimos anos, tanto pelo avanço dos modelos matemáticos e algoritmos robustos, assim como pelo desenvolvimento de novas tecnologias de supervisão e controle, possibilitando a modelagem e a programação de algoritmos inteligentes, buscando conhecer melhor a rede nos diversos cenários e nas diversas condições, encontrando respostas mais rápidas e dando suporte para sua reabilitação e operação.

A programação de algoritmos robustos e modelos de calibração, associada a simuladores hidráulicos, permitem configurar variáveis para melhor modelar a rede, obtendo valores calculados compatíveis com os observados nas redes reais. O Epanet (ROSSMAN, 2008) é um simulador hidráulico, onde é possível utilizar sua biblioteca de

funções para auxiliar a programação de algoritmos em diversas linguagens, possibilitando a modificação da rede e sua simulação a cada novo cenário proposto.

## **1.2 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral desta tese é desenvolver um algoritmo computacional robusto com vistas à calibração multivariada de modelos hidráulicos de sistemas de distribuição de água, possibilitando a identificação de vazamentos, obstruções nas tubulações, válvulas inoperantes ou estranguladas e possíveis incompatibilidades com os dados reais de operação de redes pressurizadas de abastecimento.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver uma biblioteca de funções com base nos algoritmos genéticos, aplicáveis à linguagem de programação do simulador hidráulico Epanet, permitindo assim, o acoplamento da calibração através do referido algoritmo.
- Programar e elaborar um programa capaz de introduzir, de forma amigável, os dados necessários para realizar a calibração de redes de distribuição de água utilizando uma biblioteca das funções pertinentes aos algoritmos genéticos e outra biblioteca, *Toolkit* do Epanet® *build* 2.00.12, que permite realizar a simulação hidráulica da rede.
- Operacionalizar o Sistema Piloto de Distribuição de Água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (SPDA do LENHS UFPB), identificando os modos de operação e pontos das leituras de pressão e vazão da rede para fins de validação da calibração proposta.
- Realizar a calibração do SPDA do LENHS UFPB através das variáveis: rugosidade absoluta das tubulações, demanda nos nós, vazamentos, perda de carga localizada ou singular, cota topográfica dos nós e diâmetro interno das tubulações.

- Aplicar a calibração a uma rede real com mais de 150 km de tubulação, alimentada por gravidade por dois reservatórios que atende a uma população aproximada de 150 mil habitantes, correspondente aos bairros Prado, Trapiche, Pontal, Vergel, Ponta Grossa e o Centro da cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas, Brasil.

#### **1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS**

Este capítulo constitui-se no primeiro e aborda o objetivo geral e os objetivos específicos da tese, contextualizando, inicialmente, com algumas considerações iniciais sobre o abastecimento de água no modo geral, justificando a necessidade de se investir recursos e pesquisas para que se possa economizar em obras de reabilitação e principalmente, preservar ainda mais, um recurso natural tão imprescindível para a vida que é a água.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica de modo geral, iniciando com alguns conceitos sobre o abastecimento de água e introduzindo nomenclaturas relativas à rede de distribuição de água, modelagem hidráulica, variáveis e calibração no contexto hidráulico. Posteriormente é abordado o estado da arte com alguns trabalhos de relevância já publicados e que abordam o assunto desta tese.

O terceiro capítulo agrupa as informações referente a metodologia deste trabalho com uma descrição dos algoritmos envolvidos no processo de calibração, detalhes do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB e sua modelagem, e por fim, os procedimentos de medição realizados para cada variável.

Os resultados da análise dos parâmetros genéticos e os resultados obtidos nesta tese na aplicação da calibração no modelo hidráulico em duas redes reais: a rede do SPDA do LENHS totalmente instrumentalizada e automatizada com 155 m de tubulação e seis pontos de consumo e outra com mais de 150 km de tubulação que abastece alguns bairros da cidade de Maceió – Brasil, conhecida como Complexo Lagunar; são tópicos que fazem parte do quarto capítulo.

O quinto capítulo condensa as conclusões referente às metodologias utilizadas e aos resultados obtidos na aplicação dos algoritmos propostos em redes reais. Ainda neste capítulo são sugeridas recomendações para trabalhos futuros.

O sexto capítulo agrupam as referências utilizadas, principalmente no estado da arte, neste trabalho de tese e subsidiaram toda a teoria envolvida no processo hidráulico e nos algoritmos envolvidos.

O código fonte desenvolvido para a criação da biblioteca que agrupam as funções utilizadas nos algoritmos propostos neste trabalho de tese estão organizados no Apêndice I.

O Sistema Piloto de Distribuição de Água foi desenhado em escala e posteriormente transferido, na forma de modelagem, para um arquivo do Epanet. Todos os dados topográficos, comprimento dos trechos, diâmetros e saídas estão organizados no arquivo no formato INP no Apêndice II.

Os dados coletados experimentalmente e utilizados para a calibração do modelo hidráulico do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS estão organizados no Apêndice III, no formato de leitura do software desenvolvido.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 MODELAGEM DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O sistema de abastecimento de água representa todo o processo de fornecimento de água tratada que vai desde sua obtenção até sua utilização por parte da população, ou seja, compreende sua captação em águas profundas ou no manancial, estação elevatória, adutora para conduzir a água bruta, estação de tratamento, reservatórios, rede de distribuição e por fim ligações domiciliares. Todo o sistema é ilustrado na Figura 2.1.

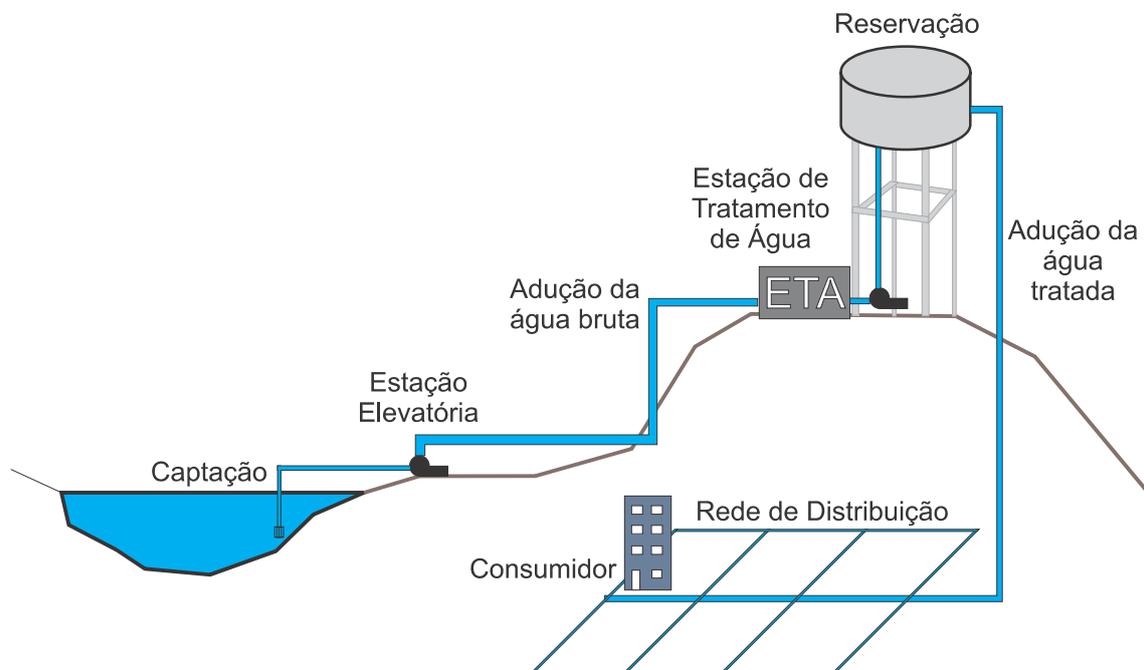


Figura 2.1 - Ilustração de um Sistema de Abastecimento de Água

A modelagem hidráulica é aplicada em todo o sistema de abastecimento, entretanto a rede de distribuição além de ser, das etapas do sistema de abastecimento, a que mais

requer investimentos, também é a que mais agrupa incertezas quanto à demanda, vazamentos, obstruções e o estado dos equipamentos e acessórios.

Uma rede de distribuição de água é o conjunto de elementos hidráulicos (tubulações, conexões, bombas, válvulas e reservatórios) interconectados, com a finalidade de conduzir e distribuir a água para os pontos de consumo em quantidade e qualidade aceitável. A seguir será apresentada uma nomenclatura específica, que designa as várias partes componentes de uma rede pressurizada de distribuição:

- Trecho: representa as tubulações que formam os percursos da rede de distribuição.
- Nó: É um ponto de ligação entre dois ou mais trechos, pode ser considerado como um ponto de consumo, consequentemente associado a uma demanda de água.
- Ramal: Conjunto de trechos conectados em série.
- Artérias: Trechos principais da rede de distribuição.
- Traçado da Rede: Configuração da distribuição das tubulações, com a definição da situação topológica de todos os componentes da rede.
- Alimentação: Início da rede de distribuição onde se localiza o reservatório ou o sistema de bombeamento.

A tipologia do traçado da rede pode ser classificada de dois tipos: malhada e ramificada. As redes ramificadas são caracterizadas por apresentarem um único sentido de fluxo para o escoamento. A principal vantagem dessa rede é que seu custo de implantação é mais barato que o de uma rede malhada de mesmo porte. No entanto, as redes ramificadas apresentam inconvenientes na manutenção, visto que para se executar um reparo em um trecho, todo o ramal a jusante ficará sem água. Dessa forma, o emprego deste tipo de rede tem sido descartado em locais onde o abastecimento de água não deve sofrer interrupções, como nos centros urbanos de médio e grande porte. As redes ramificadas são empregadas principalmente no abastecimento de sistemas de irrigação pressurizados, em pequenas comunidades e em urbanizações particulares. As redes malhadas, por sua vez, são caracterizadas por apresentarem os seus trechos interligados em forma de anéis, ou malhas, fazendo com que o sentido do fluxo possa ser alterado dependendo da demanda nos nós (GOMES, 2009).

O controle das pressões hidráulicas efetivas que vão atuar em uma rede de distribuição de água é um fator fundamental, pois interfere diretamente na qualidade do

serviço, nas perdas reais de água e no custo de implantação e operação do sistema. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, através da NBR12218 (1994), que trata do Projeto de Rede de Distribuição de Água para o Abastecimento Público, estabelece que a pressão dinâmica mínima em qualquer ponto nas tubulações distribuidoras deve ser de 100 kPa ( $\approx$  10 mca). A pressão máxima definida pela referida Norma é de 500 kPa ( $\approx$  50 mca). Esta mesma norma recomenda, também, que os trechos de condutos principais que não abastecem consumidores ou tubulações secundárias não estejam sujeitos aos limites de pressões máximos e mínimos estabelecidos.

Segundo Gomes (2004), em cidades com topografia acidentada, as redes devem ser divididas por zonas de pressão, de forma a atender aos limites de carga estabelecidos.

O limite de pressão superior nas redes deve ser imposto, pelos seguintes aspectos:

- Quanto maiores forem as pressões requeridas, maior será o custo energético de bombeamento, pois este custo é diretamente proporcional à altura manométrica de impulsão;
- Para maiores pressões na rede, as tubulações serão mais exigidas por necessitarem de maiores pressões nominais, sendo estas de maior custo;
- As possibilidades de rompimento das tubulações aumentam, com o aumento das pressões dinâmicas e estáticas da rede;
- As perdas físicas de água crescem com o aumento das pressões de serviço, pois a vazão nas fissuras ou juntas dos tubos aumenta com o acréscimo da pressão;
- As vazões nos pontos de consumo crescem com o aumento das pressões disponíveis.

Os limites de velocidades máxima e mínima admissíveis nas tubulações sob pressão em redes de distribuição de água deve ser de 3,5 m/s a máxima e 0,6 m/s a mínima, segundo a norma NBR12218 (1994).

As redes de distribuição de água possuem um escoamento em condutos forçados, ou seja, pressurizado. Essa classificação deve-se ao fato de que as pressões predominantes dentro das tubulações diferem da atmosférica - não uniformes, em decorrência da variação dos diâmetros, topografia e da incompressibilidade da água, uma vez que a massa específica deste fluido não apresenta variações significativas. Além de pressurizado, o escoamento também é classificado como sendo viscoso, provocando uma tensão de cisalhamento nas paredes da tubulação e como turbulento, pela caracterização de

movimentos aleatórios e tridimensionais das partículas do fluido. A tensão de cisalhamento é responsável pela força de atrito que transforma a energia mecânica em energia térmica ao longo da tubulação, de modo irreversível. O decréscimo de energia mecânica por unidade de massa é denominado de perda de carga.

A escolha correta das tubulações em sistemas de abastecimento é fundamental, pois reflete diretamente no seu dimensionamento. Fatores como: diâmetros, custo da tubulação, pressões de trabalho, cargas externas que poderão atuar sobre as tubulações, custo de instalação, manutenção, qualidade da água a transportar e características do terreno onde serão instalados os condutos, devem ser observados e considerados. Atualmente, os tipos de tubos mais utilizados nas redes de distribuição de água são os de plástico - Policloreto de Vinila (PVC), Polietileno, Poliéster Revestido com Fibra de Vidro (PRFV), e metálicos (ferro fundido e aço), havendo uma larga predominância dos tubos de PVC e de ferro fundido.

A maior ou menor quantidade de água requerida pelos sistemas de abastecimento, as perdas reais e os transtornos ocasionados pelas possíveis avarias nas tubulações, são aspectos que estão relacionados com o meio ambiente. Um sistema de abastecimento, com uma gestão adequada da sua demanda, poderá diminuir a vazão requerida e, conseqüentemente, contribuir para a preservação de seus mananciais. As perdas reais de água, que inevitavelmente ocorrem em todas as redes, e em todos os lugares, podem ser minoradas, preservando a água, elementos químicos utilizados no seu tratamento e a energia necessária à pressurização dos seus sistemas.

O conhecimento da eficiência do sistema de abastecimento, como também as decisões a serem tomadas com o objetivo de aumentá-la, depende do conhecimento e controle da operação do sistema como um todo. Durante muito tempo o controle operacional de sistemas de abastecimento, por parte das empresas de saneamento, foi executado com o apoio de equipamento de comunicação, de controle e, principalmente, da experiência da mão-de-obra encarregada do serviço. Nos últimos anos surgiram ferramentas computacionais que vêm sendo aplicadas, cada vez mais, para representarem os sistemas físicos e auxiliarem na tomada de decisão com o propósito de melhorar a eficiência da operação. Tratam-se de modelos computacionais que simulam o sistema de abastecimento como um todo e sua operação ao longo do tempo. Atualmente existem diversos modelos hidráulicos desenvolvidos em vários países, destinados a simulação da operação de sistemas de abastecimento de água.

Uma das características fundamentais dos modelos de simulação e análises é a presença da variável tempo. O objetivo do modelo não se restringe apenas a obter os valores das grandezas hidráulicas e sim o de determinar a variação destas grandezas ao longo do tempo (vazão nos trechos, pressão nos nós, níveis nos reservatórios etc). Em função da variável tempo os modelos podem representar os sistemas de forma estática ou dinâmica. Os modelos estáticos objetivam determinar os valores das variáveis do sistema para uma determinada condição (cenário) de operação. Nos modelos dinâmicos, as grandezas hidráulicas variam ao longo do tempo, em função de variações temporais dos consumos de água nos nós da rede. (GOMES, 2009)

O Epanet é um software de modelagem hidráulica e qualidade da água, desenvolvido pela EPA – *Environmental Protection Agency*, que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade em redes pressurizadas de distribuição de água. É possível estabelecer cenários de projetos, comparar com dados de medição resultando na calibração de modelos hidráulicos, análise do decaimento do cloro residual e a avaliação de consumos. Estes são alguns dos exemplos de aplicação do programa. As capacidades de modelagem hidráulica são inúmeras, onde se destacam como principais, segundo Rossman (2008):

- Dimensão ilimitada do número de componentes da rede analisada.
- 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, estreitamentos etc.
- Modelagem de bombas de velocidade constante ou variável.
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo.
- Modelagem 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 (p.ex. aspersores de irrigação, ou consumos dependentes da pressão).

- Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controles simples, dependentes de uma só condição (p.ex., altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controles com condições múltiplas.

A utilização do simulador hidráulico Epanet neste trabalho é justificada por ser um software livre, amplamente utilizado e difundido em projetos de pesquisa e que possui um toolkit, que é um conjunto de funções e procedimentos programados e compilados em uma biblioteca para utilização no desenvolvimento de outros programas e rotinas computacionais que utilizem simulação hidráulica. Os trabalhos de Cheung (2004), Neves (2007), Wu *et al.* (2011), Nicolini *et al.* (2011), Doosun *et al.* (2011) e outros utilizaram o toolkit do Epanet em apoio aos seus trabalhos de pesquisa na área de calibração de redes de distribuição. Estes e outros trabalhos serão discutidos ainda neste capítulo.

## **2.2 VARIÁVEIS APLICADAS AOS MODELOS DE CALIBRAÇÃO**

### **2.2.1 Variáveis aplicadas aos nós da rede**

#### **2.2.1.1 Demanda**

Em modelos hidráulicos de sistemas de abastecimento é comum, para fins de simplificação da rede de distribuição de água, agrupar em pontos específicos o consumo de água de uma área específica. Essa demanda pode representar a água requerida em uma quadra, um pequeno bairro ou até pequenas cidades; isto vai depender da modelagem que se deseja simular e analisar.

Em projetos de dimensionamento de novas redes, esses valores são estimados através do prolongamento da curva de crescimento populacional para um tempo futuro que representa o tempo de projeto. Encontrando a população futura, estima-se um consumo per capita, em litros/hab/dia, para encontrar uma demanda futura de projeto. Na ocorrência de algum evento inesperado, na região, essa demanda pode ser ultrapassada, sobrecarregando os sistemas de distribuição. Dentro desta perspectiva, atualmente, muitos sistemas de abastecimento, no Brasil estão “superados” e necessitam de manutenção, modernização e capacitação de mão de obra qualificada. A calibração através da demanda possibilita ter uma estimativa atual dos consumos nodais, podendo aparecer nesses resultados, possíveis

demandas não previstas no projeto original. Como já foi mencionada anteriormente, a média nacional do índice de perdas foi de 46,87%. Existe uma grande variação desse índice, no modo geral, em todos os estados. Na Paraíba essa variação pode ser observada na Figura 2.2. O que evidencia a falta de investimentos e modernização das redes de abastecimento e da gestão operacional no estado o que pode certamente ser estendido para o país. (SNIS, 2009)

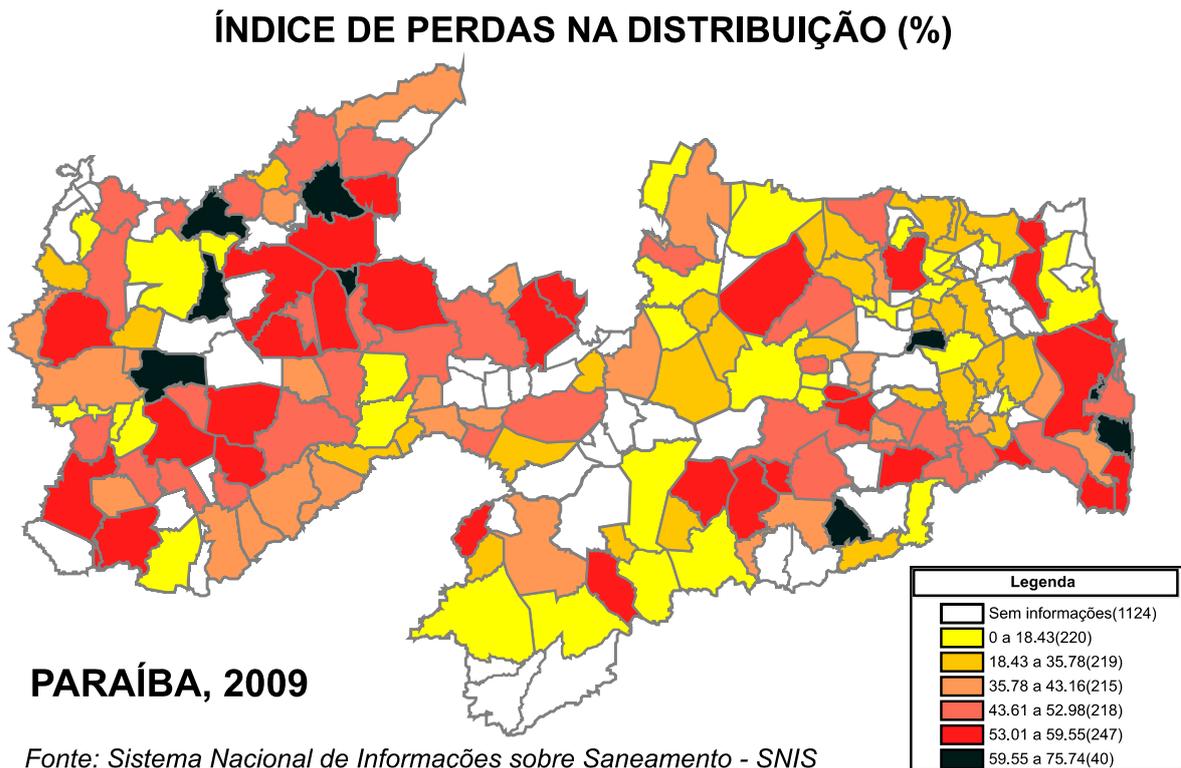


Figura 2.2 - Índice de Perdas na Distribuição de Água da Paraíba

As leituras das vazões para compor as demandas devem ser associadas com seus respectivos horários, já que durante as 24 horas do dia o consumo tem variações bastante específicas. Além da variação da demanda provocada pelo consumo, a pressão proporciona um incremento considerável nessa variável, por dois motivos principais: Os consumidores, em pressões elevadas, acabam consumindo e os vazamentos existentes nas tubulações, juntas e fissuras têm, em tubos de PVC, suas seções expandidas e um aumento significativo na vazão de descarga. Portanto, se faz necessária sua correção em simulações hidráulicas.

A análise local para a previsão da vazão através da medida de pressão próxima a saída d'água da rede será abordada utilizando como ponto de partida à aplicação da

equação de energia de Bernoulli, dentro de uma modelagem com base nos pontos A e B próximos as saídas da rede conforme mostrado na Figura 2.3.

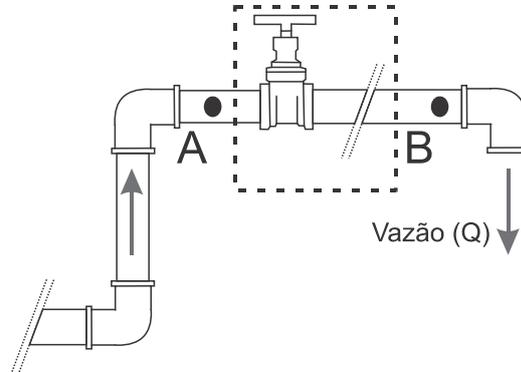


Figura 2.3 – Ilustração de um ponto de saída da rede de distribuição

Os pontos A e B representam a energia para um tempo de operação do sistema ( $t$ ), sendo A um ponto de pressão medido próximo da saída B (pressão atmosférica), que fornece uma vazão  $Q$  mediante uma configuração entre os pontos A e B. A Eq. 2.1 representa a análise de energia entre os pontos A e B.

$$\frac{p_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A - h_{fAB} = \frac{p_B}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B \quad (2.1)$$

Admitindo  $p_B$  como sendo pressão atmosférica e mesma cota topográfica, simplificamos a equação resultando na Eq. (2.2)

$$\frac{p_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} - h_{fAB} = \frac{V_B^2}{2g} \quad (2.2)$$

sendo  $h_{fAB}$  correspondente as perdas localizadas e contínuas entre A e B.

Analisando o consumo de forma local, quando há uma diminuição do consumo, ou seja, um estrangulamento em um ponto de saída da rede, há uma diminuição da energia cinética na saída. Parte dessa energia é incrementada nas perdas localizadas e contínuas entre A e B e outra parte é acumulada na rede na forma de pressão, aumentando a energia cinética das outras saídas que não foram alteradas. Em síntese, quando observado a questão da demanda pela pressão de forma local, fica muito difícil prever a demanda de um

determinado ponto com os dados de pressão a nível local, já que todas as outras saídas influenciam, de certa forma, em toda a rede.

Portanto, dependendo de como a rede é utilizada, a demanda tem sua variação fora de um padrão específico. Segundo GOMES (2009) o consumo de água varia de região para região e os principais fatores são o clima, padrão de vida, hábitos da população, existência ou não de micromedição, qualidade da água, custo, pressão de serviço na rede, usos comerciais, usos industriais, usos públicos, perdas no sistema etc.

Uma curva de demanda horária para uma determinada região possibilita uma modelagem dos consumos oriundos da população e os vazamentos existentes. Tal procedimento é possível através da medição a jusante da alimentação da rede em estudo. O Epanet possui uma opção para traçar uma ou mais curvas de demanda e assim associar aos seus respectivos nós, alterando dinamicamente o consumo ao longo do tempo (ver Figura 2.4).

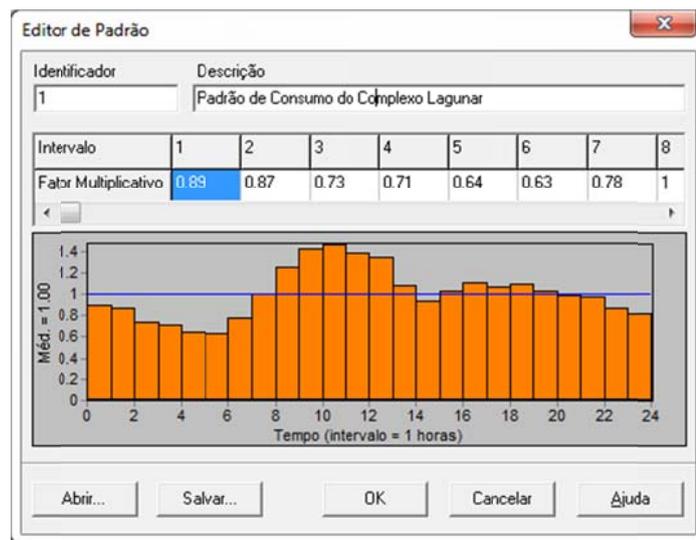


Figura 2.4 - Curva de demanda de uma rede real - Maceió - AL

### 2.2.1.2 Topografia

Topografia é a ciência aplicada que tem por finalidade representar a configuração de um terreno, geralmente com curvas de nível, destacando o relevo do solo (elevações e depressões). Em projeto de sistemas de abastecimento de água essa característica é fundamental para avaliar o posicionamento correto dos reservatórios e estações elevatórias, assim como a definição da topologia da rede. Além disso, todos os nós têm suas cotas

topográficas associadas para que seja realizada, através do simulador hidráulico, o cálculo da carga hidráulica em cada nó.

A topografia, através da cota topográfica, representa a variável, das que compõe este estudo, que têm seus dados mais confiáveis. Principalmente pelo avanço da tecnologia na área de geoprocessamento e pela utilização de equipamentos sofisticados, com conexão via satélite, tornando assim dados cada vez mais precisos. Essa variável representa a cota do terreno mediante uma referência específica e para cada nó da rede ela contribui ou desfavorece no cálculo da carga hidráulica. A inclusão como parâmetro de calibração vem da necessidade de se localizar possíveis erros em dados cadastrais da rede.

### 2.2.1.3 Vazamentos

São classificados como perdas reais e representa parte da água tratada que não é consumida. Grande parte das companhias e empresas do saneamento têm dificuldades de encontrar vazamentos dentro de suas redes de distribuição. Essas dificuldades vão desde a identificação do vazamento até a pertinente intervenção. Nos casos em que o vazamento aflora ou fica numa tubulação exposta, fica fácil intervir e reparar, mas quando a tubulação é enterrada, na maioria dos casos, e ainda em locais de difícil acesso, é praticamente impossível identificar visivelmente o vazamento, mesmo usando tecnologia específica para isto. Nesse contexto ferramentas computacionais e de modelagem hidráulica vem auxiliar nessa identificação.

## 2.2.2 Variáveis aplicadas aos trechos da rede

### 2.2.2.1 Rugosidade das paredes internas das tubulações

O fluxo da água no interior das tubulações resulta em perdas de energia, uma parte dessa energia se perde pelo atrito interno, bem como com as paredes internas das tubulações. Esse processo é conhecido por perda de carga contínua ou perda de energia por atrito e são calculadas através de diversas fórmulas empíricas. O Epanet trabalha com três tipos de fórmulas, neste trabalho vamos utilizar apenas duas delas: Darcy-Weisbach e Hazen-Williams. A fórmula Universal ou de Darcy-Weisbach (Eq. 2.3) é mais indicada já que pode ser utilizada para qualquer líquido e tubulação e provém de considerações físicas,

já a de Hazen-Williams (Eq. 2.4), que é uma fórmula empírica, é aconselhada para diâmetros superiores a 50 mm, normalmente utilizadas em projetos de adutoras por sua simplicidade.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = 8f \frac{LQ^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (2.3)$$

$$h_f = 10,66683 \frac{L}{D^{4,871}} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (2.4)$$

onde:

$h_f$  = perda de carga contínua, em m;

$L$  = comprimento da tubulação, em m;

$D$  = diâmetro interno da tubulação, em m;

$V$  = velocidade média da água, em m/s;

$f$  = coeficiente adimensional;

$Q$  = vazão em m<sup>3</sup>/s;

$C$  = coeficiente característico do conduto.

O coeficiente característico  $C$ , utilizado na fórmula da perda de carga de Hazen-Williams, reflete o tipo, tempo de uso e as condições do conduto e quanto maior for seu valor menor será a perda de carga provocada pelo escoamento do fluido. A Tabela 2.1 mostra valores do coeficiente  $C$  sugerido por Azevedo Netto *et al.* (1998). O coeficiente adimensional  $f$  depende da turbulência do escoamento, calculada pelo número de Reynolds, e da rugosidade absoluta da tubulação ( $\epsilon$ ) que assume valores que dependem do material do tubo. A Eq. 2.5 representa a consagrada formulação para  $f$ , obtida por Colebrook e White. A Tabela 2.1 organiza os valores para as duas fórmulas mencionadas para diversos tipos de condutos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (2.5)$$

onde:

$\epsilon$  = rugosidade absoluta da tubulação, em mm

$\text{Re}$  = número de Reynolds, adimensional

A escolha pela rugosidade como variável no processo de calibração é justificada, principalmente, quando as tubulações da rede a ser calibrada são desconhecidas ou já têm certo tempo de uso.

Tabela 2.1 - Valor do coeficiente C e rugosidade absoluta  $\epsilon$  para diversos tubos<sup>1</sup>

Tubos	Valores de C			$\epsilon$ (mm)	
	Novos	Usados (anos)		Tubos Novos	Tubos Velhos
		$\pm 10$	$\pm 20$		
Aço corrugado (chapa ondulada)	60	-	-	-	-
Aço galvanizado roscado	125	100	-	0,15 a 0,20	0,46
Aço rebitado, novos	110	90	80	1,00 a 3,00	6,00
Aço soldado comum revest. betuminoso	125	110	90	0,400	0,50 a 1,20
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115	0,04 a 0,06	2,40
Chumbo	130	120	120	0,01	0,01
Cimento-amianto	140	130	120	0,025	-
Cobre	140	135	130	0,01	0,01
Concreto, bom acabamento	130	-	-	0,30 a 1,00	-
Concreto, acabamento comum	130	120	110	1,00 a 2,00	-
Ferro fundido, revestimento interno epóxico	140	130	120	0,25 a 0,50	3,00 a 5,00
Ferro fundido, revestimento de argamassa	130	120	105	0,12	2,10
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110	1,50	-
Latão	130	130	130	0,02	-
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90	-	-
Plástico (PVC)	140	135	130	0,01	0,01

#### 2.2.2.2 Perda de carga localizada ou singular

Outros fatores que contribuem para as perdas de energia no escoamento do fluido no interior das tubulações se devem às mudanças bruscas de direção e de seção transversal do escoamento provocada por acessórios e conexões da rede (ex. registros, válvulas, reduções, joelhos etc). Em redes de grande porte essa parcela é pouco significativa, o que leva aos projetistas adotar, por questões de simplificação dos cálculos, valores da ordem de 10% da perda de carga contínua.

Entretanto, em algumas redes menores essa parcela deve ser calculada através do somatório das perdas de carga provocadas pelos acessórios e desvios das tubulações que compõe a rede (Eq. 2.6).

<sup>1</sup> Fonte: Azevedo Netto et al. (1998)

$$h_s = \sum k \frac{V^2}{2g} = \sum k \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \quad (2.6)$$

onde:

$h_s$  = perda de carga localizada ou singular, em m;

$k$  = coeficiente de perdas;

$V$  = velocidade do fluido, em m/s;

$g$  = aceleração da gravidade, em m/s<sup>2</sup>;

$Q$  = vazão, em m<sup>3</sup>/s;

$D$  = diâmetro, em m.

Para cada acessório ou válvulas existe um valor de “k” associado. As perdas de carga singulares podem ainda serem convertidas em perda de carga contínua, utilizando como referência seu diâmetro interno, entretanto, no Epanet, trabalha-se apenas com o coeficiente k. Os principais valores de k sugeridos por Azevedo Netto *et al.* (1998) são apresentados na Tabela 2.2.

A opção de incluir esta variável dentro do modelo de calibração foi a de possibilitar a calibração de pequenas redes, onde a parcela da perda de carga singular é bastante significativa, justificando assim a adição desta variável no processo de calibração.

Tabela 2.2 - Coeficientes de perdas k (extraídas de Netto *et al.* 1998)

Tipo de Acessório	k
Curva de raio longo	0,25 – 0,40
Curva de raio curto (cotovelo)	0,90 – 1,50
Curva de 45°	0,20
Crivo	0,75
Redução gradual	0,15
Registro de gaveta aberto	0,20
Registro globo aberto	10,00
Tê de passagem direta	0,60
Tê de saída lateral	1,30
Válvula de retenção	2,50
Válvula de pé	1,75
Entrada de reservatório	0,50

### 2.2.2.3 Diâmetro interno das tubulações

O diâmetro interno corresponde ao diâmetro efetivo pela qual passa toda a água em seu interior. O diâmetro interno tem muita influência no cálculo das perdas e na solução das equações hidráulicas. Dependendo da qualidade da água conduzida pelo conduto e da sua velocidade, é possível que, ao longo dos anos, haja um acúmulo de depósitos em seu interior, diminuindo assim sua área útil (ver Figura 2.5). Outra justificativa para adicionar esta variável ao processo de calibração é a de que ao se trabalhar com redes antigas onde não se tenham mais os registros dos diâmetros originais das tubulações implantadas em regiões específicas, será possível ter uma estimativa das tubulações que estão instaladas sem a necessidade de intervenções na rede.



Figura 2.5 - Tubulação com diminuição da seção transversal

### 2.2.2.4 Válvulas de controle

As válvulas são acessórios que fazem parte de todas as redes de distribuição de água e têm diversas funções em sistemas de abastecimento de água. Atualmente, em projetos de reabilitação, procura-se criar zonas de abastecimento distintas dentro da própria rede, conhecidas por DMCs (Distritos de Monitoramento e Controle), alimentadas apenas por um ou dois ramais, monitorados e controlados por válvulas reguladores de pressão (VRPs), garantindo assim, pressões de serviço dentro de limites aceitáveis.

Utilizando o modelo de calibração proposto neste trabalho, o LenhsCalibra, é possível utilizar na modelagem da rede os seis tipos de válvulas disponibilizadas pelo Epanet (ROSSMAN, 2008), que são:

- Válvula redutora de pressão (VRP)
- Válvula sustentadora de pressão (PSV)
- Válvula de perda de carga fixa (PBV)
- Válvula reguladora de vazão (FCV)
- Válvula de controle de perda de carga (TCV)
- Válvula genérica (GPV)

Como muitas companhias de abastecimento utilizam nas suas redes tais válvulas, foi adicionada esta variável como parâmetro de calibração do modelo proposto.

## 2.3 O ESTADO DA ARTE

### 2.3.1 Conceitos e Equações Fundamentais da Modelagem Hidráulica

A calibração de sistemas de distribuição de água não é realizada de forma direta, uma vez que o processo dinâmico do comportamento da água no interior das tubulações depende de algumas variáveis tais como a temperatura, a qualidade da água, material das tubulações e demais fatores que influenciam na sua distribuição ao longo da rede. Portanto, em sistemas reais, um sistema de distribuição leva certo tempo para se estabilizar, ou seja, equilibrar as equações hidráulicas que diz em respeito à continuidade nos nós (Eq. 2.7) e à conservação de energia nos anéis (Eq. 2.8):

$$\sum_{i=1}^{n_k} (Q_{entra})_i - \sum_{j=1}^{m_k} (Q_{sai})_j - d_k = 0 \quad (2.7)$$

onde:

$n_k$  = número de trechos com vazões chegando ao nó  $k$ ;

$m_k$  = número de trechos com vazões saindo do nó  $k$ ;

$(Q_{entra})_i$  = vazões dos trechos  $i$  que chegam ao nó  $k$ ;

$(Q_{sai})_j$  = vazões dos trechos  $j$  que saem do nó  $k$ ;

$d_k$  = demanda referente ao nó  $k$ .

$$\sum_{i=1}^{n_k} (h_f)_i - \sum_{j=1}^{m_k} (E)_j = 0 \quad (2.8)$$

onde:

$(h_f)_i$  = perda de carga referente ao trecho  $i$ ;

$n_k$  = número de trechos do anel  $k$ ;

$m_k$  = número de sistemas de impulsão (adição de energia) pertencente ao anel  $k$ ;

$(E)_j$  = energia adicionada no anel  $k$ .

A simulação hidráulica do Epanet determina a vazão nos trechos e a carga hidráulica nos nós, juntamente com os níveis de reservatórios, em função da variação do consumo ao longo do tempo caracterizada mediante uma curva de demanda. Em cada intervalo de tempo os valores das variáveis são atualizados em função da variação temporal da demanda de água na rede. A solução para o valor da carga hidráulica e para a vazão em um ponto particular da rede, para um determinado instante, é encontrada na solução da equação da continuidade (Eq. 2.7), para cada nó, e na solução da equação da conservação da energia (Eq. 2.8), para cada trecho da rede. Este balanço hidráulico da rede requer a utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas. O Epanet emprega o “Método do Gradiente” ou também conhecido por Método Híbrido Nó-Malha (TODINI e PILATI, 1988) para atingir esse objetivo.

Há décadas que muitos pesquisadores se preocupam em analisar e modelar a operação das redes de distribuição de água. Em avanço aos métodos tradicionais para a calibração de modelos hidráulicos de redes, na forma de tentativa e erro, métodos baseados em algoritmos lineares, não-lineares e outros procedimentos numéricos têm sido desenvolvidos, possibilitando melhores resultados de modelagem e calibração.

A simulação de sistemas de distribuição de água é uma realidade nos desenvolvimentos de projetos por parte das companhias e em pesquisas de otimização, operação e calibração de redes hidráulicas. Os *softwares* que realizam este procedimento de simulação, através de rotinas computacionais, possibilita a solução hidráulica, em regime permanente, da modelagem de redes de distribuição. Com essas ferramentas, muitas redes de médio e grande porte podem ser simuladas e analisadas, possibilitando ainda a incorporação de metodologias na otimização de projetos de dimensionamento, calibração, qualidade da água etc.

Segundo Silva *et al.* (2003) pode-se dizer que os procedimentos de calibração de redes de distribuição de água podem ser divididos basicamente em 3 categorias: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos.

Os métodos iterativos, geralmente utilizam a metodologia de tentativa e erro, ou de incremento e decremento partindo de uma solução extrema (p. ex diâmetros mínimos, demandas máximas etc), onde em cada iteração os valores medidos são comparados aos simulados. Neste tipo de método a convergência do algoritmo está vinculada ao número de iterações ou se a diferenças dos dados medidos e simulados estiverem dentro de um limite que vai depender da precisão que se deseja calibrar. Os principais trabalhos que utilizaram essa metodologia foram os de Bhave (1988), Tucciarelli *et al.* (1999), Alvisi e Franchini (2010) e Wu *et al.* (2011).

Bhave (1988) aplicou um método iterativo de calibração que modificava as demandas nodais e o coeficiente de resistência das tubulações para ajustar os valores calculados e observados. Em seu trabalho, as tubulações são divididas em zonas, para que esse ajuste seja feito em grupos de tubos e ainda há uma simplificação dos diâmetros menores, em que valores inferiores a 150 mm são agrupados formando diâmetros equivalentes na modelagem, reduzindo a rede sem comprometer, significativamente, os resultados.

Gomes e Bezerra (2007) propuseram um método iterativo para a otimização do custo total para a reabilitação de redes ramificadas de abastecimento de água que trabalham com pressões e demandas nodais deficientes. A substituição de tubos e a adição da carga hidráulica no sistema de impulsão são alternativas de reabilitação. Este procedimento tem como base os critérios já utilizados por Granados (1986) na otimização e dimensionamento de redes.

Ormsbee e Wood (1986), Boulos e Altman (1991, 1993), Alvisi e Franchini (2010) utilizaram, para solução da calibração de redes pressurizadas de distribuição de água, os métodos explícitos ou diretos. Tais métodos têm como base a solução, em regime permanente, de equações e análise matricial em condições de contorno bem definidas utilizando como base as equações clássicas da energia e da continuidade.

Nos métodos implícitos ou inversos as variáveis ou parâmetros desconhecidos são estimados, ou seja, valores são atribuídos às demandas, rugosidades e demais parâmetros hidráulicos mediante utilização de algum procedimento ou algoritmo a fim de aproximar

sua resposta, em termos das variáveis de estado, de sua referência, o que significa minimizar as diferenças, principalmente, das pressões e vazões medidas e calculadas.

Cheung (2006) realizou a comparação de dois métodos de calibração, que foram aplicados e comparados em um modelo de rede hipotética. Os modelos são o método analítico e o método explícito. O principal objetivo foi avaliar a eficiência destas técnicas de calibração e compará-las entre si. O método analítico apresentou os menores desvios considerando o somatório das diferenças entre os valores observados e os valores reais para os setores. O método de calibração explícito possui sua formulação diferenciada do modelo anterior e apresentou os maiores desvios, porém sua formulação permite a flexibilidade no sentido de incorporar outras variáveis de decisão de calibração, operação, projeto e componentes hidráulicos.

Segundo Silva e Reis (2002) a análise das redes de distribuição de água para abastecimento baseada em modelos matemáticos de previsão do comportamento hidráulico via computador vem se mostrando fundamental em possibilitar o uso racional de recursos como água e energia elétrica. Em seu trabalho apresentou um modelo de calibração de redes de distribuição de água que considera os vazamentos, cujas variáveis de decisão são as rugosidades nos trechos da rede. Eles utilizaram os Algoritmos Genéticos (AGs) para a determinação das variáveis do problema na otimização correspondente, cuja aplicação foi feita para uma rede hipotética, constituindo etapa preliminar de um estudo completo realizado para redes reais da Cidade de São Carlos – SP. A análise dos resultados obtidos, na época, mostrou que eles podem ser considerados promissores.

Neves (2007) desenvolveu um algoritmo de calibração utilizando o problema inverso associado a um simulador hidráulico de escoamento de água em regime permanente e algoritmos genéticos como técnica de otimização. O software foi testado para diversos valores dos parâmetros de entrada com a finalidade de avaliar a influência de cada um desses valores na eficiência do algoritmo. Os resultados obtidos apontaram que o algoritmo conduz a bons valores de vazão, entretanto não se conseguiu obter uma única solução para as rugosidades na calibração. Quando a calibração é realizada pelo controle simultâneo da pressão e vazão, os resultados foram mais eficientes que a calibração apenas pela pressão.

Ormsbee e Lingireddy (1997) apresentaram uma metodologia para a calibração de redes de distribuição de água dividido em sete etapas, onde a última consistia em uma

calibração mais difícil, por ajustar a demanda e as rugosidades até que as diferenças referentes a pressão e a vazão, computados e observados, fossem os mais próximos.

Greco e Giudice (1999) propuseram uma nova abordagem para modelos de calibração para redes de distribuição de água, utilizando um algoritmo de otimização não-linear. A rugosidade absoluta das tubulações é ajustada sempre que a rede é simulada sem falhas. A função objetivo foi a minimização da soma do quadrado das diferenças entre as rugosidades calibradas e estimadas inicialmente, dentro de um conjunto de restrições utilizando uma determinada matriz de sensibilidade.

A calibração de sistemas de distribuição de água tem se intensificado nos últimos anos com o auxílio das novas ferramentas computacionais, somado com o aumento significativo do poder de processamento das máquinas atuais, algoritmos mais robustos e maiores quantidade de variáveis a serem calibradas, obtendo-se resultados mais precisos.

### **2.3.2 Vazamentos dirigidos pela pressão**

O Epanet modela indiretamente vazamentos em redes, mediante um escoamento através de um orifício com descarga direta para a atmosfera. A vazão através deste modelo varia em função da pressão no nó ou orifício segundo a Eq. 2.9.

$$q = C \cdot p^y \quad (2.9)$$

onde:

q = vazão;

p = pressão no orifício;

C = coeficiente de vazão;

y = expoente do emissor ou orifício.

Este modelo pode ser usado para simular perdas em tubulações (se o coeficiente de vazão e o expoente da pressão, para a perda na junta ou fissura, poderem ser estimados) (ROSSMAN, 2008).

### **2.3.3 Demanda orientada pela pressão**

Segundo Tucciarelli *et al.* (1999) a perda de água real que ocorrem nas tubulações próximas a cada nó não é constante e depende tanto da pressão, assim como das características da rede. Em seu trabalho, um procedimento pelo método inverso é proposto,

obtendo uma boa estimativa dos parâmetros desconhecidos, especialmente aqueles relacionados com a perda real de água. Na concepção deste modelo, para o desenvolvimento das equações, assumem-se as condições em estado estacionário combinado com a continuidade da massa e momento do fluido, resultando em uma combinação de equações algébricas (eq. 2.10, 2.11 e 2.12).

$$\sum_{j=1}^{M_i} \frac{H_j - H_i}{\sqrt{R_{ij} |H_j - H_i|}} - \delta_1 Q_i - P S_i = 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.10)$$

$$Q_i = (H_i - z_i)^a \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} S_i &= S_i^0, & \text{para } H_i - z_i > h^0 \\ S_i &= S_i^0 \operatorname{sen}^2 \left( \frac{H_i - z_i}{2h^0} \right), & \text{para } h^0 \geq H_i - z_i > 0 \\ S_i &= 0 & \text{para } 0 \geq H_i - z_i \end{aligned} \quad (2.12)$$

onde:

$N$  = número total de nós;

$M_i$  = número total de tubos conectados ao nó  $i$ ;

$H_j$  = carga hidráulica total;

$Q_i$  = perda de água por unidade de tempo de um pequeno vazamento próximo ao nó  $i$ ;

$z_i$  = cota topográfica;

$\delta_1$  = igual a 1 ou 0 se a carga total no nó  $i$  for maior ou menor que a cota topográfica;

$P$  = demanda nodal;

$S_i$  = fator espacial de distribuição para a demanda total referente ao nó  $i$ ;

$a$  = expoente de perda;

$L_{ij}$  = comprimento da tubulação;

$D_{ij}$  = diâmetro do tubo;

$\theta_{ij}$  = superfície de vazamento por superfície do tubo que liga os nós  $i$  e  $j$ ;

$S_i^0$  = fator de distribuição espacial da demanda para o nó  $i$

$h^0$  = é a pressão mínima requerida (5 – 10 m).

Para o cálculo do  $Q_i$  assume-se que as tubulações de cada zona ou região têm uma área de vazamento constante por unidade de área das paredes internas das tubulações.

Soares (2003) desenvolveu, com o auxílio do *Toolkit* do Epanet, uma rotina computacional considerando as perdas por vazamento e a dependência das demandas com a pressão. Como análise do seu algoritmo, utilizou dados de uma rede hipotética com vistas à calibração em termos das rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas e parâmetros do modelo de vazamentos, assim como a localização de componentes hidráulicos da rede. O autor utilizou modelos inversos resolvidos através dos Algoritmos Genéticos em conjunto com o Método Simplex (NELDER e MEAD, 1965). Devido à grande quantidade de variáveis no processo de calibração nem sempre resultou em convergência do modelo hidráulico. Soares (2003) apresentou um resumo dos principais modelos que objetivam considerar a dependência das demandas pela pressão (ver Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Resumo dos modelos de demanda x pressão segundo Soares (2003)

Modelo	$H_i \leq H_i^{\min}$	$H_i^{\min} < H_i < H_i^{des}$	$H_i \leq H_i^{des}$	Obs.
JOWITT (1995)	0	$1 - a_i \cdot \exp\left(-b_i \cdot \frac{H_i}{H_i^{des}}\right)$	1	$a_i = 3 \text{ a } 10$ $b_i \approx 5m$ $H_i^{des} = 20 \text{ a } 35m$
FUJIWARA & LI (1998)	0	$\frac{(H_i - H_i^{\min})^2 \cdot (3H_i^{des} - 2H_i - H_i^{\min})}{(H_i^{des} - H_i^{\min})^3}$	1	$H_i^{\min} \approx 5m$
TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999)	0	$\text{sen}^2\left(\pi \frac{H_i}{2H_i^{des}}\right)$	1	$H_j^{\min} = 0$
TABESH & KARIMZADEH (2000)	0	$\left(\frac{H_i - H_i^{\min}}{H_i^{des} - H_i^{\min}}\right)^{\frac{1}{n}}$	1	$1,5 \leq n \leq 2$ $H_i^{\min} = 5 \text{ a } 6m$
MARTINEZ, CONEJOS & VERCHER (1999)	0	$K_i (H_i - H_i^{\min})^\gamma$		$\gamma = 0,5$ (descarga p/ atmosfera) $\gamma = 0,21$ (Valência-Espanha)

Cheung (2004) apresentou contribuições às análises multiobjectivo via algoritmo genético, pesquisando também os operadores (recombinação e mutação) e diversos

métodos de seleção, com vistas à reabilitação de redes de distribuição de água, onde foram considerados: custo, benefício, vazamentos e confiabilidade. Também introduziu as perdas por vazamentos como demanda variável com a pressão, resultando em uma análise mais realista do problema. Os primeiros estudos realizados neste trabalho objetivaram o acoplamento do simulador hidráulico convencional (Epanet 2.0) ao compilador Borland® Builder C++ 5.0. Esse acoplamento foi realizado através do *Toolkit*, biblioteca de funções, e possibilitou que as rotinas do Epanet 2.0 pudessem ser requeridas dentro do compilador C++. Não houve problemas nesse acoplamento, podendo-se afirmar que o Epanet 2.0 via *Toolkit*, trabalha eficientemente.

Soares *et al.* (2004) avaliou as perdas por vazamentos de um setor da rede de distribuição de água da cidade de Piracicaba-SP. Um procedimento iterativo foi utilizado na avaliação hidráulica na consideração das perdas por vazamento, assim como a dependência das demandas com a pressão. Foi utilizado o simulador hidráulico Epanet 2 (ROSSMAN, 2000), com vistas à calibração em termos dos parâmetros do modelo de vazamentos, e ainda os coeficientes de perda de carga localizada relativo à componentes hidráulicos presentes na rede. Para a resolução do problema inverso correspondente foram utilizados os Algoritmos Genéticos (AGs).

Segundo Wu e Sage (2006), identificar quanta água está sendo perdida em redes de abastecimento de água e onde a perda ocorre é de grande importância. Em seu trabalho foi desenvolvido um processo de calibração que simultaneamente quantifica e localiza perdas de água. O modelo de calibração é formulado através de um problema de otimização não-linear que é solucionado usando um Algoritmo Genético. Os resultados encontrados foram eficazes na detecção de perdas, entretanto a precisão dependia da quantidade de dados observados em campo.

Moraes (2008) desenvolveu um trabalho visando à modelagem e simulação do comportamento do cloro residual, para que este critério venha ser usado como uma ferramenta eficiente de gerenciamento dos sistemas de distribuição de água. Para isso ele realizou uma calibração hidráulica e de qualidade para um setor de uma rede de distribuição de água real do município de São Carlos-SP-Brasil, considerando os vazamentos. Elaborou-se também uma metodologia para a calibração dos parâmetros dos algoritmos genéticos através do uso do “*Particle Swarm Optimization*” (PSO). Foram testados diversos modelos de vazamento para determinação de qual modelo seria capaz de representar, de maneira mais fidedigna, o comportamento hidráulico da rede. Os resultados

obtidos apontaram os modelos que admitem vazamento por comprimento linear da tubulação como sendo mais adequados.

Gomes *et al.* (2009) Apresentaram resultados de calibração do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba. A solução de calibração foi obtida pela minimização da discrepância entre os dados de vazão e pressão do modelo desenvolvido e os dados observados em campo para seis cenários diferentes. A variável para ajuste da rede foi o coeficiente de perda de carga localizada (K) em virtude da grande quantidade de conexões e acessórios instalados na rede. A modelagem de tentativa e erro apresentou resultados satisfatórios.

Santos (2010) em seu trabalho titulado “Estudo de calibração de uma rede de distribuição de água de Itajubá - MG utilizando os Algoritmos Genéticos”, aplicou uma metodologia de calibração proposta por Silva (2003) a um sistema de distribuição da Cidade de Itajubá - M.G., Esta metodologia utiliza o procedimento inverso, também conhecido como implícito, para calibrar o sistema, avaliar a eficiência hidráulica e otimizar a operacionalização da rede. O procedimento inverso consiste na minimização da diferença dos valores de alguns parâmetros simulados e medidos do sistema de distribuição de água, no caso pressão e vazão. Esta função a ser minimizada é chamada de função objetivo (F.O.) e o parâmetro por ele escolhido para ajuste foi a rugosidade das tubulações.

Wu e Walski (2011) apresentaram uma metodologia para a calibração dinâmica de um sistema de distribuição de água em um longo período de simulação, usando como referência o problema de calibração desenvolvido para o *Battle of Water Calibration Networks* (BWCN). A calibração é realizada de forma progressiva, ajustando os parâmetros do modelo de forma iterativa. Foram utilizadas 167 horas de dados monitorados do sistema SCADA, resultando em uma calibração satisfatória quando comparada aos resultados encontrados do evento mundial na qual foi lançado o desafio dessa calibração.

Nicolini *et al.* (2011) aplicaram duas metodologias para uma rede real de distribuição de água. A primeira envolve um modelo de calibração, enquanto a segunda é específica para resolver o problema da estimativa ótima do coeficiente de vazamentos. O algoritmo utilizado foi o algoritmo genético para proporcionar, como resposta, a rugosidade e o coeficiente de vazamentos. O controle do vazamento no modelo proposto é realizado através da introdução e manobra de uma válvula reguladora de pressão. O

posicionamento e regulação das válvulas teve como algoritmo de otimização os Algoritmos Genéticos Multiobjetivos.

## **2.4 ALGORITMO GENÉTICO**

### **2.4.1 Introdução**

Os Algoritmos Genéticos são métodos de busca estocástica que procuram reproduzir de forma lógica e matemática os mecanismos da evolução natural das espécies, utilizando os processos da genética das populações. Os conceitos de seleção natural e sobrevivência do indivíduo mais apto advêm da evolução oriunda da genética, esses conceitos fundamentam o Algoritmo Genético (AG). Foram introduzidos no meio científico por Holland (1975) e popularizado por um de seus alunos, Goldberg (1989). A inspiração para o desenvolvimento desse algoritmo vem da teoria de Charles Darwin, publicado em seu livro *A origem das espécies* (1859). Segundo Charles Darwin, “Quanto melhor um indivíduo se adaptar ao seu meio ambiente, maior será sua chance de sobreviver e gerar descendentes”.

Apesar dos AGs apresentarem, na composição do seu nome, o termo algoritmo, estes são, na verdade, heurísticas de busca para ótimos locais, não garantindo que o resultado final encontre o valor ótimo ao final de sua execução. Problemas com grande espaço de busca, como é o caso para calibração de sistemas de abastecimento, tem se mostrado um desafio no meio científico e tecnológico nas ultimas décadas nesta linha de pesquisa, pela procura da solução ótima global. Uma das formas para garantir essa solução é a utilização de algoritmos de enumeração completa, ou seja, tentar todas as combinações possíveis. Entretanto, ainda hoje, muitos problemas não podem ser solucionados facilmente, devido ao longo tempo de processamento necessário para contemplar todas as possibilidades.

#### **2.4.1.1 Codificação das Variáveis**

Um cromossomo é uma estrutura com informações que representam uma solução do problema mediante avaliação através de uma função objetivo. Normalmente o cromossomo é configurado como um vetor ou uma sequência de *bits*, semelhante a um

DNA que possui quatro bases nitrogenadas: guanina, citosina, timina e adenina. Em geral, um cromossomo agrupa valores de variáveis que fazem parte ou influenciam na resposta da função objetivo que deverá ser maximizada ou minimizada a depender do problema. Um grupo de cromossomos, ou também conhecido como indivíduos, representa a população que vai compor o Algoritmo Genético. A análise populacional de um Algoritmo Genético repercute diretamente em seu desempenho. Uma população pequena, dependendo do tamanho do espaço de busca da solução, não atinge todas as partes do espaço, podendo-se encontrar uma solução diferente da solução ótima buscada. Em grandes populações o espaço de busca é totalmente preenchido, mas o tempo para processar o algoritmo aumenta drasticamente, comprometendo sua utilização.

#### 2.4.1.2 Seleção

Primeiramente se faz necessário criar uma população inicial, que é a quantidade de indivíduos criados inicialmente para compor a primeira geração. Essa população é gerada aleatoriamente, principalmente nos casos onde se desconhece a região do espaço de busca onde se encontra a solução do problema e representa o conjunto de cromossomos que serão avaliados mediante função objetivo. É importante ressaltar que uma quantidade pequena para a população inicial poderá comprometer o resultado final por não atingir todo o espaço de busca.

Com essa avaliação inicial o Algoritmo Genético seleciona os cromossomos da população inicial para gerar seus descendentes (cromossomos filhos); essa seleção vai compor uma população intermediária (também conhecida como *mating pool*) que será aplicada, mediante uma probabilidade de combinação, os operadores *crossover* e de mutação.

A população intermediária faz parte da população que é selecionada para reprodução. Pequenos valores dessa população resultam em uma convergência lenta e ressalta os primeiros resultados, podendo convergir em um máximo local. Valores muito próximos da população inicial acabam excluindo alguns indivíduos que tenham boas características.

Foram utilizados três tipos de seleção na obtenção da população temporária como opção para a calibração de modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água, cada um dos tipos será comentado a seguir:

## Uniforme

Esse tipo de seleção é o mais simples. A população é ordenada de forma decrescente pelo valor da aptidão de cada cromossomo ou crescente pelo valor da função objetivo no caso da melhor aptidão ser o menor valor da função objetivo. Parte da resultante dessa ordenação compõe a população intermediária, que corresponde aos melhores resultados da função objetivo.

## Roda da Roleta

Nessa opção de seleção cada cromossomo terá uma probabilidade de ser selecionado (Eq. 2.8). Aqueles mais aptos terão uma maior probabilidade de serem escolhidos.

$$p_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2.8)$$

onde:

$A_i$  = é a aptidão associada a cada indivíduo  $i$

$N$  = é o tamanho da população

$p_i$  = a probabilidade para seleção de cada indivíduo.

Uma ilustração do processo utilizado na roda da roleta pode ser observada na Figura 2.6. O algoritmo consiste em gerar um valor aleatório, inteiro, entre 0 (zero) e a soma de todas as aptidões; em seguida, na sequência aleatória em que os indivíduos estão cada aptidão é somada até que essa soma ultrapasse o valor gerado aleatoriamente, sendo esta a aptidão escolhida.

## Torneio

Nesse tipo de seleção dois ou mais indivíduos são escolhidos aleatoriamente e são comparadas suas aptidões ou os valores da função objetivo; aquele que tiver o melhor valor será selecionado como campeão. Uma população intermediária de campeões é formada para passar pelo processo de reprodução mais adiante.

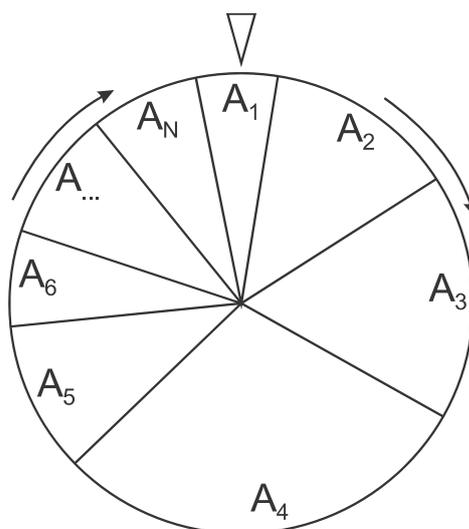


Figura 2.6 - Ilustração do processo da roda da roleta

#### 2.4.1.3 Reprodução e Mutação

Com a seleção da população intermediária, que passará pelo processo de reprodução ou recombinação, dois indivíduos são selecionados aleatoriamente e seu material genético (cromossomo), aqui representado pela cadeia de bits, passará algumas informações para seus descendentes. O operador *crossover* é aplicado com uma dada probabilidade a cada par de cromossomos selecionados da população intermediária. Segundo Lacerda e Carvalho (1999), na prática esta probabilidade, denominada de taxa de crossover, varia entre 60% e 90%. Não ocorrendo o crossover, os filhos serão iguais aos pais, permitindo assim a preservação de algumas soluções.

A forma como essa informação é transferida dos pais para os filhos pode se dar de varias formas, mas foram abordadas apenas as duas formas utilizadas neste trabalho:

##### Crossover de 1 ponto

Nesse caso o material genético, representado pela cadeia de *bits* dos pais, é dividido em uma posição aleatória, produzindo com essa divisão duas parte: a primeira parte, representada como “cabeça”, e a segunda parte, como “cauda”. Aplicando esse princípio aos materiais genéticos dos pais, depois de realizada a segmentação, Os filhos terão seus materiais genéticos da seguinte forma: O primeiro com a “cabeça” de um e a

“cauda” do outro e o segundo com a “cauda” de um e a “cabeça” do outro. A Figura 2.7 ilustra uma segmentação dos pais dando origem aos filhos pelo processo do *crossover* de 1 ponto.

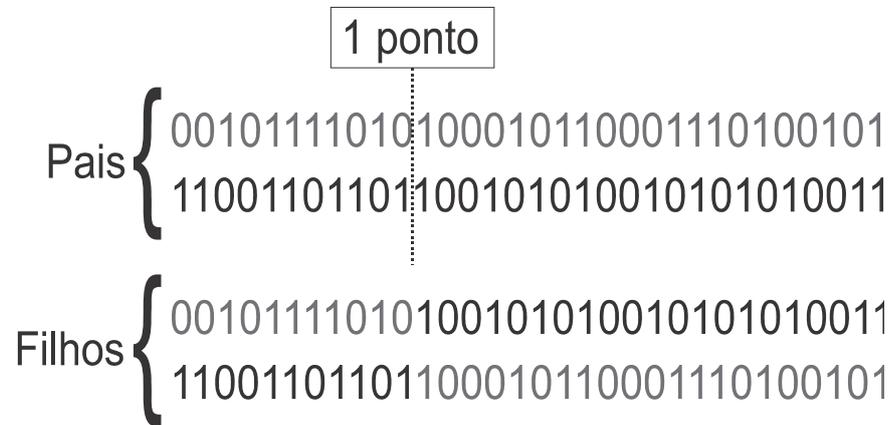


Figura 2.7 - Crossover de 1 ponto

#### Crossover de n pontos

Esta outra opção do *crossover*, também conhecida por uniforme, cada um dos dois filhos é gerado da seguinte forma: Cada um dos pais é identificado como 1º e 2º, a seguir cada um dos *bits* da cadeia de cromossomo dos pais é gerado um número aleatório entre 0 e 1. Se o valor obtido for inferior a 0,5, então o bit, na mesma posição referente aos pais, é admitido do 1º. Caso contrário o bit admitido é do 2º, ou seja, cada bit do cromossomo do filho é obtido dos pais de forma aleatória e igual para cada um dos pais como é ilustrado na Figura 2.8.

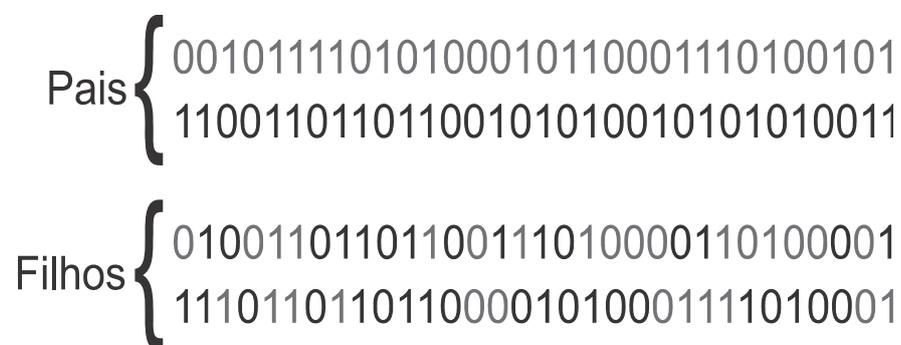


Figura 2.8 - Crossover de n pontos

## Mutação

A mutação é realizada após o processo de reprodução, modificando um ou mais bits da cadeia do cromossomo de forma aleatória e com uma probabilidade muito baixa. Em muitos dos trabalhos pesquisados seus valores foram de 0,1% até 5%, sendo esta uma variável fundamental para diversificar os indivíduos, encontrando novas soluções no espaço de busca.

### 2.4.1.4 Elitismo

Após reprodução da população intermediária os filhos irão compor a nova geração. Entretanto, para manter o melhor resultado dentro do conjunto de soluções, o melhor indivíduo da população é transferido para a nova geração. Esse procedimento é conhecido por Elitismo e representa um dos parâmetros do Algoritmo Genético.

### 2.4.1.5 Função Objetivo

A função objetivo consiste em uma função matemática onde as variáveis calibradas têm influência, direta ou indiretamente, e tem a finalidade de atribuir a cada cromossomo ou indivíduo um valor que o qualificará quanto a mais ou menos apto dentro da atual geração. A utilização de duas ou mais funções caracteriza o algoritmo como Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGM).

### 2.4.1.6 Critérios de Parada

Nos Algoritmos Genéticos não existe apenas uma solução, já que o resultado final do algoritmo é uma população. Esse conjunto de indivíduos ou soluções, dependendo dos parâmetros atribuídos inicialmente para o Algoritmo Genético, pode demorar para encontrar uma convergência em que todos os indivíduos apontem para um valor único da função objetivo. Portanto se faz necessário criar critérios de parada para que o algoritmo finalize de forma eficiente sem comprometer sua convergência final. Existem diversos critérios que podem ser estabelecidos, os principais são:

- Quando o AG atingir uma determinada geração especificada.
- Quando a função objetivo convergir para um valor, se este for conhecido.
- Quando não houver melhoramento significativo no cromossomo de maior aptidão por um número de gerações.
- Quando o tempo de processamento atingir um limite.

#### 2.4.1.7 Objetivos do Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético, assim como muitos outros, foi desenvolvido com a finalidade de se obter a melhor solução possível para o problema, também considerada como a solução ótima global. O Algoritmo Genético possui um conjunto de parâmetros necessários para sua aplicação no problema a ser resolvido. Para uma grande quantidade de soluções ou variáveis de um determinado problema, uma população inicial maior é requerida a fim de preencher grande parte do conjunto de soluções, tal procedimento se faz necessário para encontrar valores próximos do ótimo global.

Dentro dessa perspectiva, muitos pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos, estatísticos e computacionais com a finalidade de encontrar ótimos locais ou exatamente a solução procurada. A Figura 2.9 ilustra uma função com seus ótimos locais e seu ótimo global na procura dos pontos máximos.

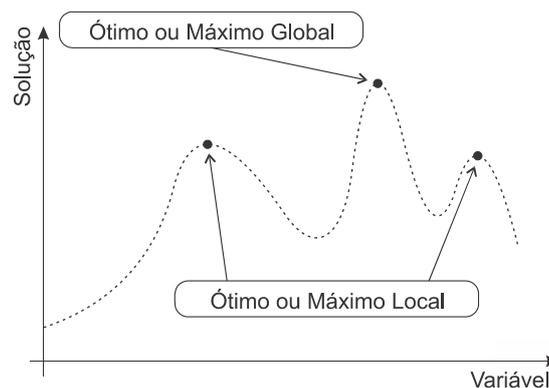


Figura 2.9 - Ilustração dos Máximos Locais e Global

Dentre muitos algoritmos possíveis, será utilizado o Algoritmo Genético com a possibilidade de trabalhar com mais de um objetivo, caracterizando como multiobjetivo, com a justificativa de se trabalhar com uma ferramenta amplamente utilizada no meio do abastecimento como projetos de calibração, otimização de operação e dimensionamento de

redes. E ainda por ser um algoritmo que tem como uma das características principais a possibilidade de trabalhar com muitas variáveis (Multivariada).

Dentre os trabalhos pesquisados, Soares (2003) foi o que mais utilizou variável dentro do processo de calibração. Em seu trabalho a calibração foi realizada em termos das rugosidades absolutas, demandas, diâmetros, cotas topográficas, parâmetros do modelo de vazamentos e localização de componentes na rede.

Neste trabalho de tese, serão consideradas sete variáveis: rugosidade absoluta, controle de válvulas, demandas nodais, parâmetros do modelo de vazamentos, diâmetros, perdas de carga localizadas ou singulares e as cotas topográficas.

#### 2.4.2 Definições

Existem algumas definições dos Algoritmos Genéticos com base nos conceitos da biologia. A Tabela 2.4 representa um comparativo conceitual das terminologias. Adaptado de (GOLDBERG, 1989; LACERDA E CARVALHO. 1999, BAKEN, 1975).

Tabela 2.4- Análise das terminologias utilizadas na Biologia e no Algoritmo Genético

Termo	Biologia	Algoritmo Genético
Base Nitrogenada	Estruturas que se organizam em pares para compor o DNA. Os pares são: Adenina com a Timina e Citosina com a –Guanina.	Um bit ou um valor que faz parte da informação de uma variável. É a menor unidade de informação dentro do cromossomo.
Gene	Unidade de hereditariedade, transmitida pelos cromossomos que retém as características de um indivíduo. Fragmento do DNA com um conjunto de bases nitrogenadas	Conjunto de bits ou um valor decimal que represente, dentro do cromossomo, uma variável do problema.
Cromossomo	Estrutura filamentosa encontrada no núcleo das células eucariontes e agrupa os genes ou as informações genéticas	Representa um indivíduo e conseqüentemente uma solução no universo de soluções possíveis.
Fenótipo	Aparência externa do indivíduo, em contraposição a sua constituição genética.	Cromossomo decodificado.
Indivíduo	Um membro da população	O cromossomo e seu respectivo valor de aptidão
Alelo	Uma das formas alternativas de um gene	Valores que as variáveis podem assumir
Crossover	Intercâmbio de fragmentos entre pares de cromossomos homólogos.	Mecanismo de criação de indivíduos através da recombinação dos cromossomos pais.
Mutação	Varição da estrutura hereditária do descendente em relação a seus pais	Alteração aleatória do valor de uma posição do cromossomo, ou seja, um dos bits.

O Algoritmo genético possui uma grande diversidade de modos de seleção, combinação, mutação, geração da população inicial etc. O conjunto de funções referente às operações do Algoritmo Genético foi desenvolvido nesta tese com as principais características dos demais algoritmos da literatura, visando sempre uma programação estruturada e otimizada para o processamento de redes maiores e reais.

### **2.4.3 Algoritmo Genético Multiobjetivo**

Quando se deseja utilizar mais de um objetivo, especialmente quando são conflitantes, o Algoritmo Genético deverá ser multiobjetivo (AGM) e sua busca na otimização destes objetivos produzirá um conjunto de soluções ótimas. Existe uma grande variedade de versões dos AGMs, destacam-se o MOGA (*Multiobjective Genetic Algorithm*), o NSGA (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) e o SPEA (*Strength Pareto genetic Algorithm*). A principal característica que diferencia cada um desses algoritmos consiste na atribuição do valor da função de aptidão aos indivíduos da população. Pode ser baseado na atribuição de pesos a cada um dos objetivos, como o HLGA (*Hajela's and Lin's Weighting-based Genetic Algorithm*), não Pareto (como a utilizada pelo VEGA) e baseadas em Pareto (como o NSGA e NPGA).

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Um dos motivos pelo qual o processo de calibração de redes de distribuição de água possui certo grau de complexidade se dá pelo fato da existência de grande quantidade de variáveis e equações envolvidas no processo. Neste trabalho a rede poderá ser calibrada por até sete variáveis simultaneamente ou qualquer combinação delas. Dependendo das características da rede a ser modelada e calibrada é possível definir limites para as variáveis e escolher quais variáveis calibrar.

Para validação da metodologia de calibração será utilizada, como estudo de caso, uma rede real em pequena escala, totalmente instrumentalizada que é a rede do Sistema Piloto de Distribuição de Água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba para a obtenção dos parâmetros genéticos e calibração das variáveis.

#### **3.2 METODOLOGIA DO LENHSCALIBRA**

O programa de calibração desenvolvido denominado de LenhsCalibra, incorpora duas alternativas distintas para calibração de redes de distribuição. A primeira alternativa utiliza um Algoritmo iterativo e a outra é realizada através dos Algoritmos Genéticos Multiobjetivo. O processo de calibração tem por objetivo, utilizando redes modeladas no simulador hidráulico Epanet, produzir informações compatíveis com suas respectivas redes reais. O processo de calibração proposto permite utilizar até sete variáveis, simultaneamente, ou qualquer combinação delas. Dependendo das características da rede a

ser modelada e calibrada é possível definir limites para as variáveis e escolher quais variáveis calibrar. A possibilidade de se trabalhar com mais de uma função objetivo caracteriza o algoritmo como Algoritmo Genético Multiobjetivo.

### 3.2.1 Algoritmo Iterativo

O Algoritmo Iterativo possibilita a modificação, de forma incremental, dos parâmetros do modelo da rede: rugosidades e demandas, ajustando os valores das medidas de pressão e vazão aos valores simulados no modelo hidráulico. Em cada iteração, cada objeto da rede é testado exclusivamente da influência da sua modificação em análise da aproximação dos valores simulados e medidos. Por fim a modificação é realizada na melhor solução encontrada para a iteração correspondente e o processo iterativo inicia uma nova iteração partindo da solução da modificação anterior.

Através deste algoritmo é possível calibrar através das rugosidades absolutas ou ajustando o coeficiente C, dependendo da fórmula da perda de carga utilizada, e demandas nodais. As informações quanto ao valor máximo permitido por cada variável, e o seu incrementador, são dados de entrada indispensáveis e servem para limitar o espaço de busca dentro de uma concepção prática, ou seja, a imposição de limites refere-se aos limites máximos e mínimos que determinadas variáveis podem assumir (ex. o coeficiente C da fórmula de perda de carga de Hazen-Williams, para um tubo de PVC, o valor máximo é em torno de 140 e o valor mínimo de 0).

A função objetivo (F) do algoritmo iterativo será a de minimização do somatório dos valores absolutos das diferenças entre os valores simulados ( $X_s$ ) e os valores reais ( $X_r$ ) das n leituras informadas, como mostra a Eq. 3.1.

$$F = \sum_{i=1}^n (|X_s - X_r|)_i \quad (3.1)$$

Partindo da configuração inicial da rede modelada, o algoritmo incrementa a rugosidade no trecho ou a demanda no nó, dependendo da escolha de qual parâmetro hidráulico foi escolhido como variável a ser calibrada. Logo em seguida, o modelo hidráulico da rede é simulado obtendo como resposta às variáveis de estado representadas pelas pressões nos nós e vazões nos trechos e verifica-se se houve um melhoramento na

função objetivo. Com a quantificação do melhoramento da modificação realizada mediante resposta da função objetivo, os parâmetros hidráulicos da rede modificados retornam aos seus valores originais. Utilizando o mesmo procedimento para todos os outros nós ou trechos da rede o algoritmo seleciona o nó ou trecho que proporcionou o melhor resultado obtido pela minimização da função objetivo para todas as medidas disponíveis e modifica-o efetivamente, atribuindo seu valor final o valor da rugosidade ou demanda acrescido do incremento. Caso não se tenha melhoramentos da função objetivo, no sentido de minimização, o algoritmo é finalizado dando como resposta a rede da sua última modificação.

Com a rede modelada no Epanet em conjunto com os dados de medição, o modelo LenhsCalibra através da seleção dos parâmetros das variáveis, seus valores limites e incrementador inicia o processo de calibração modificando a cada iteração o nó ou trecho até que não se tenha melhoramentos. O fluxograma da metodologia referente ao algoritmo iterativo pode ser observado na Figura 3.1. Em análise da complexidade do algoritmo iterativo, com base em uma entrada de “n” nós e “m” trechos, tem sua ordem respectivamente  $O(n^2)$  e  $O(m^2)$ , portanto quanto maior a rede mais tempo de processamento será necessário para finalizar o processo de calibração. Caso se queira calibrar simultaneamente pelas duas variáveis então a ordem é do tipo  $O(n^2.m^2)$ .

Portanto incluir mais variáveis dentro do modelo de calibração através do método iterativo deixaria o processo cada vez mais lento na busca da solução da calibração de modelos hidráulicos de redes. Por esse limite de variáveis e pelo tempo de processamento justifica-se a alternativa de se utilizar os Algoritmos Genéticos Multiobjetivo (AGM) como ferramenta principal de otimização do processo de calibração.

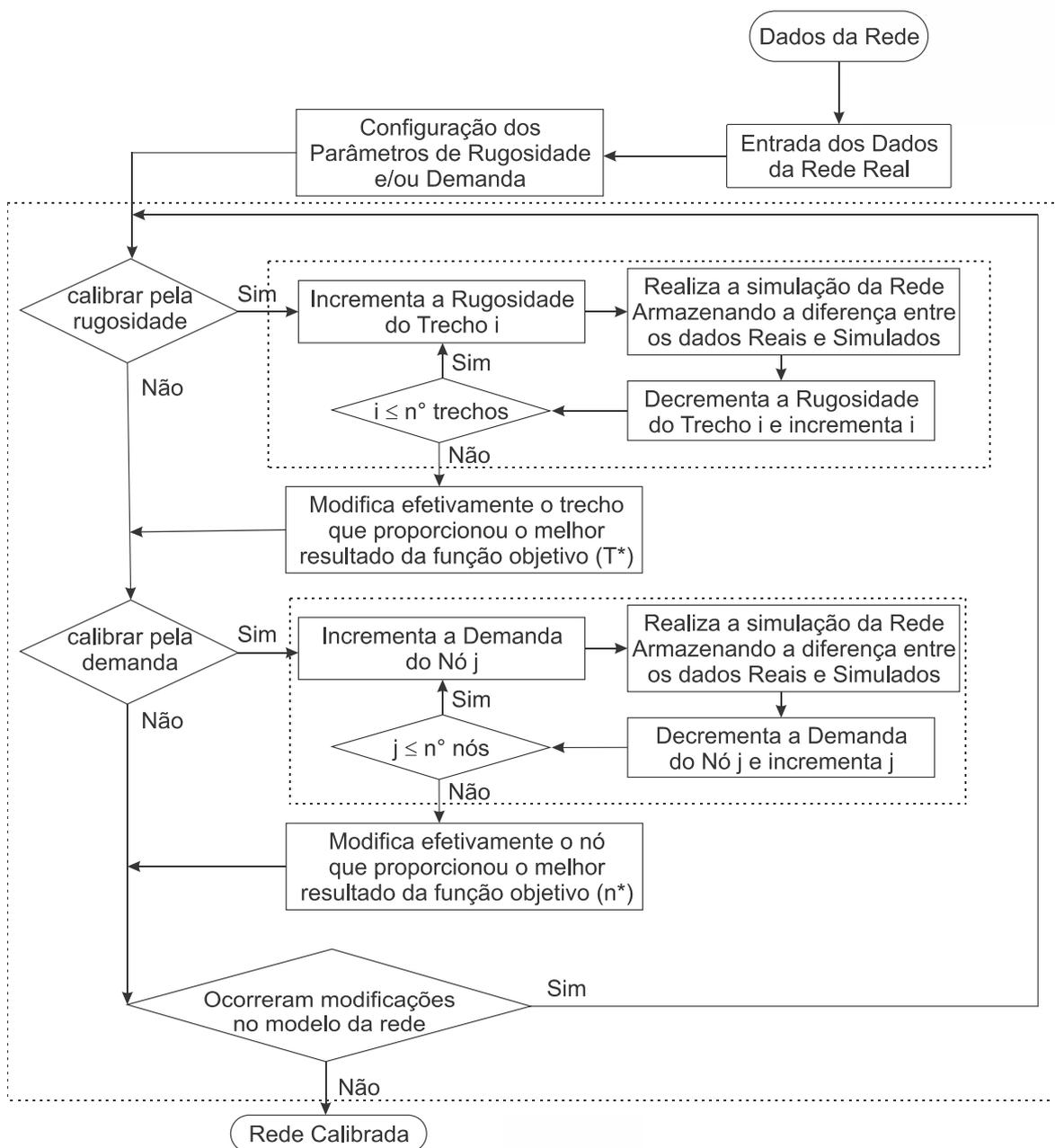


Figura 3.1 - Fluxograma do algoritmo iterativo de calibração

### 3.2.2 Algoritmo Genético Desenvolvido

Foi desenvolvida uma biblioteca de funções com a finalidade de utilizar o Algoritmo Genético Multiobjetivo como ferramenta de calibração de modelos hidráulicos de redes de abastecimento de água. Sendo uma das principais vantagens do algoritmo a possibilidade de se trabalhar com muitas variáveis, o calibrador pode ser utilizado com até

sete variáveis ou uma combinação delas. A escolha dessa combinação dependerá da confiança dos dados que se tem da rede real a ser calibrada.

Cada variável que participará do processo de calibração deverá ser codificada em uma tabela. Caso o número de elementos dessa tabela seja diferente de  $(2^n)$ , onde “n” representa o número de bits que codificará cada item da tabela, então se devem corrigir para não ocorrer, durante a mutação, parte da informação contida no cromossomo não corresponder a nenhum item da tabela. Como proposta de correção, caso ocorra isto, é escolhido um item aleatório da tabela em substituição ao gene defeituoso, eliminando, assim, o elemento desconhecido do cromossomo.

A escolha da codificação em tabela teve como finalidade a diminuição da representação, em número de *bits*, da variável em questão dentro do cromossomo, possibilitando assim a incorporação de mais variáveis dentro do modelo. Para exemplificar a codificação proposta, supõe-se que tem-se a princípio, 04 possíveis valores para os diâmetros de uma pequena rede exemplo, que são: 50, 100, 150 e 200 mm. Como o número de elementos do exemplo faz parte do conjunto dos elementos formados por  $2^n$ , então a tabela resultante ficará como apresentada na Tabela 3.1.

Para saber com quantos bits uma variável é codificada, basta igualar a quantidade de elementos da tabela com  $2^n$  e encontrar o valor de “n”. Para o exemplo da Figura 3.2, n é igual a dois.

Tabela 3.1 - Codificação para o exemplo proposto

Diâmetro (mm)	Codificação (bits)
50	00
100	01
150	10
200	11

Utilizando a Tabela 3.1, a codificação da rede exemplo ilustrada na Figura 3.2 resulta no cromossomo (111001100101000000), codificado segundo sequência crescente dos trechos da rede. Portando, o tamanho do cromossomo referente a uma variável será de  $(N_{OR}) \times (N_B)$ , onde “ $N_{OR}$ ” significa o número de objetos da rede da qual a variável é aplicada (nesse caso, cada trecho) e “ $N_B$ ” o número de bits necessários para representar cada elemento da tabela de codificação da variável em análise (para o exemplo da Figura 3.2, 2 *bits*).

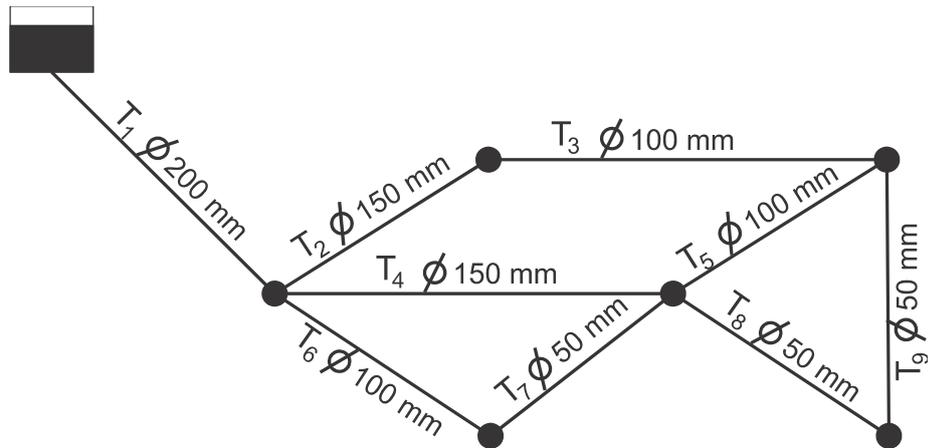


Figura 3.2 - Ilustração da Codificação de uma Rede

Nem todas as variáveis têm valores tabelados ou padronizados. Para solucionar isto, foi desenvolvida uma adaptação mediante limites máximos e mínimos para a variável em análise (Eq. 3.2), criando nesse intervalo, uma quantidade de “N” valores arbitrados pelo usuário, a depender da precisão que se deseja. Uma grande quantidade de valores implica em uma tabela maior e, conseqüentemente, uma representação binária maior para cada item.

$$V_{p_i} = V_{MIN} + \frac{(V_{MAX} - V_{MIN})}{N} \times i \quad (3.2)$$

Onde:

$V_{p_i}$  = é o valor procurado para o item na posição  $i$ ;

$V_{MIN}$  = é o valor mínimo admissível para a variável;

$V_{MAX}$  = é o valor máximo admissível para a variável;

$N$  = é a quantidade de valores no intervalo.

Durante o processo de calibração, o cromossomo deve ser decodificado, ou seja, o modelo hidráulico da rede deve assumir os valores informados no cromossomo. Para isto, a tabela que antes foi utilizada para codificar deve ficar armazenada, em memória, durante todo o processo. A decodificação utiliza o processo inverso, verificando a cadeia de *bits* do cromossomo e atribuindo valores às variáveis calibráveis que foram selecionadas para o modelo hidráulico, na ordem crescente dos nós ou trechos. Dependendo da quantidade de valores possíveis, organizados na tabela de codificação, para cada variável, verificam-se na

tabela de codificação os *bits* necessários para decodificar, atribuindo a cada trecho o valor correspondente à linha da tabela de codificação dos *bits* encontrados. Utilizando ainda o exemplo da Figura 3.2, percebe-se que a codificação da tabela correspondente à variável é representada por 2 *bits* em sua codificação. Em seguida, o algoritmo lê os 2 primeiros *bits* do cromossomo (11); a Tabela 3.1 é consultada obtendo-se como resposta o valor de 200 mm para a variável diâmetro. Esse valor é atribuído ao trecho e, sequencialmente, os demais trechos recebem seus valores de acordo com a disposição dos *bits* no cromossomo. Durante a calibração da rede experimental do SPDA foram arbitrados 1024 valores no intervalo das variáveis propostas para calibração, resultando em um cromossomo com 280 *bits* para cada variável utilizada. No caso da calibração do Complexo Lagunar da cidade de Maceió – AL, com 1024 valores no intervalo da variável, resultou em um cromossomo com 16.060 *bits*.

O Algoritmo genético possui muitos parâmetros em seus conceitos básicos. Foi desenvolvido como parâmetro genético no LenhsCalibra os mais conhecidos e utilizados nos trabalhos pesquisados que foram:

- Tamanho da População: Especifica o tamanho da população fixa, do início até o final das gerações.
- População Intermediária: População composta dos cromossomos que foram selecionados para a reprodução.
- Seleção
  - Uniforme: Seleciona os melhores cromossomos.
  - Roda da Roleta: Seleciona segundo uma probabilidade, onde os melhores são mais prováveis, mas permite uma chance aos demais.
  - Torneio: Seleciona aleatoriamente 3 cromossomos e o melhor dentre eles será escolhido.
- Reprodução ou Operador Crossover
  - Elitismo: Permite que os melhores cromossomos sejam repassados para a próxima geração.
  - Probabilidade: Representa a probabilidade da reprodução ser bem sucedida; caso contrário, os cromossomos dos pais são repassados para a próxima geração.
  - Tipo: A formação do cromossomo dos filhos é herdada dos pais, portanto no algoritmo genético os cromossomos dos pais vão ser

divididos para gerar o dos filhos. Através do seccionamento em um ponto, os cromossomos dos pais são divididos em duas partes e cada um dos filhos deve ficar com uma parte de cada um dos pais. O que dará origem a dois filhos, diferentes, e com características herdadas dos pais. O outro tipo é através do seccionamento de n pontos, ou também conhecido por uniforme, onde o cromossomo do filho recebe cada *bit* da cadeia de cromossomo dos pais, de forma aleatória e com probabilidades iguais.

- Mutação: Probabilidade de um bit do cromossomo inverter seu valor.

Para a escolha dos parâmetros do algoritmo genético será realizada uma análise de sensibilidade, com a varia o de alguns deles, verificando a itera o da sua convergência e o valor de convergência da Fun o Objetivo do melhor indivíduo.

Existem três op es de escolha para a Fun o Objetivo. Em dois casos, utiliza-se a minimiza o do somatório das diferenças das pressões nos nós e das vazões nos trechos da rede onde existem dados de medi o e uma terceira que utiliza a maior diferença encontrada das leituras e dos resultados simulados, são elas:

- Somatório da diferença absoluta dos pontos de pressão e vazão (Eq. 3.3)
- Somatório da diferença ao quadrado dos pontos de pressão e vazão (Eq. 3.4)
- Maior diferença dos pontos de pressão e vazão (Eq. 3.5)

$$F = \sum_{i=1}^n |P_S - P_M|_i + \sum_{j=1}^m |Q_S - Q_M|_j \quad (3.3)$$

$$F = \sum_{i=1}^n (P_S - P_M)_i^2 + \sum_{j=1}^m (Q_S - Q_M)_j^2 \quad (3.4)$$

$$F = \text{Maior}(P_S - P_M) + \text{Maior}(Q_S - Q_M) \quad (3.5)$$

Onde:

$P_S$  =   a pressão simulada no nó  $i$ ;

$P_M$  = é a pressão medida ou real no nó  $i$ ;  
 $Q_S$  = é a vazão simulada no trecho  $j$ ;  
 $Q_M$  = é a vazão medida no trecho  $j$ ;  
 $F$  = é a função objetivo a ser minimizada.

Existe a opção de penalizar a função objetivo com outra função que incrementa a diferença absoluta da pressão mínima da rede com uma pressão de referência caso a pressão mínima seja inferior a pressão de referência. A Eq. 3.6 resume essa terceira função que compõe, opcionalmente, a função objetivo.

$$\begin{aligned}
 F_R &= F + |P_{ref} - P_{min}| \quad se \quad P_{min} < P_{ref} \\
 F_R &= F \quad se \quad P_{min} \geq P_{ref}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Onde:

$F_R$  = é a função objetivo resultante;  
 $F$  = é a função objetivo calculada anteriormente com as diferenças das medidas;  
 $P_{ref}$  = é uma pressão de referencia para limitar pressões inferiores a esta;  
 $P_{min}$  = é a pressão mínima calculada verificando todos os nós da rede.

Após entrar com os dados dos parâmetros do algoritmo, escolhem-se as variáveis que se deseja calibrar e um intervalo que representa os possíveis valores máximos e mínimos para cada variável. Pode-se ainda informar valores específicos para compor a tabela que será necessária para converter a rede em um cromossomo. Após isso, escolhe-se a função objetivo de minimização das diferenças, podendo ainda incluir outra função para penalizar as redes que não atendem as restrições hidráulicas de operação tais como as de pressão mínima nos nós da rede.

Antes de iniciar o processo de calibração, os dados de pressão da rede e vazão nos trechos, medidos em campo, devem ser informados. Com apenas um único ponto de medição já é possível calibrar; entretanto quanto mais dados forem inseridos melhor o algoritmo poderá ajustar as variáveis no processo de calibração. O LenhsCalibra fornece uma interface onde é possível inserir tais dados um a um ou abrir um arquivo de dados que pode conter dados de pressão ou vazão. A Figura 3.3 mostra um exemplo da forma como o arquivo é montado. É importante seguir esse padrão, caso contrário não será possível

importar tais dados de medição para o LenhsCalibra. A princípio deve ser informado o tipo do objeto sendo “No” ou “Trecho”, em seguida a identificação do objeto na rede e a medida a ser realizada. Logo depois o tempo, em horas, para uma simulação dinâmica e o valor da medida lida no tempo indicado.

```
[DADOS]
; Arquivo de dados do LenhsCalibra
;
; Tipo          ID          Medida      Tempo      Valor
;
No             PT-01         Pressão     14         14.93
No             PT-03         Pressão     14         9.48
No             PT-04         Pressão     16         15.00
No             PT-05         Pressão     16         14.63
No             PT-21         Pressão     20         13.17
No             PT-22         Pressão     20         13.14
Trecho         FT-02         Vazão       4          0.35
Trecho         FT-07         Vazão       4          0.29
No             PT-23         Pressão     20         13.33
No             PT-01         Pressão     8          15.76
No             PT-23         Pressão     8          13.93
No             PT-01         Pressão     22         15.79
Trecho         FT-02         Vazão       8          1.19
Trecho         FT-07         Vazão       8          1.55
Trecho         FT-08         Vazão       8          1.20
No             PT-22         Pressão     22         16.33
No             PT-23         Pressão     22         17.13
No             PT-01         Pressão     4          17.03
Trecho         FT-09         Vazão       16         1.73
Trecho         FT-10         Vazão       16         1.17
Trecho         FT-11         Vazão       20         7.41
Trecho         FT-02         Vazão       20         1.48
No             PT-03         Pressão     4          16.16
No             PT-23         Pressão     2          18.52
[FIM]
```

Figura 3.3 - Exemplo de Arquivo de Dados de Medições do LenhsCalibra

Após modelagem hidráulica utilizando o Epanet, da rede que se deseja calibrar, com os dados referentes a cota dos nós, demandas, diâmetros, rugosidades, reservatórios, válvulas etc. O LenhsCalibra é executado e durante sua inicialização o algoritmo identifica quais unidades foram escolhidas na configuração da modelagem no arquivo da rede do Epanet, assim como, a fórmula de perda de carga utilizada durante o cálculo da simulação.

Iniciado o processo de calibração, com base nos parâmetros genéticos especificados e os critérios de parada escolhidos, o algoritmo cria inicialmente um conjunto de cromossomos, que é uma sequência de *bits* do tamanho necessário para codificar todas as variáveis escolhidas para o processo de calibração, de forma aleatória e que representa a primeira geração da população. Esse conjunto tem o tamanho da

população inicial informado nos parâmetros genéticos e permanece constante até o final da calibração. Uma função do LenhsCalibra decodifica cada cromossomo, atribuindo na rede os valores das variáveis consolidando toda a informação do seu respectivo cromossomo. Através do simulador hidráulico Epanet as variáveis de estado, pressão e vazão, são encontradas, respectivamente, para todos os nós e trechos da rede modelada, sendo estes dados imprescindíveis para o cálculo da função objetivo de cada cromossomo.

Diante da avaliação de cada cromossomo, os mesmos são ordenados tomando por referência o valor da função objetivo e dependendo do tipo de seleção, alguns são escolhidos para compor a população intermediária que irá passar, mediante certa probabilidade, pelo operador *crossover*. Cada par de cromossomos dá origem a dois cromossomos filhos, que irão substituí-los na próxima geração. No final, os indivíduos que reproduziram são substituídos por seus filhos e são reavaliados e organizados pela função objetivo. O melhor indivíduo da geração anterior é mantido para preservar sempre o melhor resultado, mesmo que este tenha sido selecionado para a reprodução.

O processo continua até que uma das três condições seja atendida: o número de gerações limite seja atingido, o tempo especificado de processamento seja alcançado ou um valor inferior ao informado para convergência da função objetivo do melhor indivíduo seja atingido; isto dependerá do critério de parada informado previamente ao LenhsCalibra. Um ou mais critérios podem ser estabelecidos e o primeiro que ocorrer o algoritmo finaliza mantendo o melhor resultado da última geração. Uma barra de progresso acompanha todo o processo de calibração com base no número de gerações limite definida previamente. O fluxograma ilustrado na Figura 3.4 condensa toda a metodologia do processo de calibração proposto através do Algoritmo Genético Multiobjetivo.

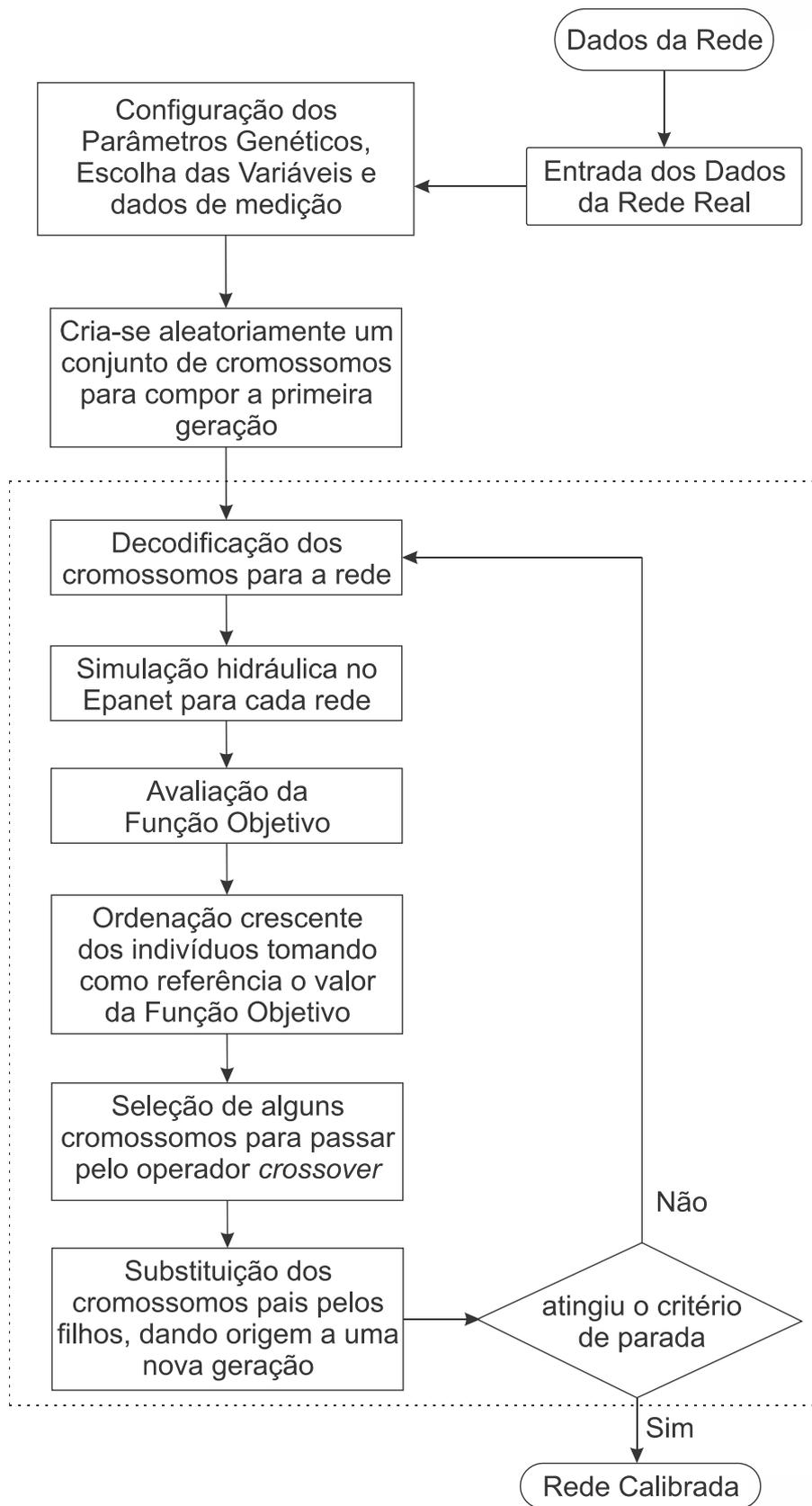


Figura 3.4 - Fluxograma do algoritmo genético multiobjetivo

### **3.3 SISTEMA PILOTO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DO LENHS**

Para a validação do modelo de calibração proposto será utilizado como estudo de caso o Sistema Piloto de Distribuição de Água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (SPDA do LENHS UFPB).

O LENHS é o resultado do desenvolvimento de ações integrantes do Programa Nacional de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental - PROCEL SANEAR - das Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - ELETROBRAS. Este laboratório foi criado para desenvolver serviços especializados, atividades de ensino, pesquisa e extensão, relacionadas ao uso eficiente de energia e da água no saneamento.

O Sistema Piloto de Distribuição de Água (SPDA) do LENHS UFPB consiste de uma rede pressurizada de distribuição, alimentada por bombeamento, totalmente instrumentalizada, e automatizada mediante um Controlador Lógico Programável (CLP), supervisionado através de um programa supervisor de aquisição e transmissão de dados (SCADA). Por ser um sistema automatizado, ele admite o desenvolvimento de rotinas de simulação e monitoração, em tempo real, produzindo uma massa de dados, em forma de relatórios, possibilitando a sua interpretação e análise. O sistema foi concebido de forma a permitir a realização de trabalhos acadêmicos (ensino, pesquisa e extensão) na área de hidráulica, elétrica e mecânica. É um sistema automatizado que admite desenvolver tarefas de controle, monitoração e simulação de forma simultânea, além de gerar relatórios das grandezas monitoradas. As pesquisas e treinamentos são direcionados, primordialmente, a trabalhos de redução de perdas de água e energia elétrica em sistemas pressurizados de abastecimento de água.

#### **3.3.1 Características do SPDA do LENHS**

A rede de abastecimento possui 155 metros de comprimento, sendo composta por tubulações de PVC (DN 50 - 140 m e DN 100 - 5 m) e ferro dúctil (DN 100 - 10 m). O sistema possui 6 (seis) saídas de água. Todas as saídas são controladas por registros (manuais) e/ou válvulas solenoides. A rede é alimentada pelo reservatório inferior existente no Laboratório (15 m<sup>3</sup>), através do sistema de bombeamento ou pelo reservatório superior (15 m<sup>3</sup>). A Figura 3.5 apresenta uma perspectiva do sistema e a Figura 3.6 uma foto panorâmica do laboratório.



Figura 3.5 - Perspectiva do SPDA modelado no blender®



Figura 3.6 - Foto panorâmica do laboratório

O SPDA está instrumentalizado em vários pontos, onde estão instalados diversos instrumentos: medidores de vazão eletromagnéticos, medidor de vazão ultrassônico, transdutores de pressão, válvulas solenóides, válvulas proporcionais, válvula multifuncional, medidores de nível ultrassônico. A Figura 3.7 mostra os diversos tipos de equipamentos existentes no SPDA.



Figura 3.7 - Equipamentos diversos existentes no SPDA

O sistema de bombeamento é composto por três conjuntos motor-bomba em paralelo, sendo um de 5 CV, com motor de alto rendimento, e dois de 15 CV, sendo um com motor de alto rendimento e outro com motor convencional (*standard*). O motor-bomba de 5 CV impulsiona a água diretamente para a rede de abastecimento, enquanto que as duas de 15 CV recalcam a água do reservatório inferior para o reservatório elevado de 15 m<sup>3</sup>. Através de manobras de registros, as três bombas podem funcionar, simultaneamente, alimentando a rede hidráulica do SPDA. As vazões e pressões nominais do motor-bomba de 5 CV são, respectivamente, de 50 m<sup>3</sup>/h e 17 mca, enquanto que os motores-bomba de 15 CV os valores nominais são de 162 m<sup>3</sup>/h e 17 mca, respectivamente (ver Figura 3.8).



Figura 3.8 - Conjuntos motor-bomba do LENHS UFPB

O CLP é do tipo “inteligente”, pois utiliza microprocessador de última geração, compatível com os instrumentos de medição e controle monitorados e/ou controlados. É composto pelos módulos de fonte de alimentação, de CPU, de entradas e saídas analógicas e digitais. Toda a fiação que chega ao CLP é ligada a conectores extraíveis, que possibilitam a troca dos módulos, sem necessidade de ferramentas e sem remoção da fiação. Os módulos de entrada e saída (E/S) analógicos são monitorados e geram alarmes para falhas (ver Figura 3.9).

O painel dispõe de disjuntores internos para alimentação, bem como uma tomada de força tripolar (fase, neutro e terra) para conexão de instrumentos e equipamentos. O painel do CLP tem uma IHM (interface homem máquina) na parte frontal, possibilitando aos usuários, o monitoramento das grandezas hidráulicas do SPDA.

O software original de programação da CPU é em português, compatível com Windows XP®, e atende plenamente o conjunto de instruções da norma IEC61131-3. O software permite que alterações do programa possam ser feitas on-line, através de um desktop ou notebook.



Figura 3.9 - Controlador Lógico Programável – CLP

O sistema supervisorio permite que sejam monitoradas e rastreadas informações do SPDA. Tais informações são coletadas através de sensores e/ou equipamentos e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Estes sistemas também são chamados de SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). O supervisorio prover ao sistema de distribuição de água experimental das informações necessárias ao gerenciamento de todo processo hidráulico e elétrico. No programa são concentradas, para efeito de monitoramento do sistema, todas as informações sobre os reservatórios e demais componentes (válvulas, conversores de frequência, transdutores etc), em tempo real, tais como: pressão, vazão, amperagem dos motores, voltagem, níveis de água nos reservatórios, etc.

A operação será simplificada de maneira a permitir controlar e manipular através de um software, um grande volume de informações de forma facilitada, utilizando-se ícones e telas gráficas para orientar o operador, passo a passo, enquanto janelas, menus e instruções, permitirão a monitoração de uma ou várias situações de operação do sistema de forma simultânea.

Os transdutores e medidores de vazão, instalados em pontos estratégicos do sistema, possibilitam a medição de grandezas à distância através de sinais analógicos de 4 a 20 mA e de uma rede RS485. O sistema de supervisão permite o acionamento tanto das bombas como das válvulas à distância através de comandos remotos.

Nas extremidades da rede, foram instalados manômetros analógicos, a montante das válvulas que foram utilizados para regular a vazão, para realizar a leitura das pressões em adição aos transdutores de pressão já instalados da rede (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Manômetro instalado e identificado em uma das saídas do SPDA

Cada manômetro foi calibrado através de um equipamento específico para calibração de pressão da Fluke® 718 100G (ver Figura 3.11), obtendo as informações organizadas na (Tabela 3.2).



Outro fator importante em um sistema desta natureza é a tele-supervisão. O monitoramento de todo o processo à distância pode ser visualizado tanto na interface homem máquina como na tela de um computador onde estará instalado o sistema supervisorio. Através da tele-supervisão é possível verificar o status de eventos e alarmes que estão ocorrendo em um ponto distante, tais como: bomba ligada e desligada, alarme de pressão baixa no recalque, válvula aberta ou fechada (desde que a mesma gere esta informação), tensão de alimentação, corrente, indicação de modo de operação local/remoto, horímetro (horas trabalhadas, disponíveis para manutenção) etc. A tela principal do sistema supervisorio é mostrado na Figura 3.13.

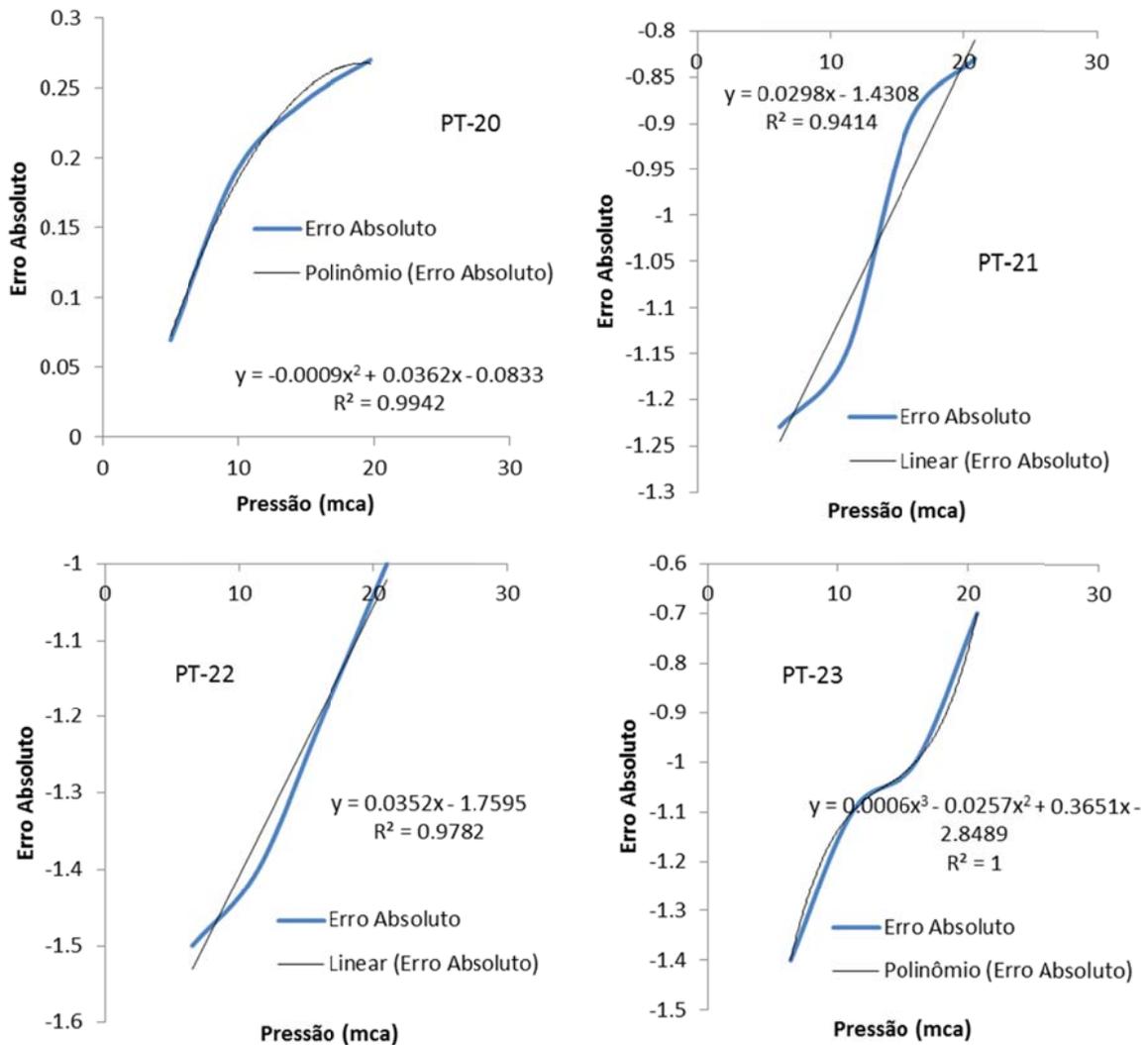


Figura 3.12 - Gráficos e equações para os manômetros instalados

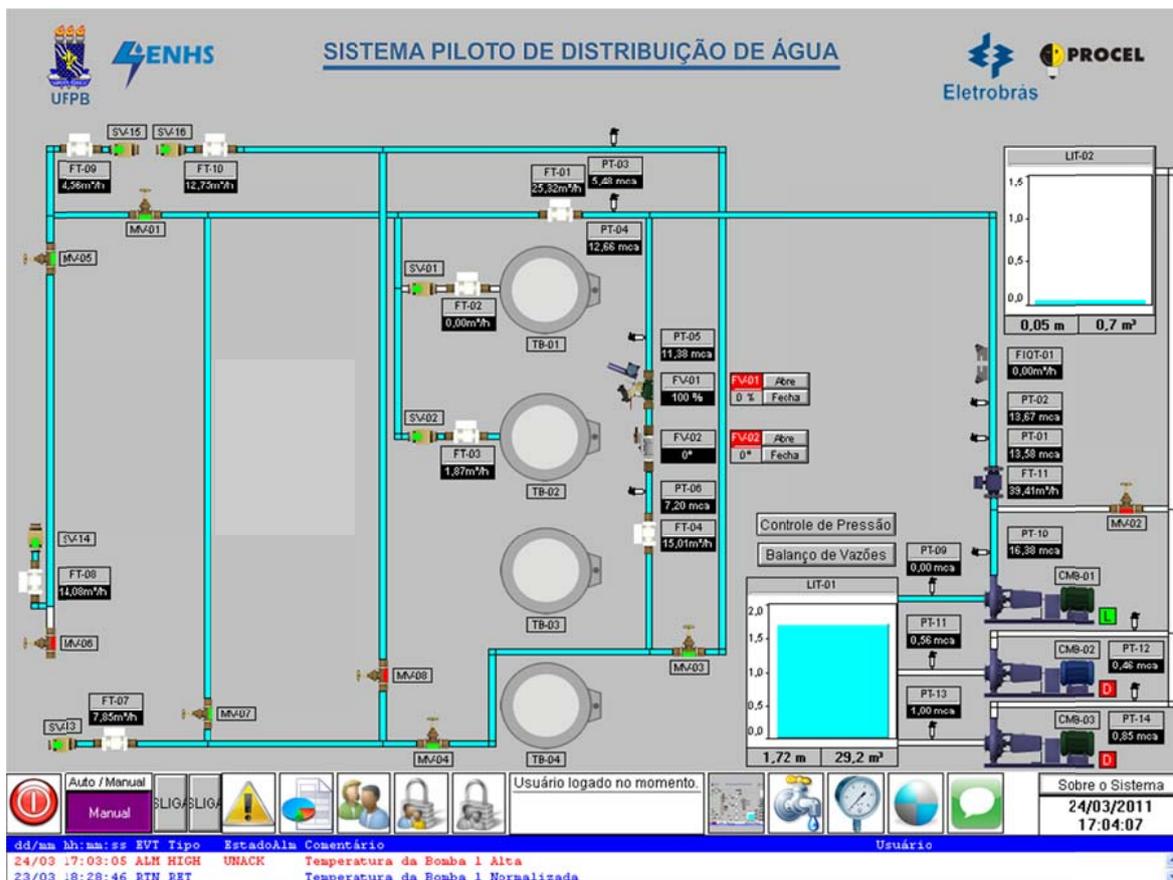


Figura 3.13 - Tela principal do sistema supervisório

### 3.4 SOFTWARE DESENVOLVIDO - LENHSCALIBRA

A utilização da linguagem Delphi/Pascal para desenvolver o software para calibração, utilizando tanto a simulação hidráulica como o algoritmo genético, foi escolhida pela facilidade de incorporação da biblioteca fornecida no site da EPA<sup>2</sup> para simulação hidráulica de redes de distribuição pressurizadas. Todas as funções referentes ao Algoritmo Genético Multiobjetivo e o Algoritmo Iterativo foram desenvolvidas nesta tese na mesma linguagem. O código fonte da programação dos algoritmos envolvidos para a composição do LenhsCalibra faz parte do APÊNDICE I.

Toda a programação aplicada no software foi desenvolvida levando-se em consideração a otimização do processamento, uma vez que o Algoritmo Genético requer um processamento de cálculo elevado, principalmente quando se utiliza 7 variáveis com

<sup>2</sup> Site oficial do epanet e do toolkit: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html>

uma precisão definida pelo usuário que pode fazer com que o cromossomo (cadeia de bits que representa o indivíduo) possua tamanhos relativamente grandes para representar a rede de estudo.

Outra preocupação foi que a interface do software fosse a mais simples e ao mesmo tempo completa para possibilitar a inserção dos dados necessários e acompanhar todo o processo de calibração a cada geração. Todos os componentes necessários para compor o software foram dispostos em uma única janela, para facilitar a visualização e a simplificação de sua digitação (ver Figura 3.14).

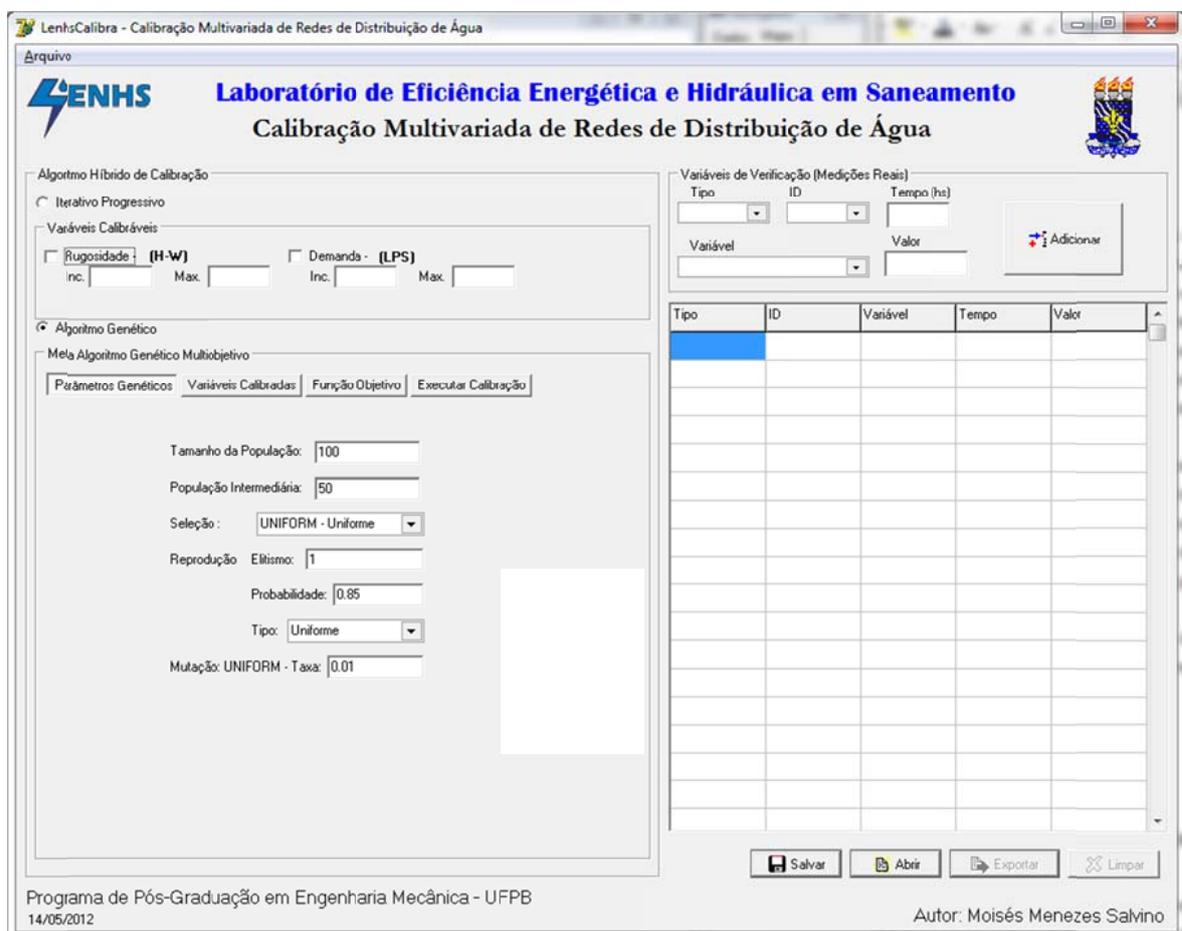


Figura 3.14 - Tela principal do programa LenhsCalibra

O software é dividido em dois setores, Algoritmo Híbrido de Calibração e Variáveis de Verificação, que correspondem às medições reais. No primeiro é possível optar por qual algoritmo deseja utilizar, sendo esta opção exclusiva. O algoritmo Iterativo só foi desenvolvido para duas variáveis, a demanda nodal e as rugosidades das tubulações; já na opção de Algoritmo Genético Multiobjetivo, existem quatro painéis que têm acesso

através dos botões que estão dentro da área do algoritmo. O primeiro sob o título de Parâmetros Genéticos serve para atribuir as configurações referentes aos parâmetros genéticos do algoritmo. Tais configurações são essenciais para uma convergência eficiente e eficaz.

Outra opção, sob o título de Variáveis Calibradas, é referente às variáveis que podem ser calibradas utilizando o modelo inverso; são sete variáveis no total e o software disponibiliza a opção de trabalhar com uma ou mais variáveis, simultaneamente, ou qualquer combinação dentre elas (ver Figura 3.15). Outra opção interessante é a de criar uma tabela automática, estimando valores máximos e mínimos para as variáveis que se deseja calibrar ou inserir os elementos da tabela um a um.

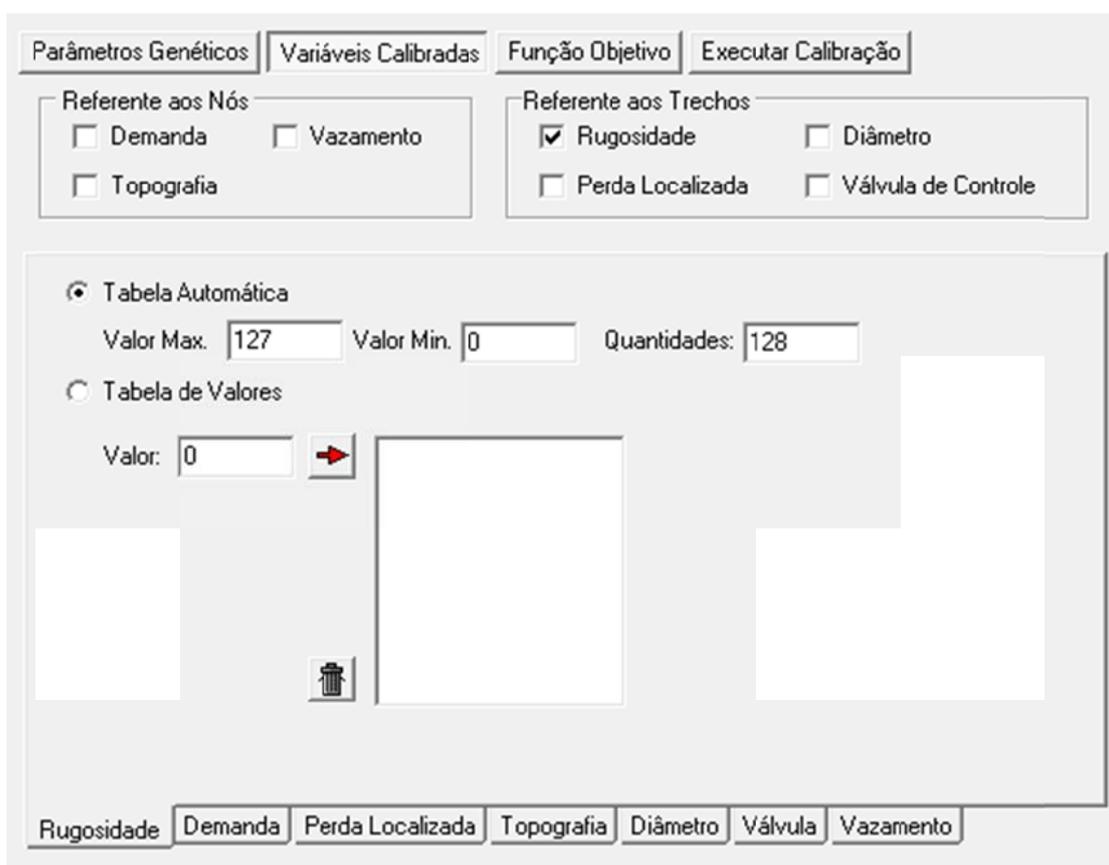


Figura 3.15 - Opções das Variáveis para o processo de calibração

Na próxima opção, com título de Função Objetivo, é possível escolher qual a função principal para avaliação dos indivíduos da população, ou seja, qual a função de minimização será utilizada entre os valores medidos e calculados. Existem três opções: O somatório das diferenças absolutas, o somatório das diferenças quadráticas e, por fim, a

maior diferença dentre os pontos de medição fornecidos. Há a opção de penalizar a função objetivo com redes que apresentarem pressão mínima inferiores a uma pressão de referência (ver Figura 3.16).

The image shows a software interface with four tabs at the top: 'Parâmetros Genéticos', 'Variáveis Calibradas', 'Função Objetivo', and 'Executar Calibração'. The 'Função Objetivo' tab is selected. Below it, there are two main sections:

- Função Objetivo:**
  - Text: 'Minimização das diferenças entre o medido e o simulado.'
  - Dropdown menu: 'Somatório  $|X_i - X_j|^2$ '
  - Checkbox: 'Pressão Mínima de serviço (mca):' with a value of '0' in the adjacent text box.
- Critério de Parada:**
  - Checked checkbox: 'Número de Gerações:' with a value of '300' in the adjacent text box.
  - Unchecked checkbox: 'Tempo (seg):' with a value of '300' in the adjacent text box.
  - Unchecked checkbox: 'Valor Min da Função Objetivo:' with a value of '10' in the adjacent text box.

Figura 3.16 - Detalhes da Função Objetivo e do Critério de Parada

A Figura 3.17 organiza a opção referente ao item “Executar Calibração” para acompanhar o processo de calibração que se inicia mostrando valores da função objetivo a cada geração através de um gráfico e uma barra de progresso para acompanhar o processamento até o seu término. Ao final, um arquivo, no formato TXT, é gerado com os melhores valores da função objetivo para cada geração, possibilitando a visualização, através de um gráfico, da sua convergência.

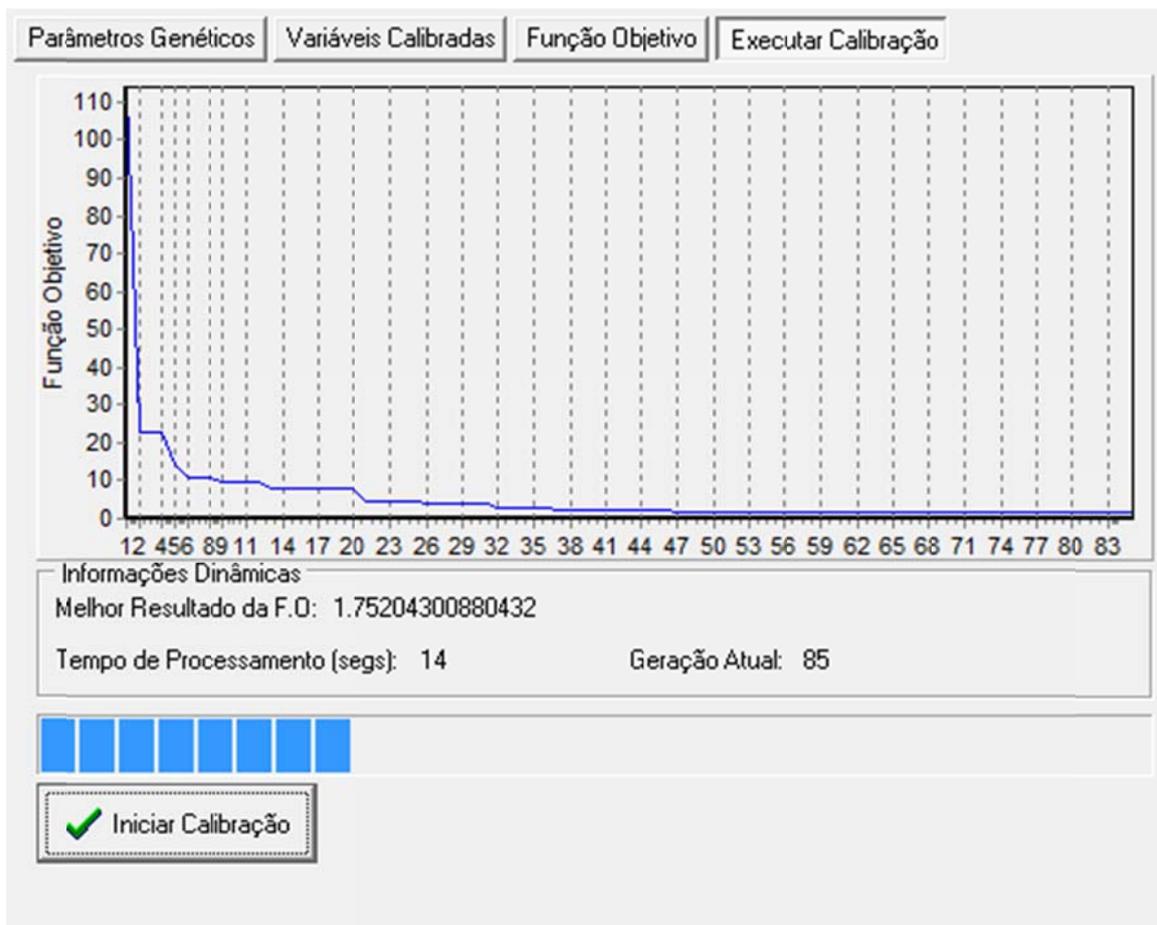


Figura 3.17 - Executando o modelo de calibração com dados atualizados da FO

### 3.5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O Sistema Piloto de Distribuição de Água foi calibrado tanto da forma estática, onde os valores de pressão e vazão medidos se referem a uma configuração da rede para um determinado tempo, como também da forma dinâmica. Neste último foi necessária a variação da demanda nos pontos de saída ao longo do tempo.

Utilizando o sistema supervisor, as demandas foram ajustadas, manualmente através de registros de gaveta instalados nas saídas da rede, admitindo uma vazão máxima de 33,53 m<sup>3</sup>/h para todo o sistema de distribuição e uma vazão mínima de 6,69 m<sup>3</sup>/h. Com base no valor médio das vazões, medidas a jusante da bomba que alimenta toda a rede, de 20,40 m<sup>3</sup>/h, foi obtida experimentalmente uma curva de demanda, utilizando o SPDA do LENHS, que resultaram nos fatores multiplicativos mostrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Coeficientes e Vazões obtidos experimentalmente do SPDA

Configuração	Vazão de Alimentação (m <sup>3</sup> /h)	Coeficiente da Curva (fatores multiplicativos)	Intervalo (horas)
1	6,69	0,33	0:00 às 3:00
2	8,74	0,43	3:00 às 6:00
3	22,38	1,10	6:00 às 9:00
4	33,53	1,64	9:00 às 12:00
5	33,53	1,64	12:00 às 15:00
6	29,25	1,43	15:00 às 18:00
7	26,66	1,30	18:00 às 21:00
8	15,52	0,76	21:00 às 0:00

O procedimento para a obtenção dos fatores multiplicativos ocorreu através dos seguintes passos:

- Encontrar a vazão máxima posicionando, inicialmente, os registros de gaveta das saídas em uma posição que proporcionaria uma pressão mínima na rede real próxima de 10 mca;
- Com base nos fatores multiplicativos utilizados por Gomes (2009), que foram: 0.3, 0.4, 1.2, 1.5, 1.5, 1.3, 1.1 e 0.7, admitindo-se a vazão máxima com fator de 1.5, Os registros foram estrangulados de tal forma que a vazão resultante a jusante do sistema de impulsão, quando comparada com a vazão máxima, obtivesse um fator multiplicativo igual a 0,3.
- Quando se encontrava um ponto próximo do valor multiplicativo que se desejava simular o sistema permanecia de 10 a 20 minutos sem perturbações, ou seja, sem nenhuma modificação do sistema de impulsão ou dos registros e válvulas do sistema. Esse procedimento foi feito para realizar as leituras em regime permanente e também era necessário para que os medidores de pressão e vazão permanecessem estáveis favorecendo melhores leituras.
- Após a aquisição de dados, tanto por parte do supervisor como lidas manualmente nos manômetros próximos as saídas, os registros eram modificados, todos eles aos poucos, para atingir outro ponto de vazão para um fator multiplicativo próximo do estimado.

- No final do experimento, uma tabela com todos os dados de pressão nos nós e vazão em trechos são registrados em uma tabela para compor a variação da demanda em função do tempo.

Para que o padrão de consumo da rede fosse o mais próximo de um sistema real, cada uma das configurações de consumo utilizadas para compor a curva de demanda foi associada a um tempo arbitrário de 3 horas. Como foram feitas 8 leituras, então a curva completaria 24 horas conforme utilizado por Gomes (2009). Os coeficientes da curva não foram os mesmos estimados inicialmente já que a média das vazões divergiu um pouco, resultando nos fatores multiplicativos, obtidos do SPDA e modelados no Epanet, ilustrado na Figura 3.18.

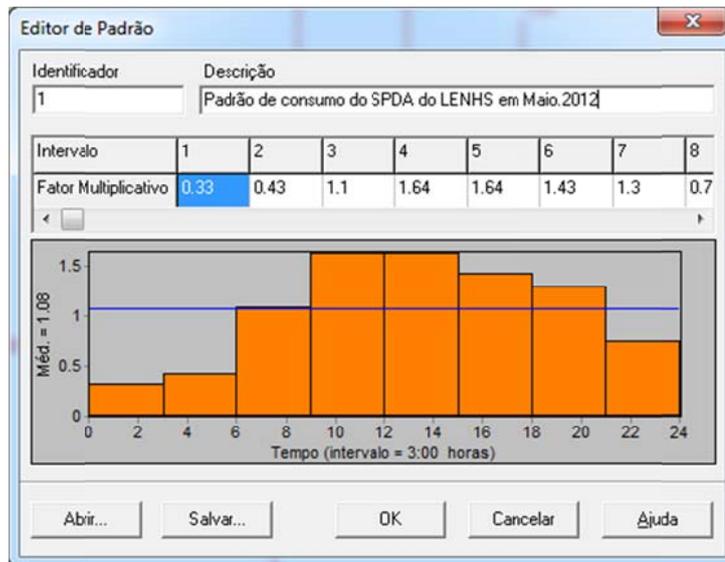


Figura 3.18 - Padrão de Consumo Experimental do SPDA LENHS

Com base nos dados obtidos, foi realizada uma análise dos parâmetros genéticos, para verificar quais melhores configurações do Algoritmo Genético Multiobjetivo quando aplicados ao Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS. Para isso foi realizada uma calibração utilizando dados para um cenário de operação estática da rede.

Posteriormente, cada uma das variáveis foi calibrada, exclusivamente, através de uma simulação estática, com exceção da variável válvula onde sua posição na rede dificulta sua análise no que se refere a sua modelagem no Epanet, uma vez que com seu fechamento parcial parte do fluxo é redirecionada para outras partes da rede além de

incorporar perdas localizadas acentuadas no local onde está instalada no SPDA. A calibração exclusiva das variáveis foi realizada com o objetivo de observar os parâmetros obtidos e os resultados com vistas à reabilitação na identificação de vazamentos ou perdas de carga acentuadas quando aplicadas a modelos reais.

O Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS foi calibrado através das variáveis: rugosidade, demanda e perda de carga localizada, de forma dinâmica, simulando uma configuração de abastecimento de 24 horas com os dados obtidos experimentalmente. As demais variáveis como topografia, vazamentos, válvulas e diâmetro são bastante confiáveis quanto a suas informações.

O Algoritmo Iterativo também foi utilizado para a calibração do modelo hidráulico do SPDA do LENHS utilizando tanto a rugosidade como a demanda como variáveis durante o processo de calibração.

A próxima etapa foi a de submeter o LenhsCalibra a complexidade da calibração de um modelo hidráulico de uma rede real com perspectivas de reabilitação utilizando ambos os Algoritmos desenvolvidos nesta tese. A área de abrangência, conhecida como Complexo Lagunar, atende a uma população aproximada de 150 mil habitantes, correspondente aos bairros Prado, Trapiche, Pontal, Vergel, Ponta Grossa e o Centro da cidade de Maceió, capital do estado de Alagoas, Brasil. A rede de abastecimento, que é operada pela Companhia de Saneamento do Estado de Alagoas (CASAL), é alimentada, por gravidade por dois reservatórios (R-2A e R-2), mais a contribuição de 7 poços profundos; é composta, na sua grande maioria, por tubos de ferro fundido e PVC, totalizando uma extensão de 158.187 metros. Pelo seu tempo de operação, a rede se encontra com sérios problemas de vazamentos e de incrustação nas tubulações, o que ocasiona um abastecimento deficitário, com pressões insuficientes na grande maioria dos pontos de consumo.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Primeiramente foi realizada uma análise nos parâmetros genéticos quanto a sua eficiência e eficácia na procura da solução na calibração de modelo hidráulico de redes de distribuição de água; em seguida, o modelo hidráulico da Rede Piloto de Distribuição de Água do LENHS será calibrado, em condições específicas para cada variável, mostrando sua importância mediante o resultado da calibração obtida.

Para comprovar a validação do modelo proposto de calibração, uma rede real com mais de 150 km de tubulação será analisada mostrando a aplicabilidade prática do estudo desenvolvido, utilizando o Algoritmo Iterativo e o Algoritmo Genético Multiobjetivo.

#### **4.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS GENÉTICOS**

Foi utilizada a modelagem hidráulica da rede do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS UFPB, na análise dos principais parâmetros genéticos utilizados. A modelagem da rede foi realizada no Epanet e posteriormente submetida ao LenhsCalibra para calibração simultânea de seis variáveis: rugosidade, demanda, perda de carga localizada, vazamentos, cotas topográficas e diâmetros. O número máximo de utilização de variáveis para o modelo da rede foi escolhida para esta análise para verificar quanto a sua convergência do valor da função objetivo. A função objetivo escolhida é a da minimização do somatório das diferenças quadráticas dos valores medidos e simulados das variáveis pressão e vazão. Foram realizadas a leitura de nove pontos de pressão e nove pontos de

vazão. Essas medidas foram realizadas em cada uma das saídas e em outros pontos da rede, tomando-se o cuidado de realizar as leituras apenas quando a rede estivesse em regime permanente. Foi utilizada uma simulação hidráulica estática durante todo o processo de calibração em cada uma das análises.

#### 4.2.1 População

A população inicial representa um dos parâmetros atribuídos inicialmente dentro dos AGs. Para que se possa verificar para quais valores deste parâmetro é melhor quanto ao tempo de convergência e valor da função objetivo, foi realizada uma calibração na modelagem hidráulica do SPDA do LENHS para um cenário estático. Foram atribuídos os parâmetros fixos para o AGM de população temporária sendo 80% da população inicial, probabilidade de reprodução de 80% e mutação de 3%.

A Figura 4.1 mostra a convergência do valor da função objetivo ao longo das gerações com a alteração do parâmetro da população inicial utilizando os valores de 50, 100, 200, 300, 400, 500 e 1000. Para uma população de 1000 o algoritmo convergiu para uma solução em que produziu um erro médio de 0,07 para a pressão e 0,013 para a vazão. O maior erro absoluto registrado foi de 0,183.

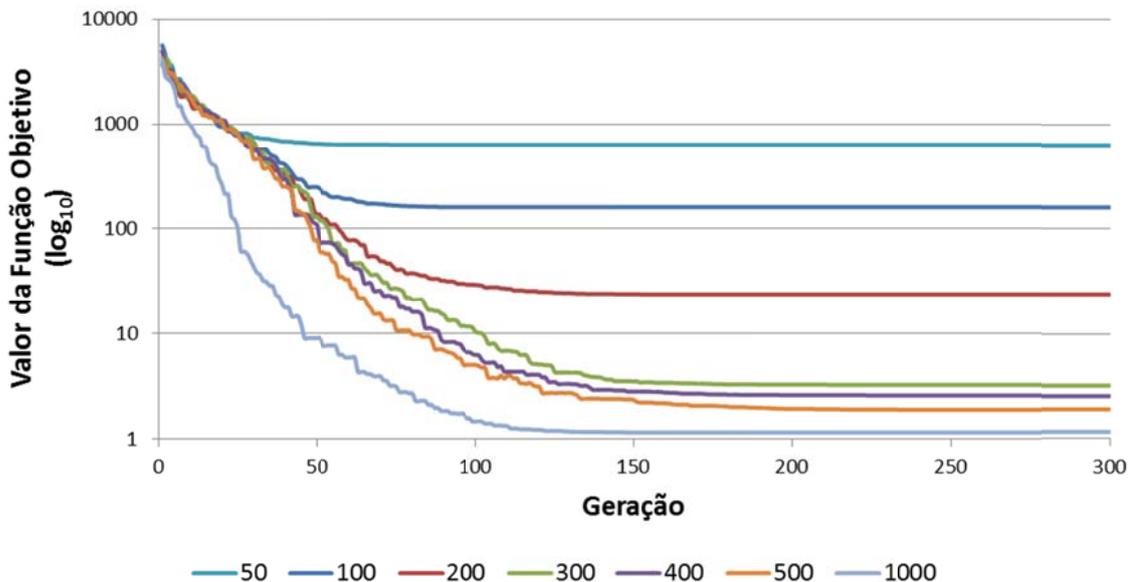


Figura 4.1 - Variação da população inicial como parâmetro do AG

Em calibrações futuras aplicadas nesta modelagem da rede, foi adotada uma população inicial de 500. Pode-se concluir também que o um número total de gerações de 300 é mais que suficiente para a convergência efetiva do AGM.

#### 4.2.2 População Intermediária

A população intermediária representa a população selecionada para reprodução, esse processo faz parte de uma das etapas do Algoritmo Genético. Para sua análise, será fixado o valor da população inicial em 500, probabilidade de reprodução de 80% e mutação de 3%. A variação do parâmetro da população intermediária iniciará com o valor de 50 e terminará com o valor de 450, que representam respectivamente 10% e 90% do valor da população inicial.

A Figura 4.2 nos mostra que em simulações com população inicial de 500, valores da população intermediária entre de 200 e 300 obtiveram uma boa convergência, correspondendo respectivamente 40% e 60% da população inicial. Para valores elevados da população intermediária a convergência ocorreu em gerações mais adiantadas. Conforme Figura 4.3 os melhores valores da função objetivo estão entre os valores da população intermediária de 150 e 350. Portanto, foi adotado o valor de 50% da população inicial nas tentativas de calibração do modelo da rede do SPDA do LENHS.

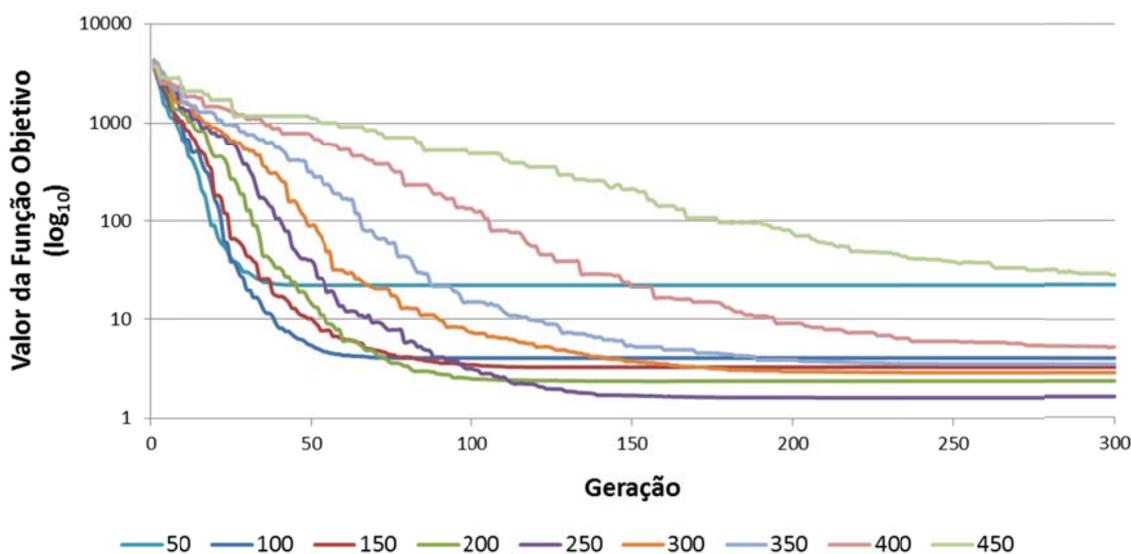


Figura 4.2 - Comparação com a variação da População Intermediária

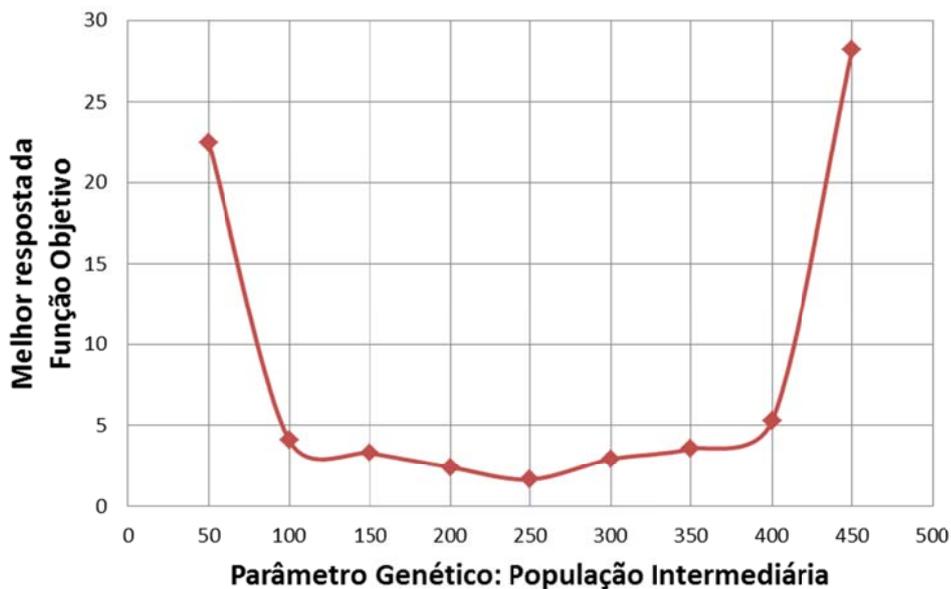


Figura 4.3 - Melhores resultados da FO alterando a população intermediária

### 4.2.3 Probabilidade de Reprodução

Após a seleção dos indivíduos aptos para reproduzir ou serem submetidos ao operador crossover, o algoritmo aplicou uma probabilidade de reprodução a cada indivíduo; não havendo a reprodução os cromossomos dos pais são repassados para a geração seguinte, conservando suas características. Em sua análise, será fixado o valor da população inicial em 500, população intermediária de 250 e mutação de 3%.

A variação da probabilidade de reprodução iniciará com a porcentagem de 20% e terminará com 100%. A Figura 4.4 representa o gráfico do melhor valor da função objetivo em cada uma das gerações. Pode-se concluir que pequenas probabilidades faz com que o algoritmo tenha sua convergência prematura, comprometendo o resultado final, e grandes probabilidades faz com que bons cromossomos se percam ao gerar seus filhos. Então, diante dos resultados, conclui-se que valores próximos de 80% produzem os melhores resultados.

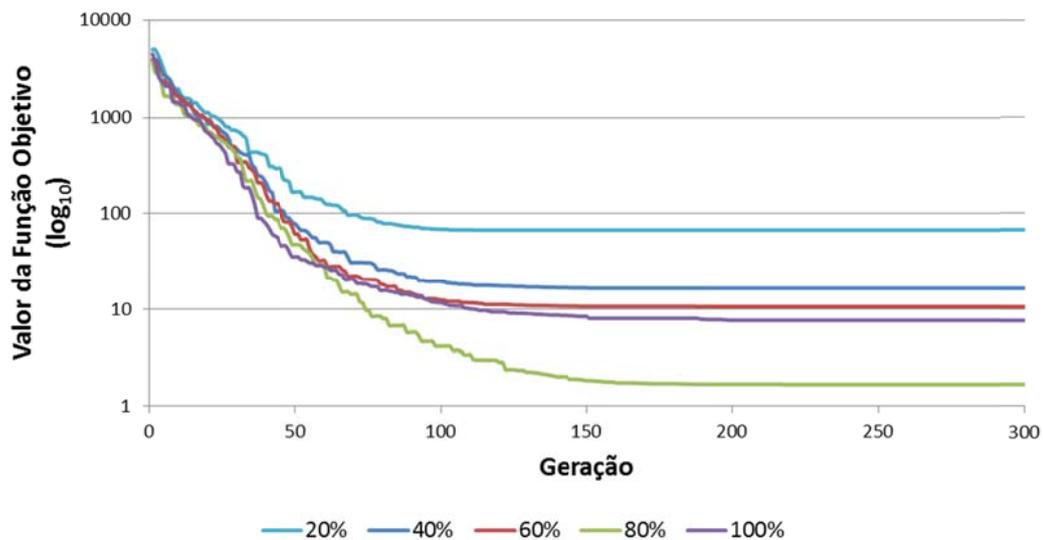


Figura 4.4 - Comparação com a variação da Probabilidade de Reprodução

#### 4.2.4 Mutação

A mutação modifica o cromossomo após a etapa da reprodução, em pequenas proporções, mas que pode gerar filhos mais aptos e com características diferentes dos pais. Para analisar este parâmetro, será fixado o valor da população inicial em 500, população intermediária de 250 e probabilidade de reprodução de 80%. A variação da mutação iniciará com a porcentagem de 0,1% e terminará com 4%. A Figura 4.5 mostra os melhores resultados da função objetivo para cada uma das gerações para diversos valores da mutação. Observa-se que valores próximos a 3% produzem os melhores resultados de convergência no valor final da função objetivo. A mutação melhora a diversidade, mas quando tem grande probabilidade acaba destruindo informações do cromossomo.

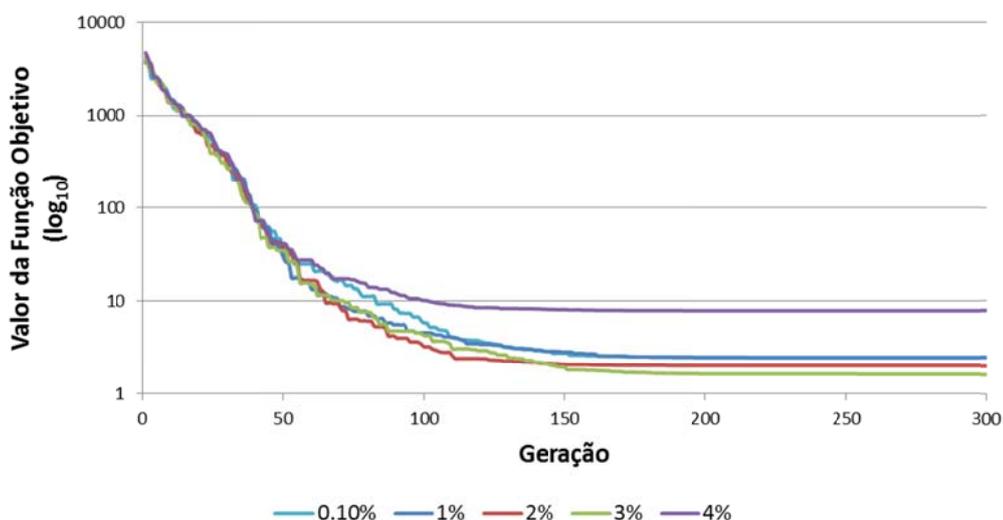


Figura 4.5 - Comparação com a variação da Mutação

#### 4.2.5 Tipo de Seleção

O tipo de seleção se refere à forma como os cromossomos da população são escolhidos para compor a população intermediária apta à reprodução. Nessa análise foram atribuídos aos parâmetros fixos os seguintes valores: população inicial de 500, população intermediária de 250, probabilidade de reprodução de 80% e uma mutação de 3%. A Figura 4.6 representa o gráfico de convergência utilizando os três tipos de seleção: uniforme, roda da roleta e torneio. Observa-se que a opção uniforme, que é a seleção dos melhores indivíduos, tanto convergiu em uma geração inferior aos outros tipos como obteve o menor valor da função objetivo.

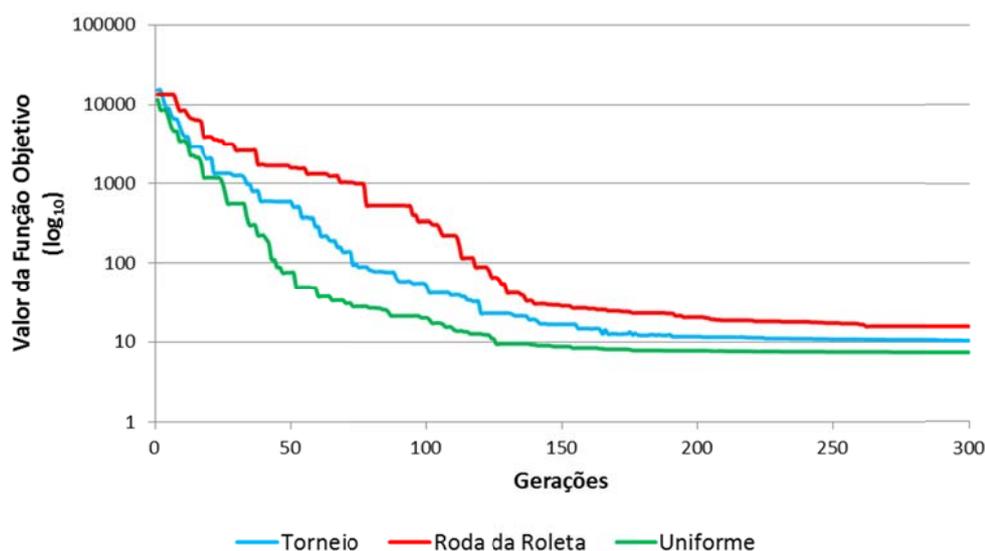


Figura 4.6 - Comparação com a variação do tipo de seleção

### 4.3 CALIBRAÇÃO DO SPDA DO LENHS UFPB

Como primeira experiência e tentativa de aplicação da metodologia proposta, foi calibrada a rede piloto de distribuição de água do LENHS-UFPB.

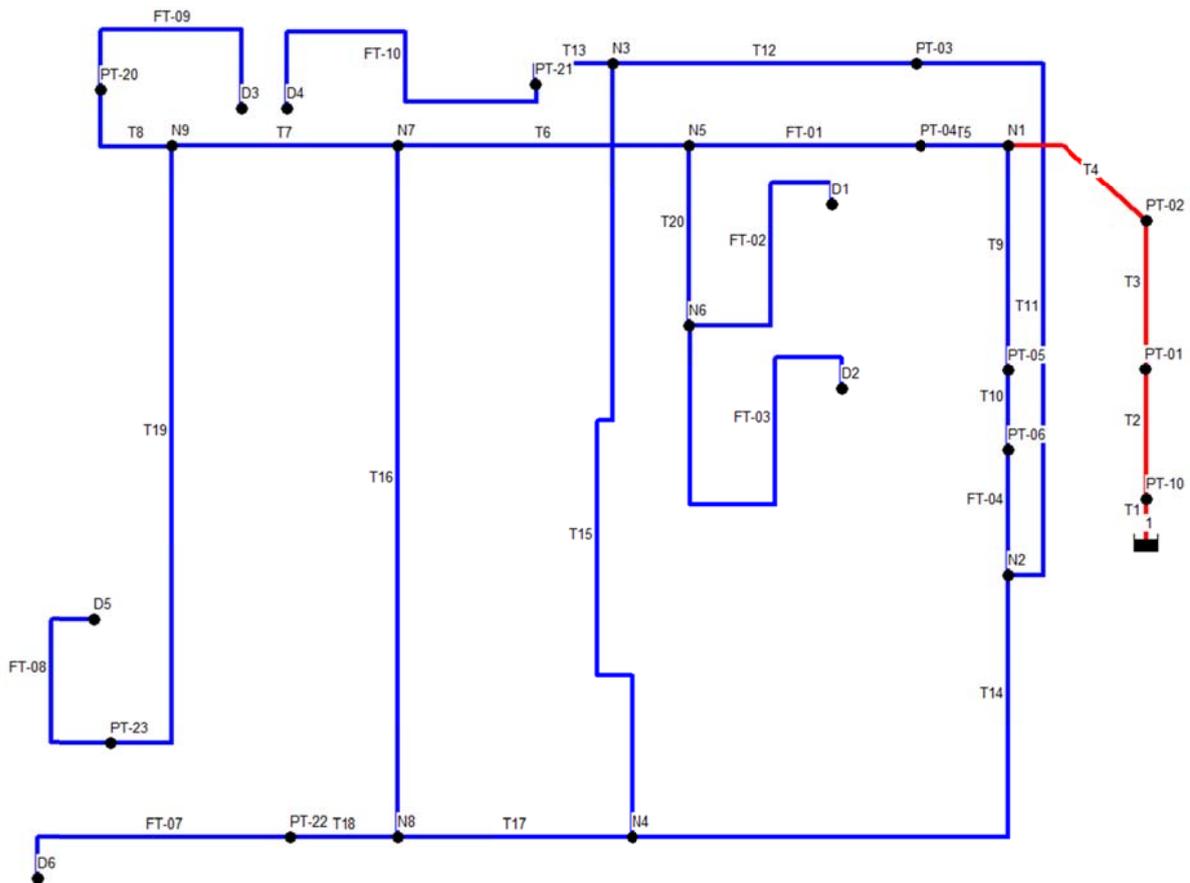


Figura 4.7 - Modelagem do SPDA do LENHS no Epanet

Utilizando o Epanet, o SPDA do LENHS foi modelado com a topologia da Figura 4.7, onde as tubulações foram configuradas com os dados da Tabela 4.1. Todos os nós da rede estão na mesma cota topográfica com exceção da alimentação, referente à descarga nos tubulões, representada pelos nós D1 e D2, que possuem, respectivamente, as cotas 4,93 m e 4,26 m, e ainda os nós PT-10, PT-01 e PT-02. O Apêndice II organiza no formato de leitura do Epanet, do tipo INP, os dados do modelo hidráulico desenvolvido. O Nó 1, que é representado por um reservatório de nível fixo, modela a carga hidráulica de 18,28 m que é fornecida através de bombeamento com rotação máxima e constante.

Tabela 4.1 - Dados das Tubulações da Rede do LENHS - SPDA

Trecho	Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	Diâmetro Interno (mm)	Coef. Perda de Carga Singular
T5	N1	PT-04	1.34	50	0.6
FT-01	PT-04	N5	4.10	50	3.6
T6	N5	N7	4.68	50	0.0
T7	N7	N9	3.21	50	0.2
FT-09	PT-20	D3	3.80	50	17.35
T9	N1	PT-05	5.09	50	4.0
T10	PT-05	PT-06	0.56	50	0
FT-04	PT-06	N2	2.41	50	2.7
T14	N2	N4	9.12	50	3.9
T11	N2	PT-03	12.58	50	4.0
T12	PT-03	N3	4.20	50	0.0
T15	N4	N3	11.52	50	7.5
T17	N4	N8	4.43	50	1.3
T16	N8	N7	10.01	50	0.4
FT-07	PT-22	D6	4.13	50	14.35
T19	N9	PT-23	8.90	50	3.10
FT-10	PT-21	D4	3.72	50	17.35
T20	N5	N6	2.31	50	1.3
FT-02	N6	D1	8.00	50	11.3
T1	1	PT-10	0.10	100	0.0
T2	PT-10	PT-01	4.25	100	4.25
T3	PT-01	PT-02	2.40	100	0.0
T4	PT-02	N1	4.80	100	2.35
FT-03	N6	D2	9.80	50	20.65
T18	N8	PT-22	0.15	50	1.3
FT-08	PT-23	D5	3.00	50	17.35
T8	N9	PT-20	0.60	50	3.0
T13	N3	PT-21	0.35	50	1.5

Para obter uma comparação entre os valores medidos e simulados, antes de utilizar o processo de calibração, os parâmetros do modelo hidráulico da rede foram atribuídos segundo dados tabelados da literatura e as demandas nodais referentes aos nós D1, D2, D3, D4, D5 e D6 foram obtidas experimentalmente através dos medidores de vazão instalados nos trechos que alimentam cada um dos nós de descarga e que correspondem, respectivamente, aos trechos FT-02, FT-03, FT-09, FT-10, FT-08 e FT-07 conforme indicado na Figura 4.7.

Utilizando o Epanet, o modelo da rede do SPDA do LENHS foi simulado obtendo como resposta as vazões nos trechos e pressões nos nós para que se possa comparar com as medições realizadas na rede real. A Figura 4.8 mostra a comparação entre as medidas de pressão calculadas do modelo e medidas da rede real. Observa-se que as diferenças foram significativas e essas divergências podem ter várias causas, principalmente, na atribuição do coeficiente estimado das perdas de carga singular por se tratar de uma rede pequena onde as perdas contínuas não são tão significativas quando comparadas com as perdas localizadas.

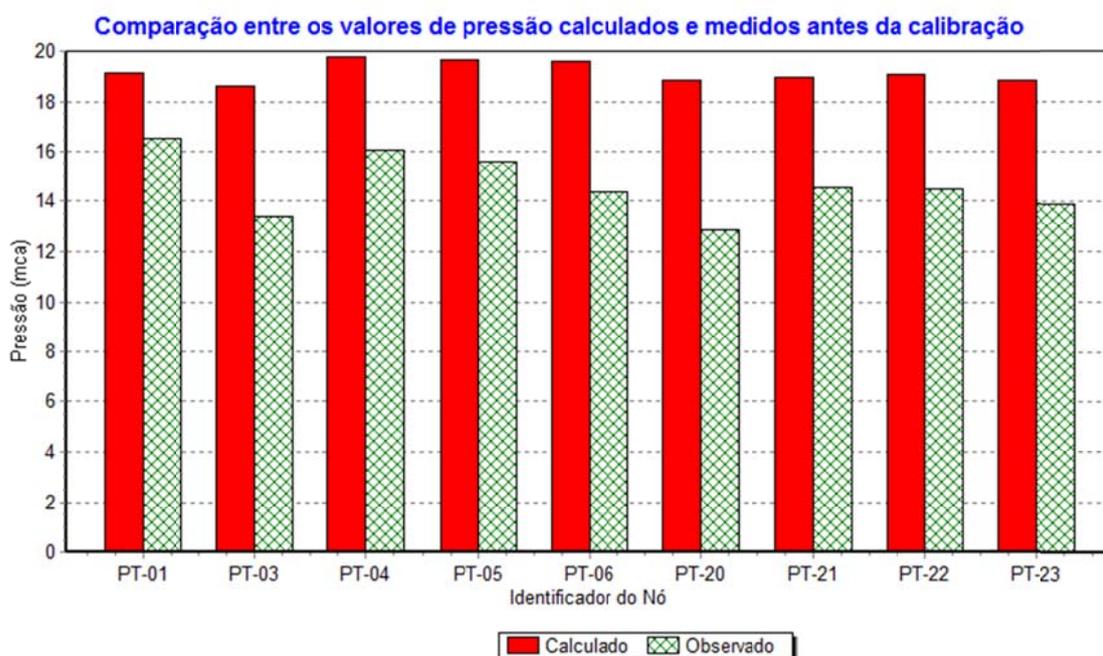


Figura 4.8 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA antes da calibração

A Figura 4.9 mostra a diferença dos valores de vazão em alguns trechos do SPDA do LENHS. As diferenças, entre o simulado e o medido, foram realizadas para o modelo da rede antes da calibração. A vazão medida das saídas, através dos transdutores de vazão, foi atribuída aos seus nós de jusante como demandas dentro do modelo hidráulico; por isso, observa-se que nesses pontos a vazão coincidiu com o simulado pelo Epanet. Percebe-se que o tubo, representado pelo nó D2 através do trecho FT-03, não foi utilizado como um ponto de consumo do modelo, por estar sendo utilizado em uma bancada experimental referente a outra tese de doutorado. Ainda assim, o fechamento do registro, ou seja, a não utilização deste ponto de consumo, também entrará como informação no processo de

calibração proposto. As outras diferenças quanto às vazões nos trechos FT-01 e FT-04, por se tratar de uma resultante de uma divisão do fluxo partindo do nó N1, significam que o modelo hidráulico estimado pelo Epanet, não fez uma boa estimativa quanto a essa divisão da vazão, sendo este um dos motivos para a aplicação de modelos de calibração em sistemas de distribuição modelados em simuladores hidráulicos.

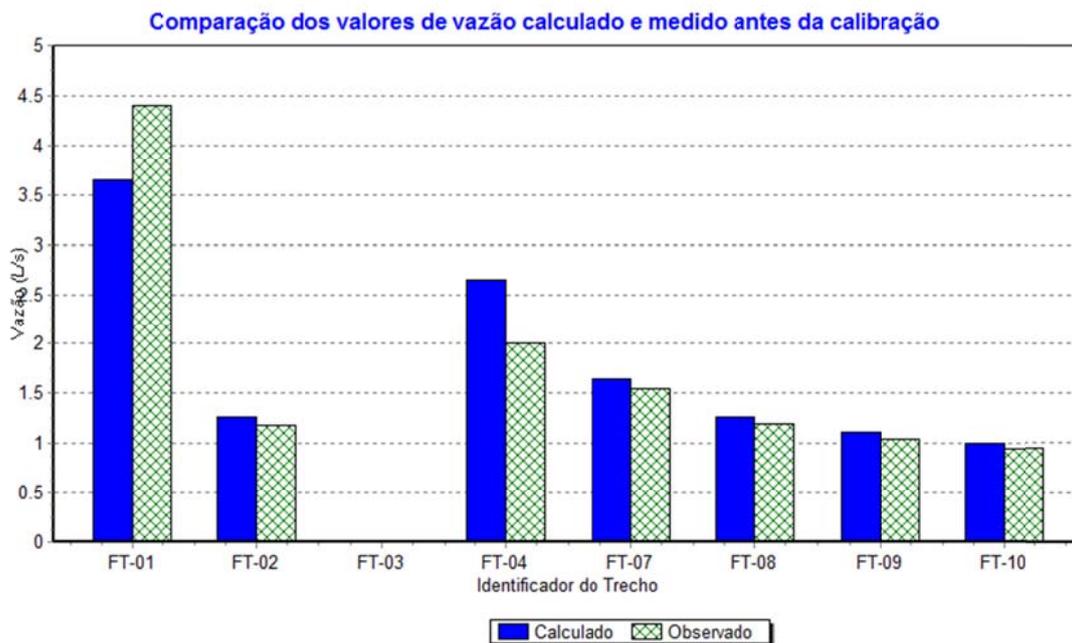


Figura 4.9 - Comparação dos valores de vazão do SPDA antes da calibração

A análise do desempenho da calibração foi feita sob os critérios estabelecidos pelo WATER RESEARCH CENTRE (1989) – WRC, para comparação entre os valores reais (medidos) e aqueles obtidos via simulação. Para os valores de vazão, o erro relativo, deve estar dentro da seguinte faixa:

- $\pm 5\%$  para as medidas de vazão quando as vazões medidas excedem 10% da vazão abastecida total;
- $\pm 10\%$  para as medidas de vazão quando as vazões medidas não excedem 10% da vazão abastecida total.

Para os valores de pressão, deve se basear no erro absoluto, dado pela diferença entre o valor simulado e o observado, e não deve exceder uma das seguintes faixas:

- $\pm 0,5$  m para 85% das medidas de pressão;
- $\pm 0,75$  m para 95% das medidas de pressão;

- $\pm 2$  m para 100% das medidas de pressão.

Diante dos resultados obtidos para o modelo da rede sem a calibração, em análise das diferenças de pressão, todas ficaram acima de 2 m. Portanto, não está em conformidade com os critérios de desempenho adotado para este trabalho. Para a variável vazão, suas medições excedem 10% da vazão total abastecida e o erro relativo da maior diferença foi de 21,81% e portanto fora dos critérios estabelecidos.

#### **4.3.1 Calibração Utilizando Variáveis Isoladamente**

Os parâmetros hidráulicos de uma rede de abastecimento representados pela rugosidade, perda de carga singular, topografia e diâmetro interno, para uma simulação estática, tem seus valores fixos. Entretanto, durante o processo de calibração, esses valores são modificados com o intuito de diminuir as diferenças entre os valores medidos e simulados das variáveis de estado: pressão e vazão. Portanto, para a aplicação do Algoritmo Genético Multiobjetivo, estes parâmetros são variáveis dentro do modelo.

As variáveis atribuídas para calibração terão seu valor encontrado através do método inverso utilizando o algoritmo genético multiobjetivo. Às demais variáveis foram atribuídos valores obtidos da literatura e manuais dos fabricantes, levando-se em consideração a experiência durante a utilização da rede do SPDA do LENHS desde sua concepção e dados coletados experimentalmente. O Algoritmo Genético Multiobjetivo, tomando por referencia os resultados obtidos da análise dos parâmetros genéticos, teve seus parâmetros definidos como sendo a população inicial de 500, a população intermediária de 250, a seleção do tipo uniforme, a probabilidade de reprodução de 80% e a mutação de 3%.

##### **4.3.1.1 Rugosidade**

Com o passar do tempo o interior das tubulações, são submetidas a reações químicas e variações de pressão, comprometendo a rugosidade da superfície interna. Dependendo da qualidade da água e da vazão, pode ocorrer acúmulo de sedimentos que acabam obstruindo e comprometendo parte da seção do tubo.

A variável rugosidade, através do coeficiente C de Hazen-Williams, foi selecionada para ser modificada durante o processo de calibração do modelo hidráulico sob os

parâmetros genéticos escolhidos mediante análise prévia. O modelo hidráulico em conjunto com os dados de medição dos pontos de pressão foram processados pelo LenhsCalibra com o AGM obtendo como resposta a calibração do SPDA com os valores dos coeficientes C indicados na Figura 4.10 e organizados na Tabela 4.2. A diferença entre os valores de pressão calculados e medidos estão dispostos na Figura 4.11.

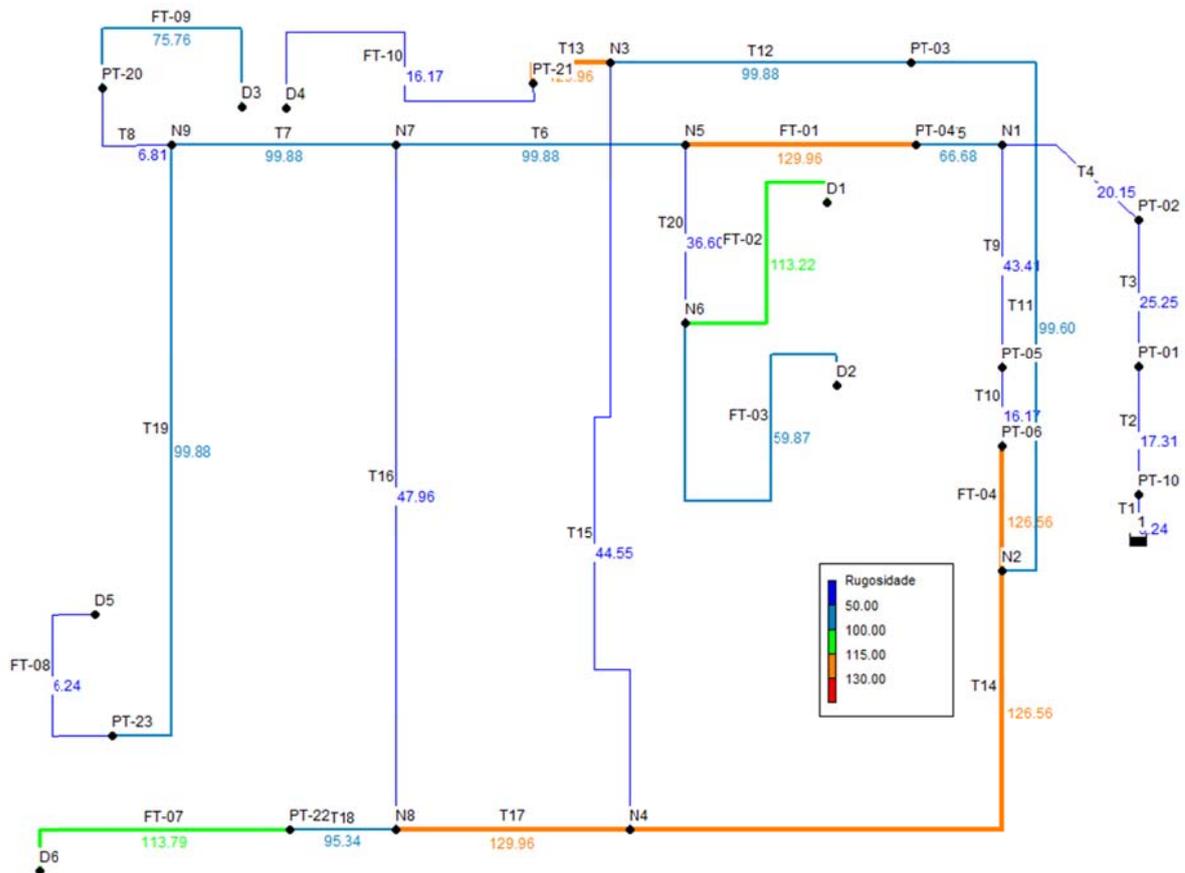


Figura 4.10 – Modelo da Rede SPDA do LENHS calibrado pela rugosidade

Por ser uma rede pequena, mas com muitos acessórios, a maioria das perdas é localizada, mas ao tentar calibrar utilizando apenas a rugosidade (representado pelo coeficiente C), o algoritmo altera o coeficiente para um valor que compense a perda de carga localizada no trecho. A Figura 4.12 mostra o modelo hidráulico da rede com os parâmetros encontrados pelo processo de calibração. Os trechos T9 e T10 apresentaram valores do coeficiente de rugosidade C bem inferiores, pois nesses trechos existem duas válvulas, uma multifuncional e outra proporcional, e suas perdas não foram incluídas como perda de carga singular na tabela de trechos e no arquivo do Epanet. Os trechos próximos às saídas da rede tiveram suas perdas de carga singulares subestimadas, pois os seus

respectivos trechos também apresentaram valores bem abaixo do esperado (valor de C próximos de 130).

A aproximação dos valores de pressão, entre os dados medidos e simulados ficaram dentro dos limites estabelecidos pela WRC, já que para 100% das medidas a maior diferença absoluta foi de 0,987 m e para 75% das medidas a maior diferença absoluta foi de 0,475 m. O valor resultante da função objetivo, que consistia da minimização do somatório das diferenças quadráticas dos valores medidos e simulados, para o processo de calibração através da alteração do parâmetro rugosidade foi de 0,9320 m

Tabela 4.2 - Resultado após calibração utilizando a Rugosidade como variável

Trecho	Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Coefficiente C (H-W)
T5	N1	PT-04	1.34	50	66.68
FT-01	PT-04	N5	4.10	50	129.96
T6	N5	N7	4.68	50	99.88
T7	N7	N9	3.21	50	99.88
FT-09	PT-20	D3	3.80	50	75.76
T9	N1	PT-05	5.09	50	43.41
T10	PT-05	PT-06	0.56	50	16.17
FT-04	PT-06	N2	2.41	50	126.56
T14	N2	N4	9.12	50	126.56
T11	N2	PT-03	12.58	50	99.60
T12	PT-03	N3	4.20	50	99.88
T15	N4	N3	11.52	50	44.55
T17	N4	N8	4.43	50	129.96
T16	N8	N7	10.01	50	47.96
FT-07	PT-22	D6	4.13	50	113.79
T19	N9	PT-23	8.90	50	99.88
FT-10	PT-21	D4	3.72	50	16.17
T20	N5	N6	2.31	50	36.60
FT-02	N6	D1	8.00	50	113.22
T1	1	PT-10	0.10	100	6.24
T2	PT-10	PT-01	4.25	100	17.31
T3	PT-01	PT-02	2.40	100	25.25
T4	PT-02	N1	4.80	100	20.15
FT-03	N6	D2	9.80	50	59.87
T18	N8	PT-22	0.15	50	95.34
FT-08	PT-23	D5	3.00	50	6.24
T8	N9	PT-20	0.60	50	6.81
T13	N3	PT-21	0.35	50	129.96

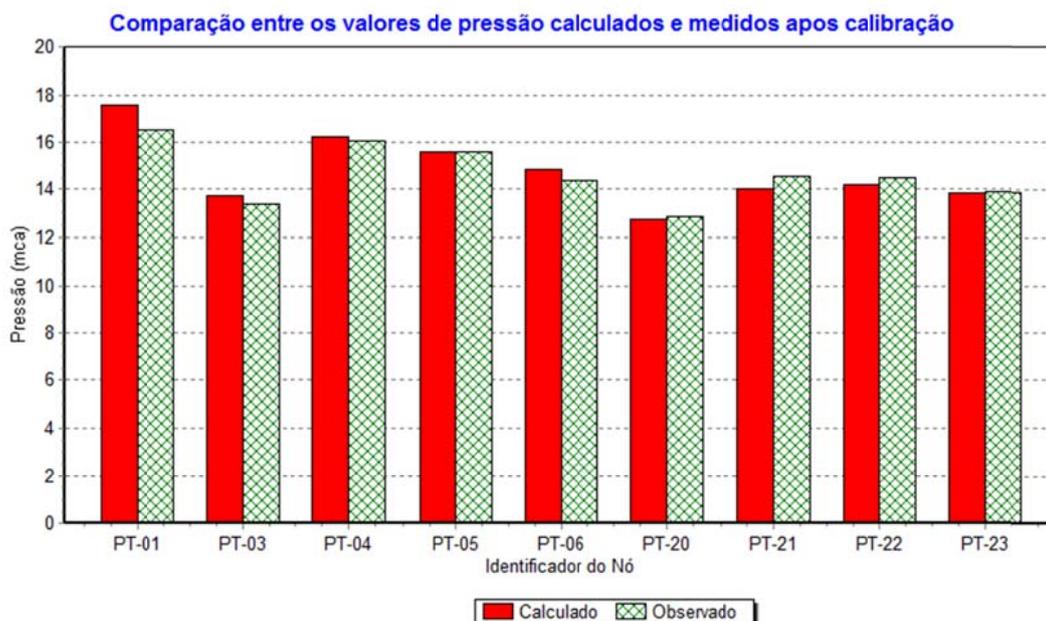


Figura 4.11 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA após calibração



Figura 4.12 - Válvulas Instaladas do SPDA do LENHS

#### 4.3.1.2 Perda de Carga Localizada ou Singular

O coeficiente da perda de carga localizada ou singular é um dos parâmetros aplicável aos trechos do modelo da rede. Cada trecho agrupa um somatório dos coeficientes resultantes dos acessórios instalados ao longo do trecho. As informações dos acessórios e seus respectivos coeficientes de perda de carga estão organizados na Tabela 4.3 e na Tabela 4.4 para cada um dos trechos do SPDA do LENHS. As perdas de carga

localizada são um dos parâmetros mais significativos em redes pequenas, como é o caso da rede em estudo.

Tabela 4.3 - Coeficientes das perdas de carga nos trechos do SPDA

Trecho	Quant.	Peças	Coeficiente de Perda de Carga Localizada (K)	$\Sigma K$
T1	-	-	0	0
T2	1	Válvula retenção	2,75	5,85
	2	Joelho de 90° raio curto	0,90	
	1	Tê, saída lateral	1,30	
T3	-	-	0	0
T4	2	Joelho de 90° raio curto	0,90	2,35
	1	Redução	0,15	
	1	Joelho de 45°	0,40	
T5	1	Tê, passagem direta	0,60	0,60
FT-01	4	Joelho de 90° raio curto	0,90	3,60
T20	1	Tê, saída lateral	1,30	1,30
FT-02	2	Joelho de 90° raio curto	0,90	3,90
	1	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Tê, saída lateral	1,30	
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
FT-03	7	Joelho de 90° raio curto	0,90	10,65
	3	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Tê, passagem direta	0,60	
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
	1	Válvula Solenoide	1,75	
T9	1	Joelho de 90° raio curto	0,90	4,00
	3	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Tê, saída lateral	1,30	
T10	1	Válvula Proporcional	Não estimada	0
	1	Válvula Israelense		
FT-04	1	Joelho de 90° raio curto	0,90	2,70
	3	Joelho de 90° raio longo	0,60	
T11	3	Joelho de 90° raio longo	0,90	4,00
	1	Tê, saída lateral	1,30	
T12	-	-	0	0

Devido ao tempo de uso das tubulações, as rugosidades dos tubos de PVC (representados pelo coeficiente C) foram fixas e estimadas em 130 para todos os trechos. Os parâmetros genéticos atribuídos foram os selecionados mediante os resultados da análise de sensibilidade no início desse capítulo.

Tabela 4.4 - Coeficientes das perdas de carga nos trechos do SPDA (continuação)

Trecho	Quant.	Peças	Coeficiente de Perda de Carga Localizada (K)	$\Sigma K$
T13	1	Joelho de 90° raio curto	0,90	1,50
	1	Tê, passagem direta	0,60	
FT-10	6	Joelho de 90° raio curto	0,90	7,35
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
	1	Válvula Solenoide	1,75	
T14	4	Joelho de 90° raio longo	0,60	3,90
	1	Tê, saída lateral	1,30	
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
T15	4	Joelho de 90° raio curto	0,90	7,50
	4	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Tê, saída lateral	1,30	
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
T6	-	-	0	0
T7	1	Tê, passagem direta	0,60	0,80
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
T16	1	Joelho 45°	0,40	0,40
T17	1	Tê, saída lateral	1,30	1,30
T18	1	Tê, saída lateral	1,30	1,30
FT-07	2	Joelho de 90° raio curto	0,90	4,35
	1	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
	1	Válvula Solenoide	1,75	
T19	2	Joelho de 90° raio curto	0,90	3,10
	1	Tê, saída lateral	1,30	
FT-08	5	Joelho de 90° raio curto	0,90	7,05
	1	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
	1	Válvula Solenoide	1,75	
T8	2	Joelho de 90° raio curto	0,90	3,00
	1	Joelho de 90° raio longo	0,60	
	1	Tê, passagem direta	0,60	
FT-09	6	Joelho de 90° raio curto	0,90	7,35
	1	Registro de gaveta (aberto)	0,20	
	1	Válvula Solenoide	1,75	

A calibração do modelo hidráulico da rede do SPDA através da variação do coeficiente da perda de carga singular obteve como resposta os coeficientes dispostos na Tabela 4.5. O coeficiente da perda de carga singular é aquela que possui mais incertezas em pequenas redes por possuir uma grande densidade de conexões, registros e acessórios por metro de tubulação. A Tabela 4.5 mostra uma comparação do resultado com valores estimados da literatura oriundo das conexões e acessórios existentes em cada um deles.

O resultado encontrado mediante a atribuição do algoritmo genético no coeficiente “C” em cada um dos trechos acentuou as perdas de carga em diversos tubos. As perdas, na unidade de m/km, são mostradas na Figura 4.13. As diferenças entre os valores de pressão calculados e medidos são mostrados na Figura 4.14. Observa-se que esses valores estão dentro dos critérios da WRC, já que em 100% das medidas a maior diferença absoluta de pressão foi de 0,403 m.

Tabela 4.5 - Resultados dos coeficientes da perda de carga singular

Trecho	Nó inicial	Nó final	Coef. Perda de Carga Singular (calibrada)	Coef. Perda de Carga Singular (estimada)
T5	N1	PT-04	14.66	0.6
FT-01	PT-04	N5	2.48	3.6
T6	N5	N7	16.40	0.0
T7	N7	N9	16.15	0.2
FT-09	PT-20	D3	90.22	17.35
T9	N1	PT-05	87.24	4.0
T10	PT-05	PT-06	41.27	0
FT-04	PT-06	N2	2.24	2.7
T14	N2	N4	2.24	3.9
T11	N2	PT-03	3.73	4.0
T12	PT-03	N3	2.24	0.0
T15	N4	N3	126.25	7.5
T17	N4	N8	2.74	1.3
T16	N8	N7	85	0.4
FT-07	PT-22	D6	76.55	14.35
T19	N9	PT-23	2.73	3.10
FT-10	PT-21	D4	18.89	17.35
T20	N5	N6	49.70	1.3
FT-02	N6	D1	7.21	11.3
T1	1	PT-10	85.00	0.0
T2	PT-10	PT-01	99.91	4.25
T3	PT-01	PT-02	13.17	0.0
T4	PT-02	N1	13.17	2.35
FT-03	N6	D2	44.49	20.65
T18	N8	PT-22	2.24	1.3
FT-08	PT-23	D5	89.97	17.35
T8	N9	PT-20	126.50	3.0
T13	N3	PT-21	2.23	1.5

Os trechos T9 e T10, já comentado anteriormente com respeito à calibração do parâmetro da rugosidade, possuem duas válvulas, uma multifuncional e outra proporcional, resultando em perdas de carga elevadas. Percebe-se, também, que as saídas da rede, ainda, apresentaram coeficientes elevados; isto porque existe em cada saída uma válvula de registro de gaveta parcialmente fechada com a função de pressurizar a rede e diminuir o consumo em cada saída, juntamente com uma válvula solenoide que pertence ao sistema supervisorio para fechamento à distância através do CLP. Alguns outros trechos, como é o caso dos trechos T15 e T16, que tiveram seus coeficientes “K” elevados, mas não apresentaram grandes perdas de carga como mostra a Figura 4.13. Isso porque os valores de vazão para os trechos T15 e T16 foram, respectivamente, 0,08 e 0,38 L/s dentro da resposta das variáveis do modelo da rede obtida através da simulação hidráulica.

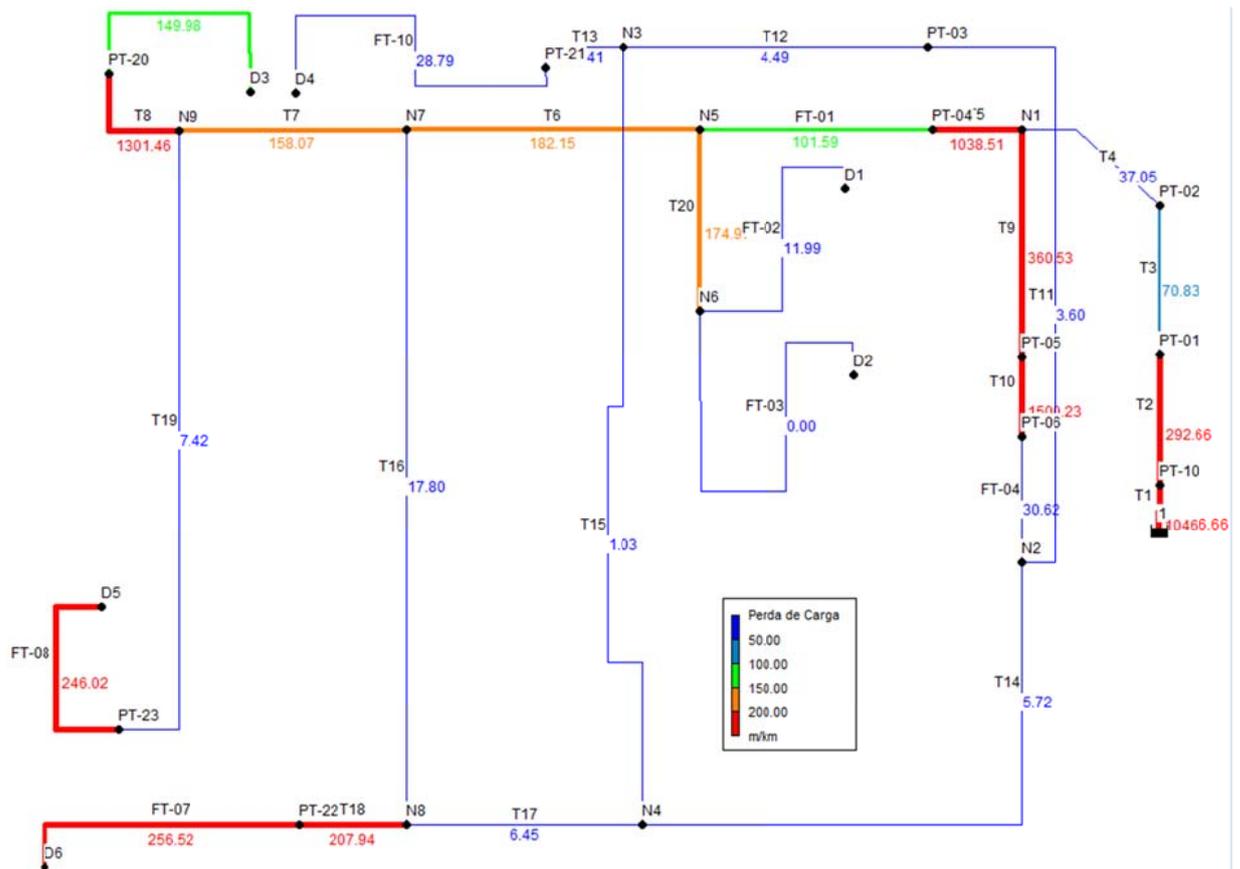


Figura 4.13 - Resultado da calibração das perdas de carga singular

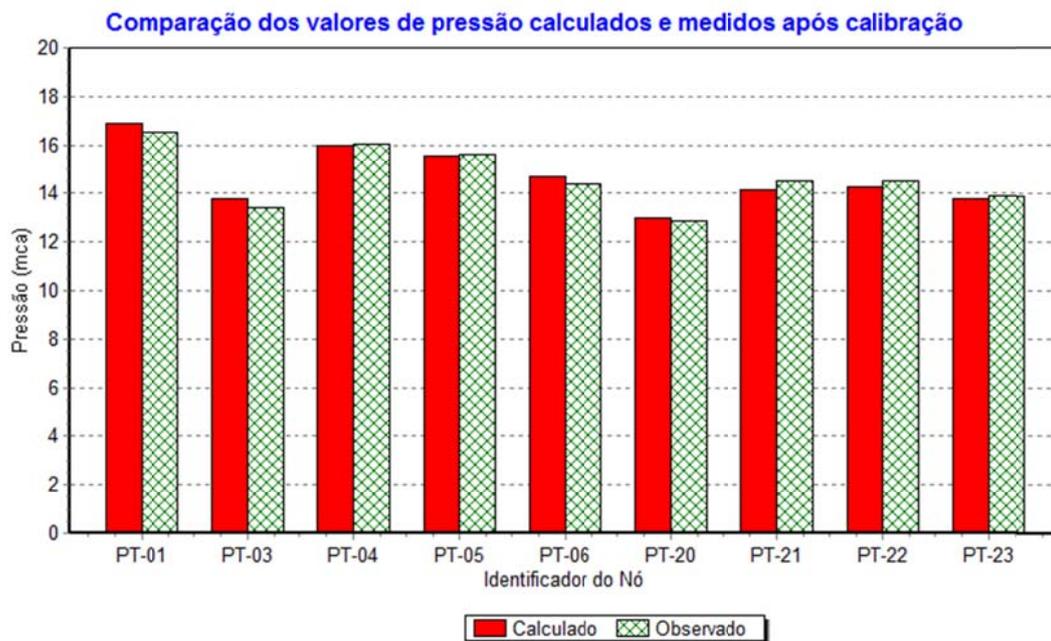


Figura 4.14 - Comparação entre os valores de pressão do SPDA após calibração

#### 4.3.1.3 Demanda

A demanda dentro do modelo da rede representa a vazão que sai em algum nó da rede modelada representando o consumo naquele ponto. Para validar o modelo de calibração proposto, o consumo referente ao nó D2 que alimenta o tubulão com a vazão do trecho FT-02 de 1,19 L/s não será informada através das medidas da rede real ao LenhsCalibra para calibração do modelo. Vale ressaltar que todas as demandas nodais foram desconhecidas e o modelo de calibração aplicado a rede modelada encontrou uma solução para estas demandas. A Figura 4.15 consiste na solução obtida da calibração mediante os mesmos parâmetros genéticos utilizados para as outras variáveis em análise, sendo a minimização das diferenças quadráticas a função objetivo utilizada. Os valores das demandas obtidas através do processo de calibração estão apresentados na Tabela 4.6. Observa-se que o modelo de calibração proposto identificou os nós de saída da rede atribuindo a estes uma demanda diferente de zero. Alguns outros valores de demanda foram atribuídos aos nós N5, N6 e D1 que fazem parte da alimentação do tubulão. Esses resultados comprovam que mesmo sem os dados de medição referente àquele local, o algoritmo identificou uma demanda nos nós próximos a região com a demanda real. As diferenças entre os valores das vazões nos trechos simulados e os medidos são mostradas

na Figura 4.16. Os valores obtidos das vazões no modelo não ficaram dentro dos critérios da WRC em duas das quatro saídas da rede. Os erros relativos das medidas ficaram acima do valor de 5% e foram respectivamente 21% e 6,7%.

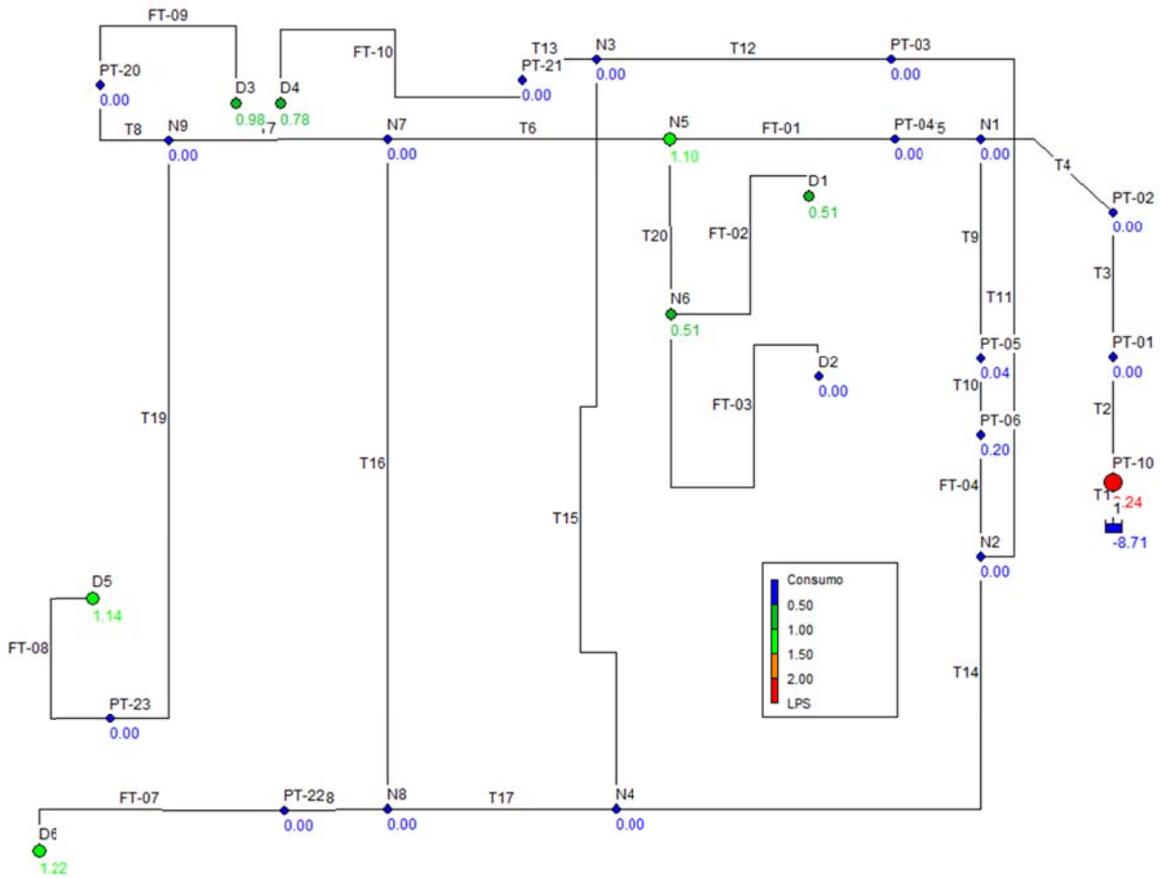


Figura 4.15 - Rede SPDA calibrada através da demanda

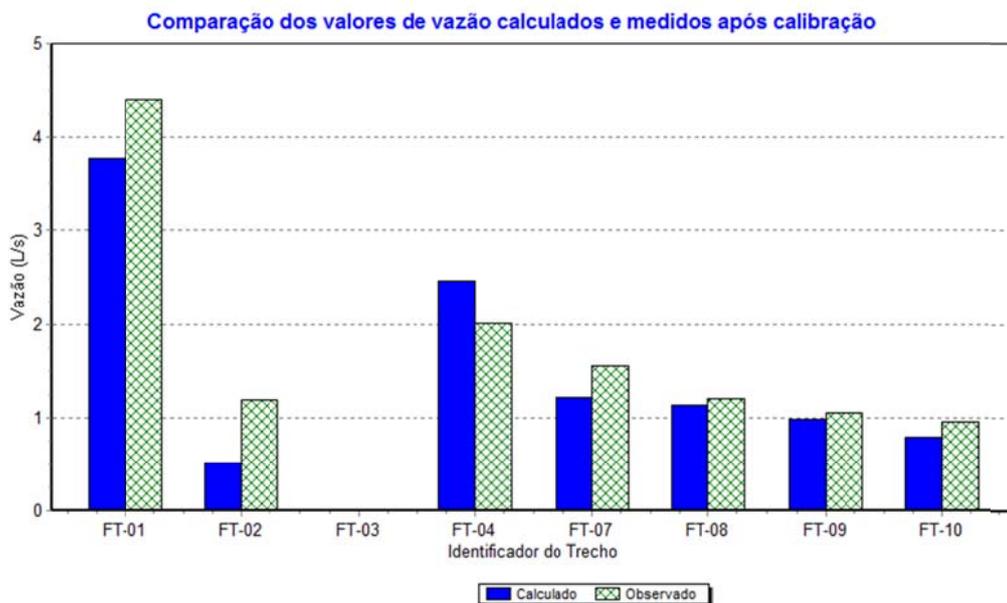


Figura 4.16 - Comparação dos valores de vazão nos trechos após calibração

Tabela 4.6 - Resultado da calibração utilizando a variável demanda

Identificador do Nó	Demanda (L/s)	Identificador do Nó	Demanda (L/s)
PT-02	0.00	N8	0.00
N1	0.00	D6	1.22
PT-04	0.00	D5	1.14
N5	1.10	D4	0.78
N7	0.00	N6	0.51
N9	0.00	D1	0.51
D3	0.98	D2	0.00
PT-05	0.04	PT-10	2.24
PT-06	0.20	PT-01	0.00
N2	0.00	PT-22	0.00
N4	0.00	PT-23	0.00
PT-03	0.00	PT-21	0.00
N3	0.00	PT-20	0.00

#### 4.3.1.4 Vazamentos

Os vazamentos são caracterizados como perdas reais em sistemas de abastecimento de água e representam a saída da água através de juntas ou fissuras nas paredes da tubulação. O Sistema Piloto de Distribuição de Água não possui vazamentos significativos, uma vez que todas as suas tubulações são aparentes e qualquer irregularidade quanto a algum vazamento é reparada de imediato. Para realizar a calibração através do parâmetro de vazamentos a vazão no trecho FT-02 não foi informada, considerando a saída d'água um possível vazamento, para verificar sua repercussão quando o modelo da rede fosse calibrado, procedimento este idêntico ao atribuído à demanda.

Após o processamento do calibrador, aplicando os parâmetros genéticos já escolhidos através da análise dos seus parâmetros genéticos, os resultados da rede calibrada, representados com os consumos nodais, podem ser visualizados na Figura 4.17. A Tabela 4.7 apresenta os consumos nodais do SPDA após a calibração do parâmetro de

vazamentos representado pelo coeficiente de vazão do emissor aplicado aos nós. Os consumos referentes aos nós de saída informados (D3, D4, D5 e D6) representam a demanda informada e não uma contribuição advinda de um vazamento. Os nós N5, N6, D1 e D2 obtiveram como resposta valores para o coeficiente de vazão do emissor que resultou no consumo da Tabela 4.7. Portanto, utilizando o parâmetro de vazamentos como variável, o algoritmo localizou a região onde existia uma contribuição não informada, o que poderia ser interpretado como uma perda real de água ou vazamento.

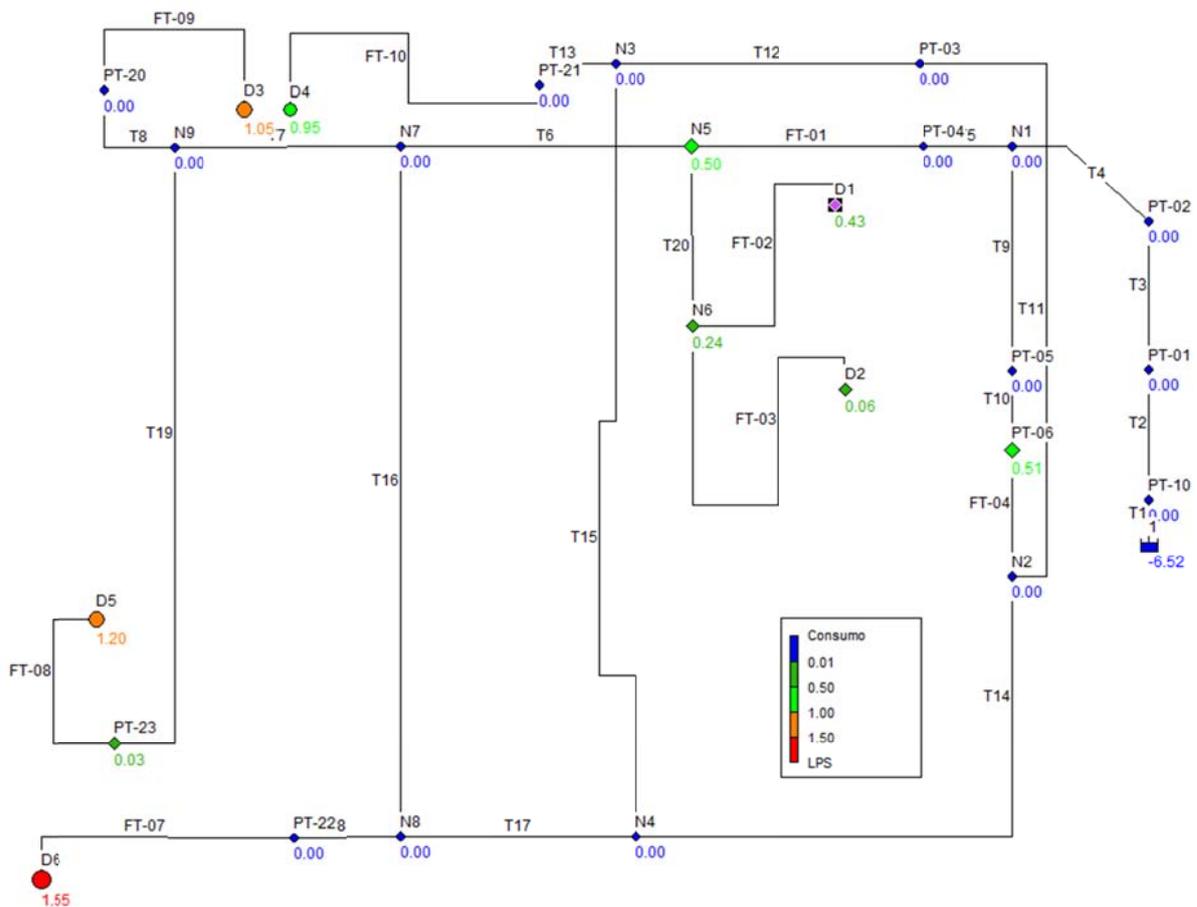


Figura 4.17 - Rede do SPDA calibrada – Vazamentos

A comparação entre as vazões calculadas e medidas estão dispostas na Figura 4.18. Em análise sob os critérios da WRC, apenas o trecho FT-04 ficou com o erro relativo acima dos 5% permitidos, com o valor de 15,9%. Os demais trechos ficaram dentro dos critérios.

Tabela 4.7 - Resultado da calibração através da variável vazamento

Identificador do Nó	Consumo (L/s)	Identificador do Nó	Consumo (L/s)
PT-02	0	N8	0
N1	0	D6	1.55
PT-04	0	D5	1.2
N5	0.5	D4	0.95
N7	0	N6	0.24
N9	0	D1	0.43
D3	1.05	D2	0.06
PT-05	0	PT-10	0
PT-06	0.51	PT-01	0
N2	0	PT-22	0
N4	0	PT-23	0.03
PT-03	0	PT-21	0
N3	0	PT-20	0

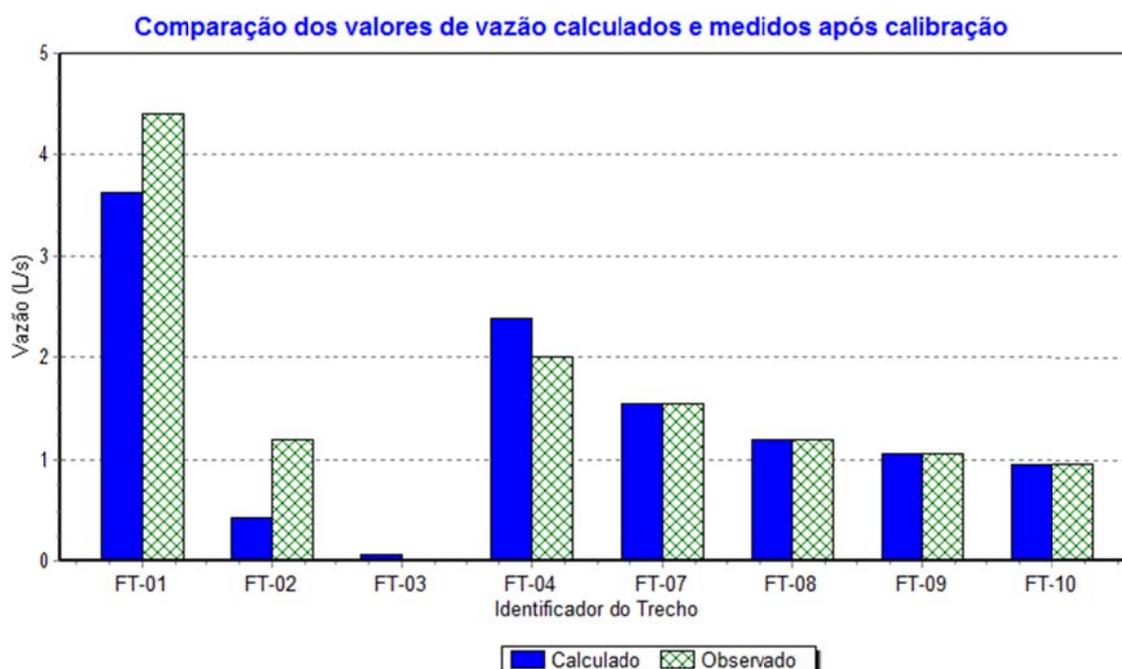


Figura 4.18 - Comparação dos valores de vazão dos trechos após calibração

### 4.3.1.5 Topografia

Os dados referentes às cotas dos nós foram devidamente medidos sob a referência das saídas, estando estas na mesma cota 0. Admitiu-se a cota “0” como sendo a cota do nível horizontal da rede que está assentada no Laboratório de Hidráulica. A rede do SPDA, previamente modelada, foi utilizada para calibração admitindo-se o desconhecimento topográfico. Utilizando os mesmos parâmetros genéticos escolhidos na análise inicial, o modelo hidráulico da rede foi calibrado. O modelo da rede resultante da calibração é ilustrado na Figura 4.19. Nos pontos onde existiam medições de pressão, as cotas ficaram bem próximas da cota de referência. Neste caso, os demais pontos onde não existiam dados medidos de pressão, o algoritmo encontrou valores aleatórios, uma vez que por não existir dados de medição, estes não influenciam no cálculo da diferença de pressão para esses pontos e assim estes não interferem na resposta da função objetivo.

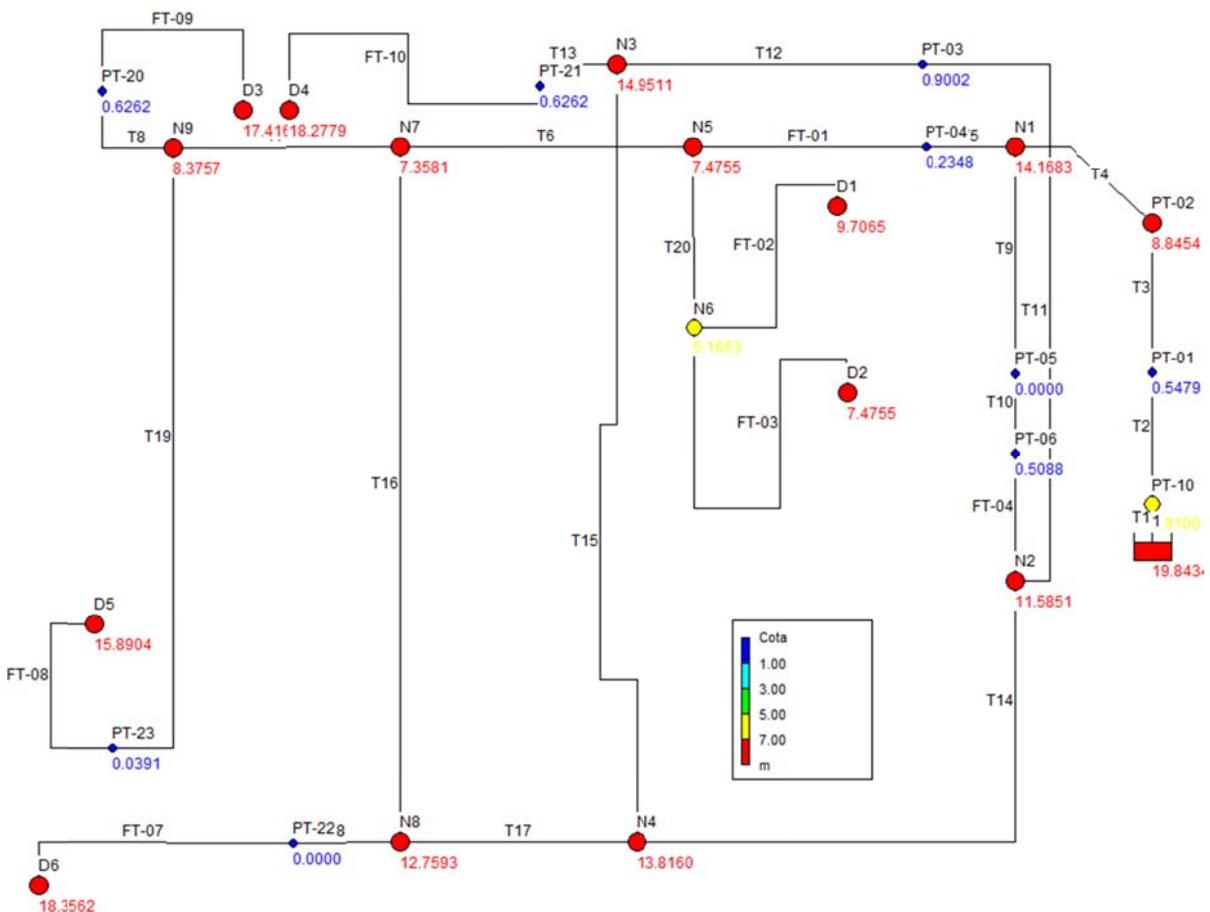


Figura 4.19 - Rede SPDA calibrada através da Topografia

As aproximações dos dados medidos e calculados para a variável pressão estão dispostas na Figura 4.20 e organizados na Tabela 4.8. Sua referencia tomou por base a cota das saídas D3, D4, D5 e D6. Comparando os valores de pressão obtidos com os medidos, observa-se que o critério da WRC foi atendido uma vez que a maior diferença absoluta da pressão foi de 0,789 m para 100% das medidas e 0,461 m para 75% das medidas.

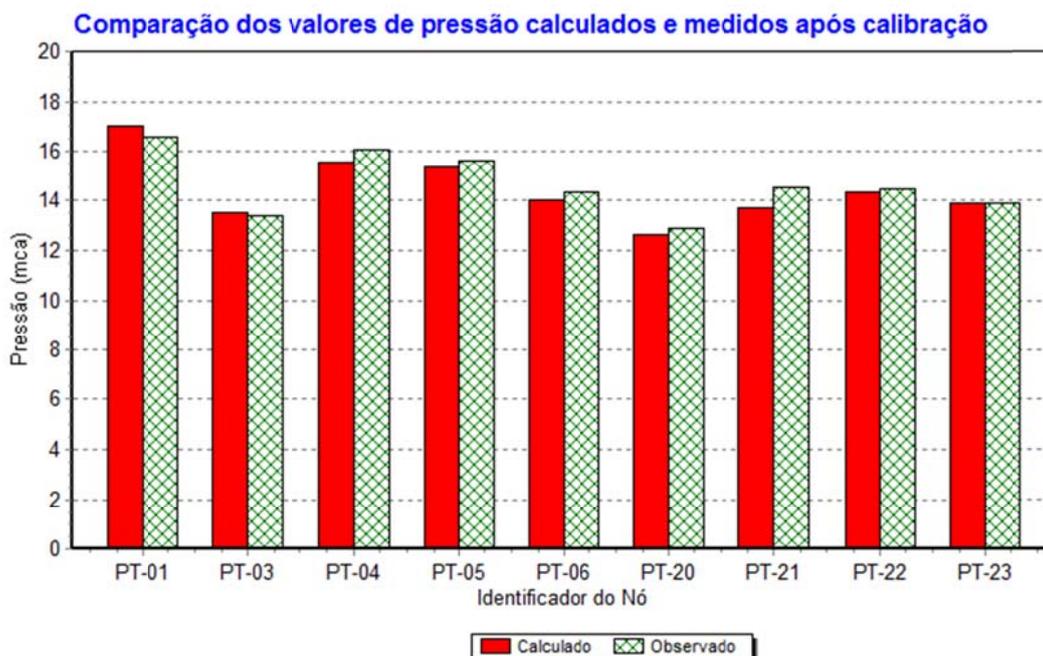


Figura 4.20 - Comparação entre os valores de pressão após calibração

Tabela 4.8 - Resultado da calibração referente a variável Topografia

Identificador do Nó	Cota do terreno (m)	Identificador do Nó	Cota do terreno (m)
PT-04	0.23	PT-01	0.54
PT-05	0.00	PT-22	0.00
PT-06	0.51	PT-23	0.04
PT-03	0.90	PT-21	0.63
		PT-20	0.63

#### 4.3.1.6 Diâmetro

O diâmetro interno da tubulação representa a seção por onde a água será transportada. Toda a rede do SPDA é exposta (rede não enterrada) e seus diâmetros conhecidos. Portanto, para realizar a calibração deste parâmetro da rede como variável, os

diâmetros serão estimados numa gama de valores entre 1 mm a 100 mm (diâmetro máximo da rede), para que o algoritmo genético escolha, nesse intervalo, os diâmetros que irão compor cada um dos trechos da rede. Após a execução do processo de calibração utilizando os parâmetros genéticos escolhidos em análise inicial com a função objetivo de minimização das diferenças quadráticas, o modelo encontrou os resultados dos diâmetros conforme mostrado na Figura 4.21. Observa-se que as válvulas previamente identificadas através de outras variáveis já discutidas da calibração do modelo hidráulico, também foram identificadas com a variação do diâmetro. A Tabela 4.9 mostra os diâmetros encontrados após a calibração do modelo da rede. O trecho T10 onde ficam as válvulas obteve um valor para o seu diâmetro interno de 15.81, isso mostra que a utilização do parâmetro diâmetro como variável no processo de calibração pode identificar perdas de carga acentuadas em pontos específicos da rede quando estes apresentarem diâmetros pequenos.

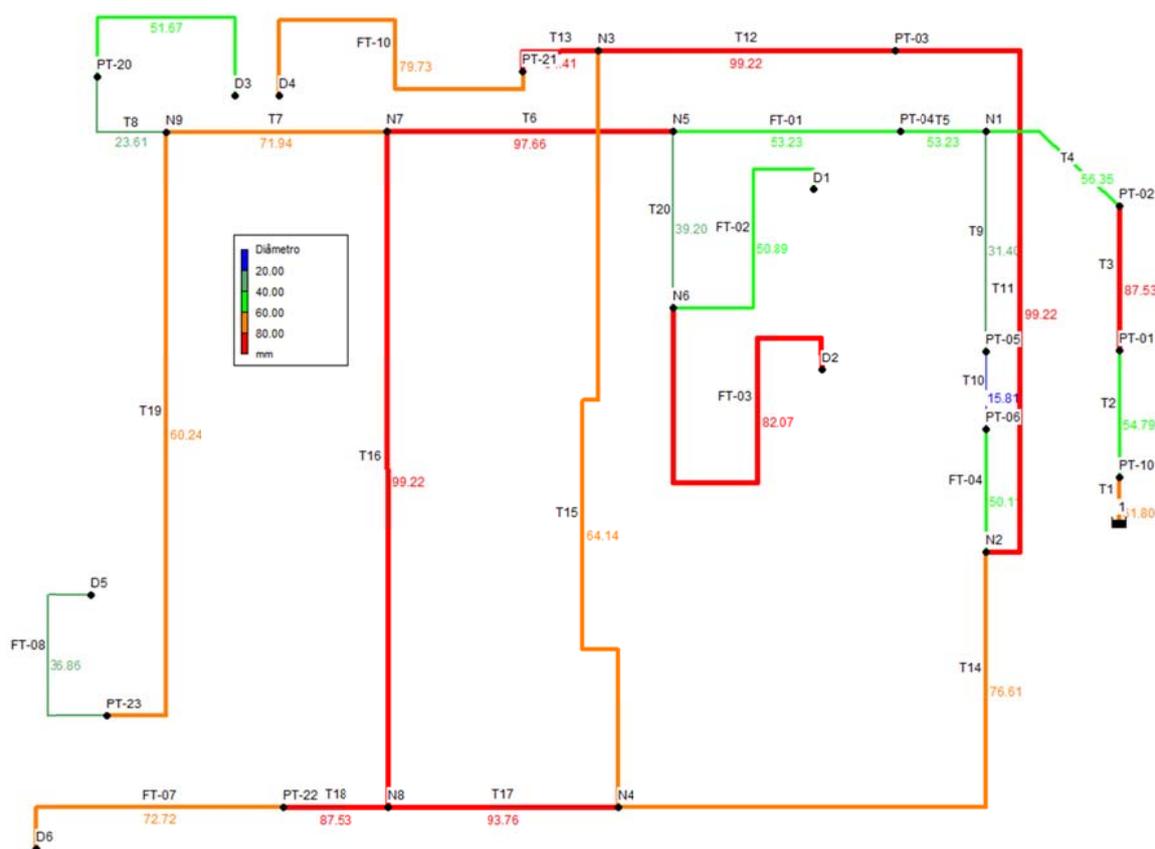


Figura 4.21 - Rede SPDA calibrada através dos Diâmetros Internos

Tabela 4.9 - Resultado dos diâmetros internos após calibração

Trecho	Nó a montante	Nó a jusante	Coef. de perda de carga singular	Diâmetro Interno (mm)
T5	N1	PT-04	1.34	53.22
FT-01	PT-04	N5	4.10	53.22
T6	N5	N7	4.68	97.66
T7	N7	N9	3.21	71.94
FT-09	PT-20	D3	3.80	51.67
T9	N1	PT-05	5.10	31.40
T10	PT-05	PT-06	0.56	15.81
FT-04	PT-06	N2	2.41	50.11
T14	N2	N4	9.12	76.61
T11	N2	PT-03	12.58	99.22
T12	PT-03	N3	4.20	99.22
T15	N4	N3	11.52	64.14
T17	N4	N8	4.43	93.76
T16	N8	N7	10.01	99.22
FT-07	PT-22	D6	4.13	72.72
T19	N9	PT-23	8.90	60.24
FT-10	PT-21	D4	3.72	79.73
T20	N5	N6	2.31	39.20
FT-02	N6	D1	8.00	50.89
T1	1	PT-10	0.10	61.80
T2	PT-10	PT-01	4.25	54.79
T3	PT-01	PT-02	2.40	87.53
T4	PT-02	N1	4.80	56.35
FT-03	N6	D2	9.80	82.07
T18	N8	PT-22	0.15	87.53
FT-08	PT-23	D5	3.00	36.86
T8	N9	PT-20	0.60	23.61
T13	N3	PT-21	0.35	84.41

A Figura 4.22 mostra as diferenças dos valores de pressão medidos e simulados após a calibração alterando os diâmetros internos. As diferenças dos valores da pressão estão dentro dos critérios estabelecidos pela WRC.

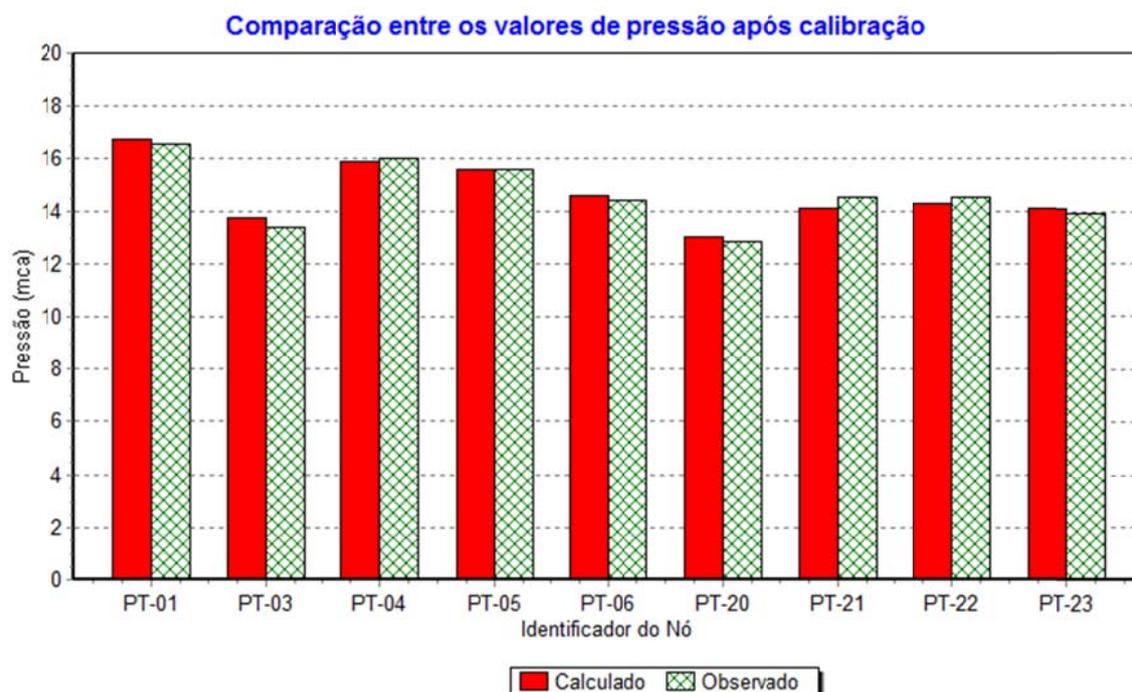


Figura 4.22 - Comparação dos valores de pressão medidos e calibrados

### 4.3.2 Calibração Multivariada com Algoritmo Genético Multiobjetivo

A simulação dinâmica consiste na modelagem hidráulica de operação da rede para que seja possível a variação da demanda de água ao longo do tempo. Para isto, foi necessário criar um padrão de consumo para as demandas dos nós da rede. A Figura 4.23 mostra o gráfico que representa a curva da variação da demanda de água na rede ao longo do tempo, com um intervalo padrão de 3 horas, para um período de simulação de 24 horas do dia. Utilizando o supervisor do SPDA, os registros de gaveta das saídas de água foram utilizados para simular, experimentalmente, uma demanda variável ao longo do tempo. Todos os dados da simulação durante o processo foram armazenados para a realização da calibração. No Apêndice III se encontram os dados das leituras reais, obtidos manualmente dos manômetros instalados nas pontas da rede e através dos transdutores de pressão e vazão.

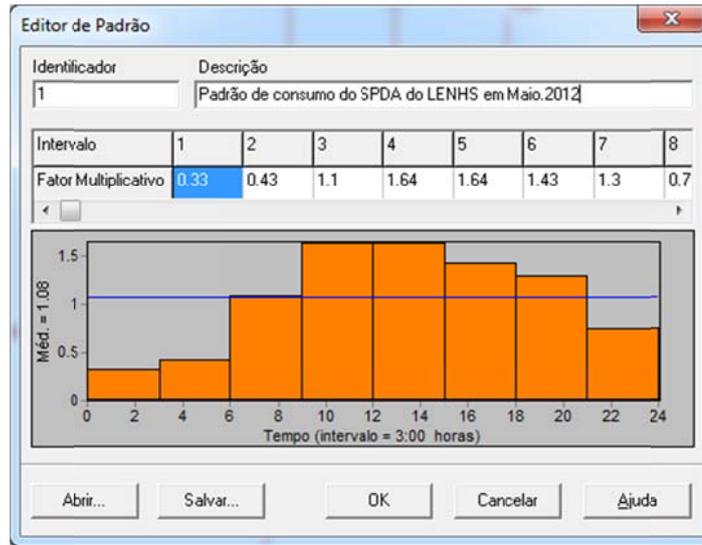


Figura 4.23 - Curva de demanda para a rede SPDA

Os parâmetros genéticos utilizados foram os mesmos obtidos durante análise no início deste capítulo: população inicial de 500, população temporária de 250, probabilidade de reprodução de 80% e mutação de 3%. Os parâmetros da rede utilizados como variáveis do modelo de calibração foram: a rugosidade, a perda de carga localizada ou singular e a demanda de água nos nós. Os demais dados, para esta rede experimental, podem ser consideradas confiáveis para esta simulação. No modelo hidráulico a informação das medidas foram atribuídas em horários para cada cenário de operação diferente da rede resultando em sete medidas para cada ponto de pressão ou vazão.

O modelo da rede foi calibrado obtendo, como resposta, uma boa aproximação dos valores reais e simulados. A Figura 4.24 mostra a correlação dos valores de pressão medidos e simulados. Durante a simulação dinâmica, para cada padrão de consumo, o simulador fornece como resposta as variáveis pressão e vazão. Portanto, no gráfico da Figura 4.24 foram correlacionados todos os pontos de pressão em todas as etapas da simulação dinâmica que ocorreram medições. A maioria dos pontos correlacionados ficou próxima da diagonal principal, o que mostra uma boa aproximação ao longo de todo o processo dinâmico. A Figura 4.25 correlaciona os dados de vazão medidos e simulados ao longo de todo o processo dinâmico para os horários que foram realizados as medições. Foi obtida uma boa aproximação para os dados de vazão ao longo das 24h. As vazões nos trechos medidos foram bem estimadas resultando em uma modelagem mais confiável.

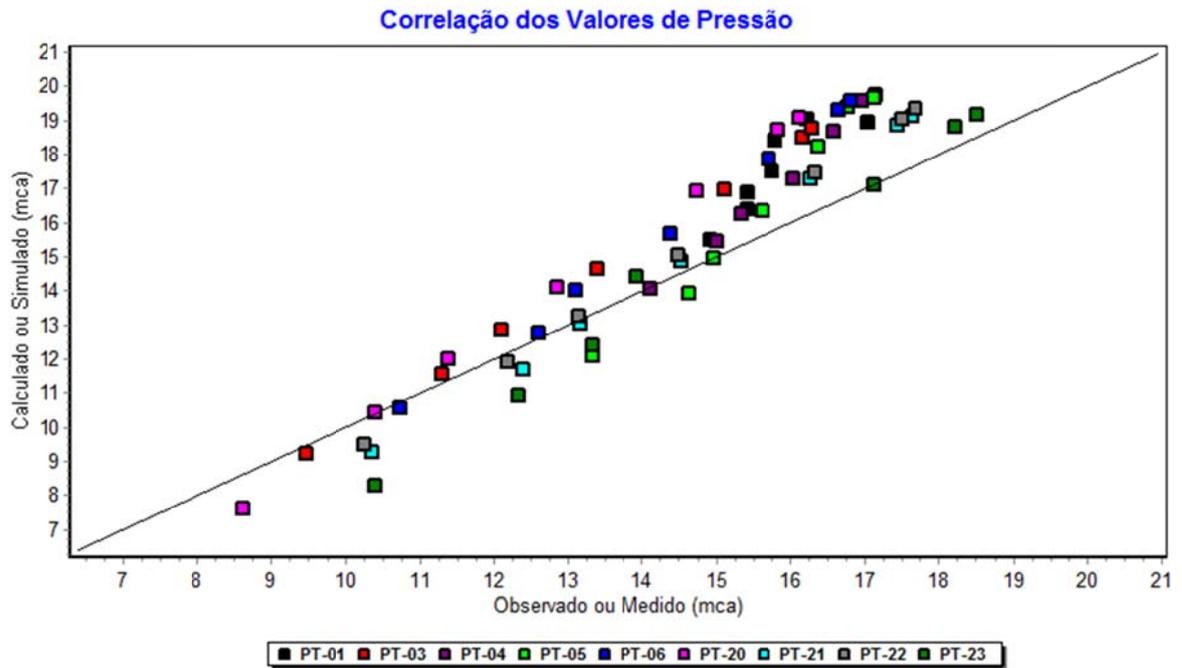


Figura 4.24 - Correlação dos valores de pressão

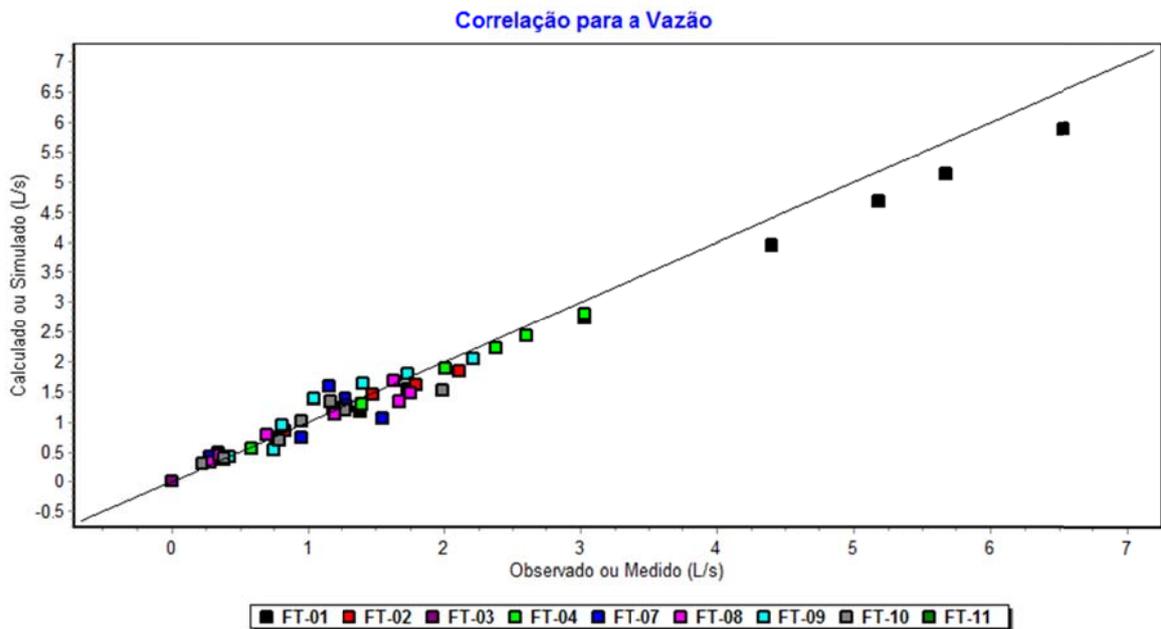


Figura 4.25 - Correlação dos valores de vazão

As diferenças médias dos pontos de pressão, assim como, as vazões nos trechos medidos são mostrados, respectivamente, na Figura 4.26 e na Figura 4.27. Observa-se que segundo os critérios da WRC para 100% das medidas todas as diferenças absolutas de

pressão ficaram abaixo de 2 m. O erro relativo referente aos dados médios de vazão foi de 6,5%, estando este valor bem próximo do critério da WRC.

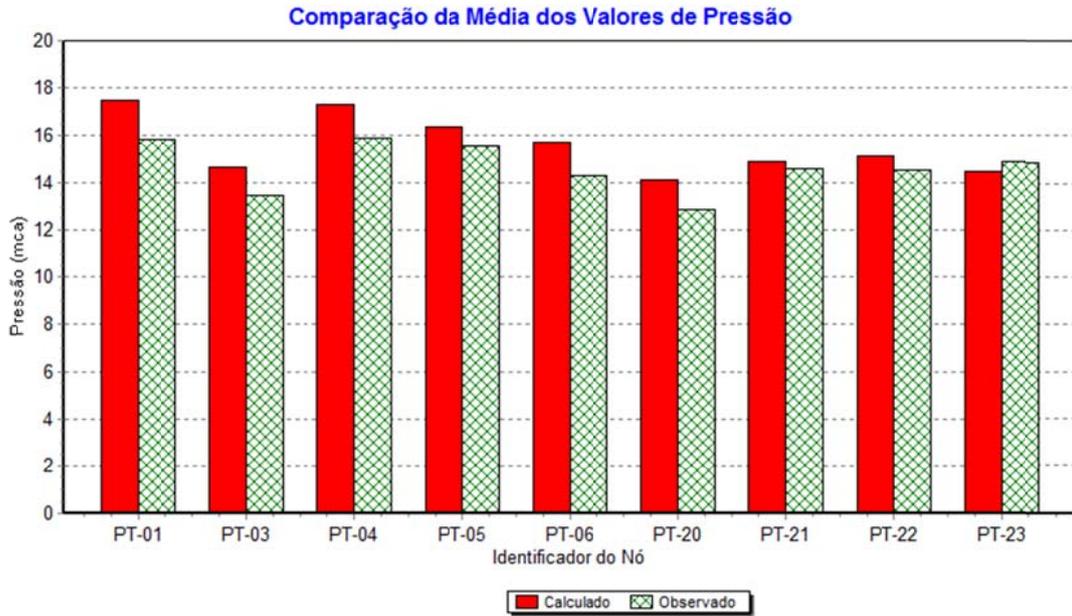


Figura 4.26 – Comparação da média ao longo do tempo dos valores de pressão

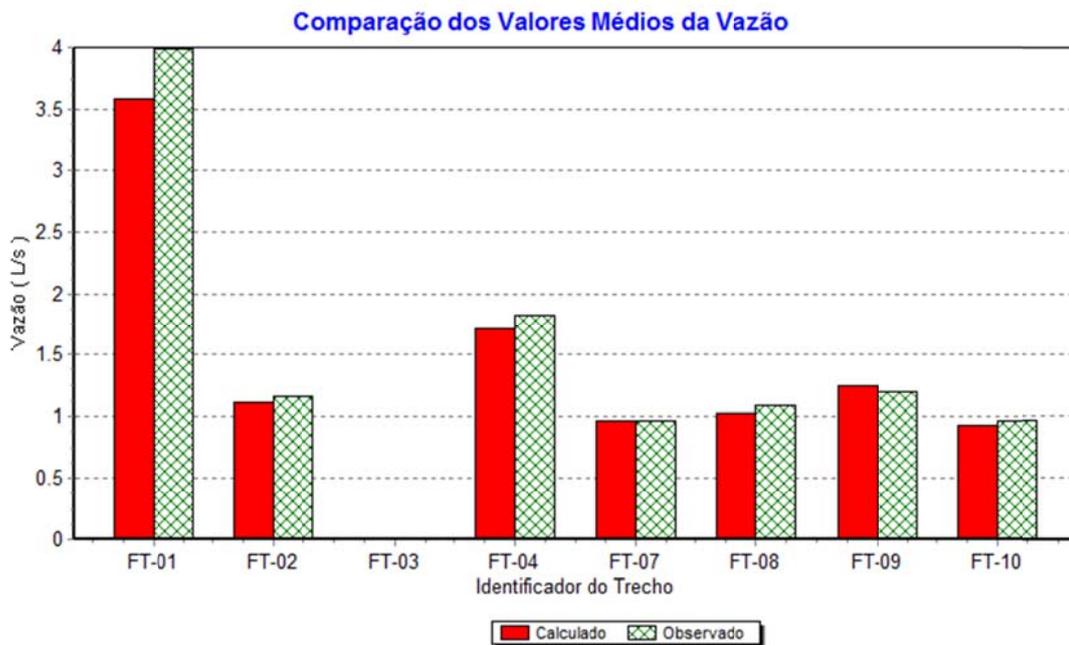


Figura 4.27 - Comparação média ao longo do tempo dos valores de vazão

A dinâmica de consumo resultante nas saídas da rede representada pelos trechos FT-02, FT-07, FT-08, FT-09 e FT-10 e a vazão principal que abastece a rede pelo trecho

FT-01 são mostradas na Figura 4.28. O modelo de calibração encontrou uma solução com a alteração simultânea de três parâmetros da rede e dentro de um processo dinâmico de simulação.

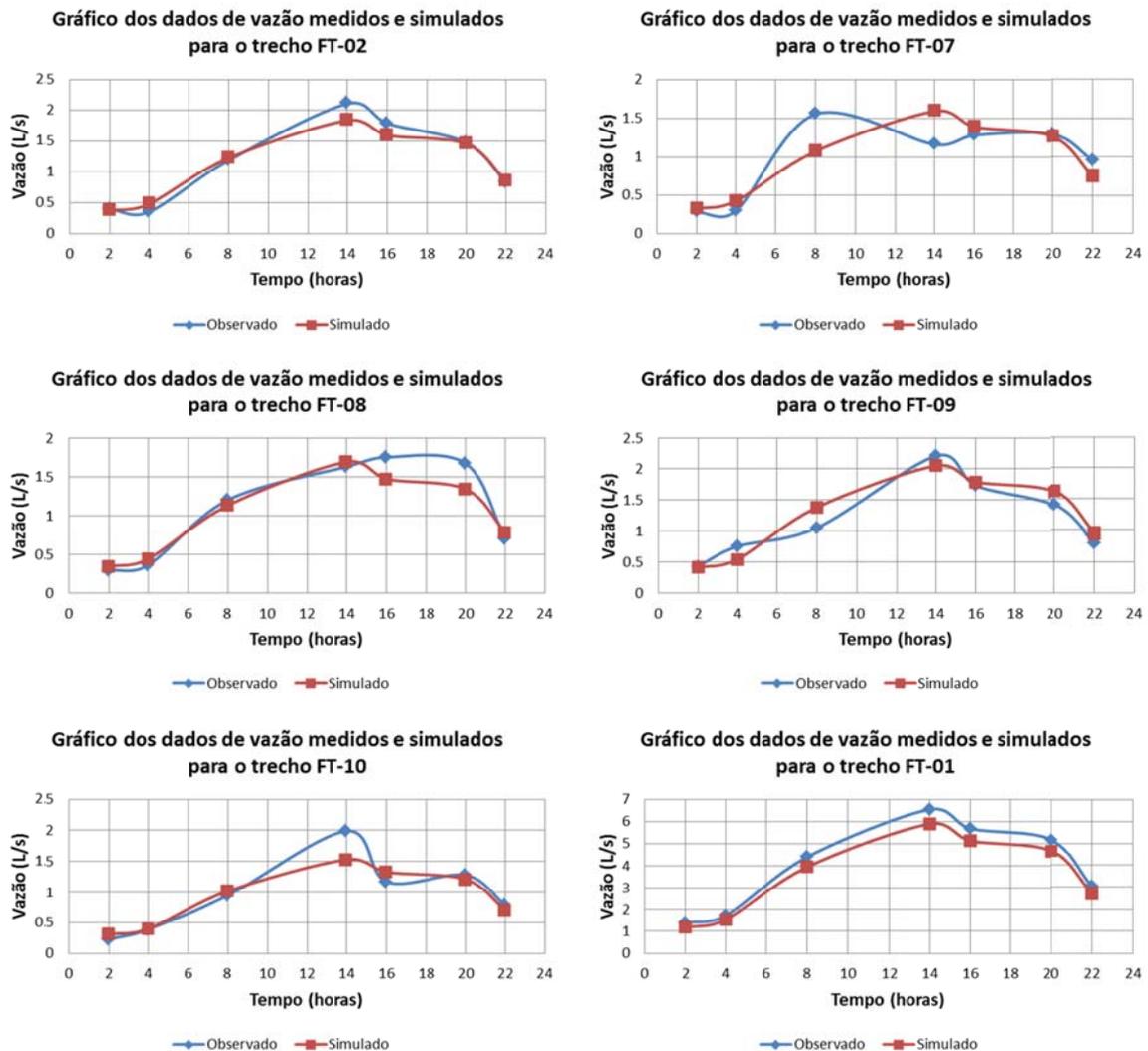


Figura 4.28 - Vazões nos trechos de saída da rede

### 4.3.3 Calibração utilizando o processo iterativo

A princípio o modelo hidráulico da rede foi simulado com todos os seus dados originais (reais), com exceção da perda de carga localizada e da rugosidade. Para a perda de carga localizada foi atribuído o valor “0” a todos os trechos da rede na tentativa das perdas localizadas serem incorporadas às perdas contínuas, através do coeficiente C da

fórmula da perda de carga de Hazen-Williams. Com relação a variável rugosidade, seus valores foram determinados com o processamento do modelo de calibração.

O modelo da rede do SPDA foi calibrado utilizando como variável o coeficiente de rugosidade C da fórmula de Hazen-Williams. Após o processamento do modelo de calibração através do processo iterativo, foram obtidos os valores de C mostrados na Figura 4.29.

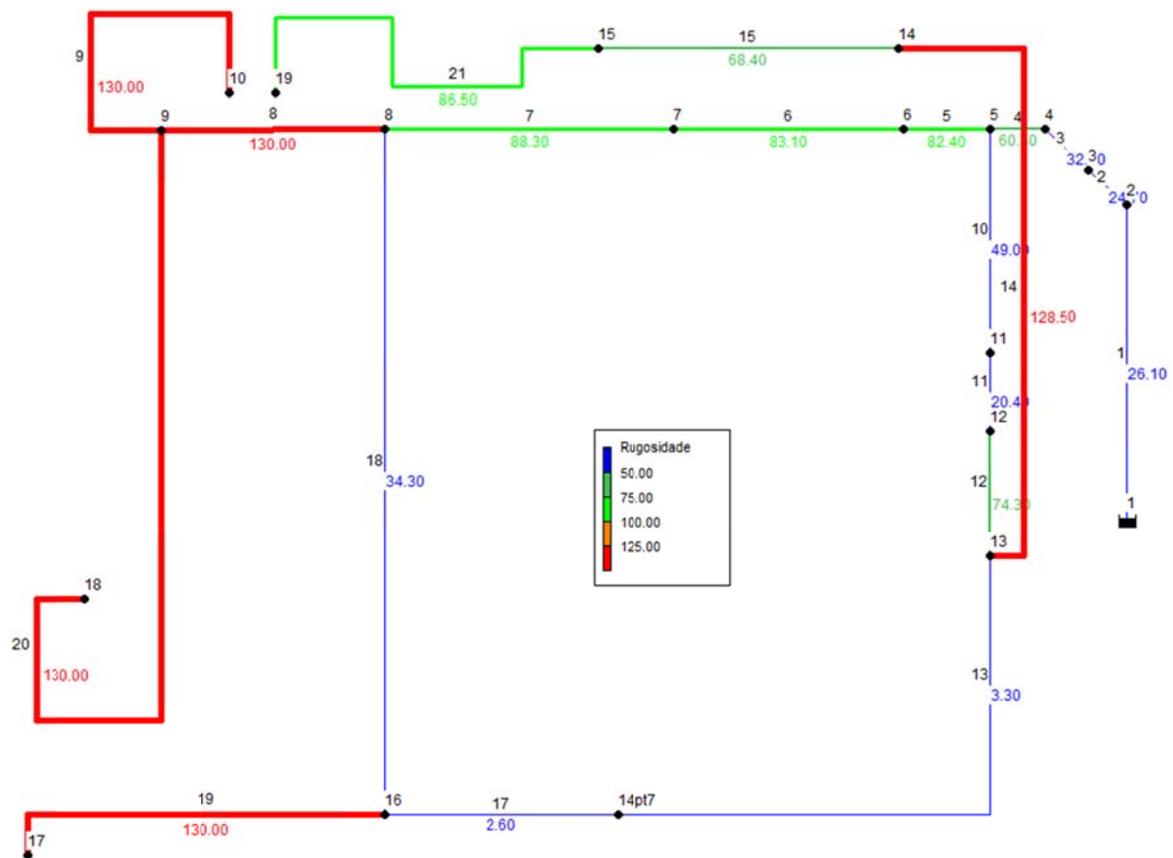


Figura 4.29 - Rede calibrada através da rugosidade absoluta

Pode-se observar que os trechos 13 e 17 obtiveram coeficientes baixos devido a um registro parcialmente fechado localizado entre esses dois trechos. No trecho 11, existe uma perda de carga acentuada provocada por uma válvula multifuncional e outra proporcional e teve como resultado um valor muito baixo para o coeficiente C. Isto comprova que o algoritmo convergiu para uma solução onde foi possível prever as perdas acentuadas mais significativas da rede refletidas na rugosidade através dos valores dos coeficientes C obtidos para os trechos da rede. Os demais valores dos coeficientes C ficaram abaixo dos valores tabelados sugeridos na literatura, pois na representação desses trechos não foram

consideradas as perdas de carga localizadas existentes. As comparações dos valores calculados e observados são mostradas na Figura 4.30 e Figura 4.31. Observa-se que segundo os critérios da WRC as pressões não estão em conformidade por apresentar pressões superiores a 2 m. Para os valores de vazão o erro relativo foi de 6%, ficando próximo dos 5% estabelecidos. As vazões nos trechos obtiveram uma aproximação próxima dos limites da WRC, o que mostra que o modelo hidráulico conseguiu representar, coerentemente, o sentido de fluxo no interior das tubulações.

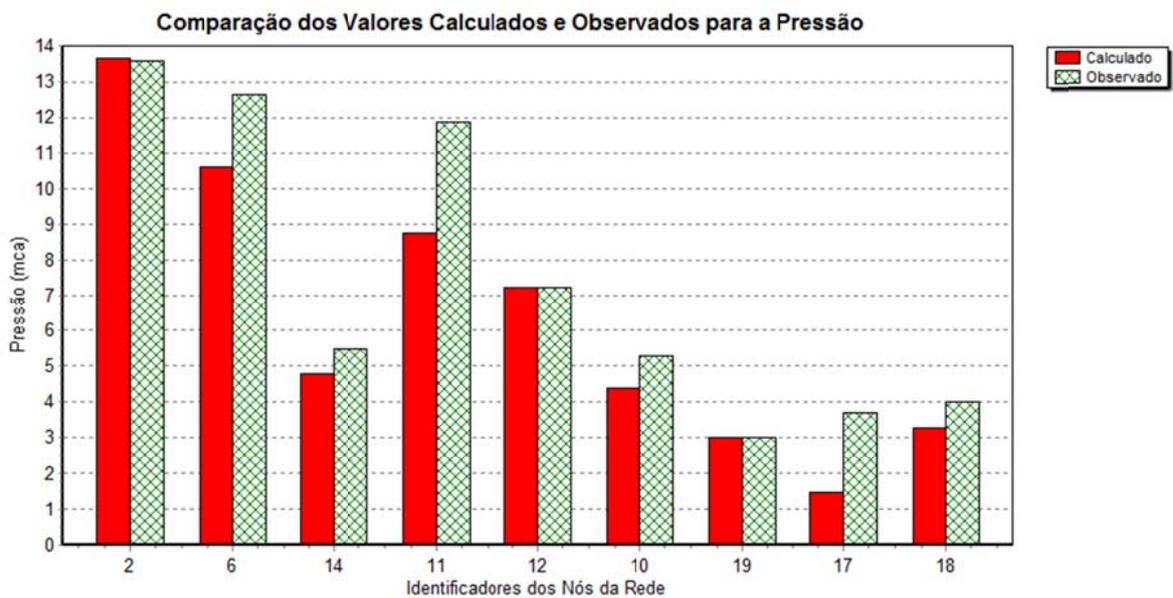


Figura 4.30 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Pressão

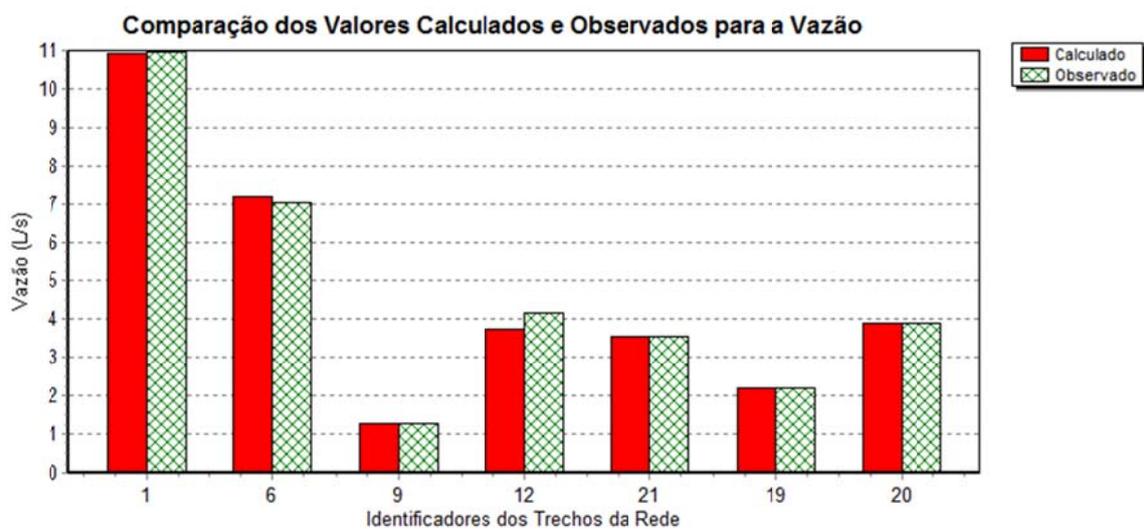


Figura 4.31 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Vazão

Esta modelagem pela demanda representa as demandas de água para os pontos de consumo da rede, podendo corresponder a alimentação de um edifício, indústria, ou uma região de abastecimento formada por ruas ou quadras. Nesta modalidade de calibração um ponto de descarga referente ao nó 7 da rede foi incorporado com uma demanda de 1 L/s, na tentativa de observar se a calibração teria condições de encontrar esse consumo adicionado. Isto foi feito com o intuito de verificar se o modelo de calibração através do processo iterativo seria capaz de identificar com outros dados de medição da rede aquele ponto de consumo.

Os resultados do modelo de calibração da rede modelada através da demanda são apresentados na Figura 4.32. Observa-se que no nó 7 da rede a resposta da calibração registrou uma demanda de 0,71 L/s assim como uma demanda de 1,58 L/s no nó 5, indicando que no intervalo entre o nó 5 e o nó 8 há alguma irregularidade quanto à demanda. Portanto o algoritmo iterativo identificou a demanda não informada ao modelo conforme proposta inicial.

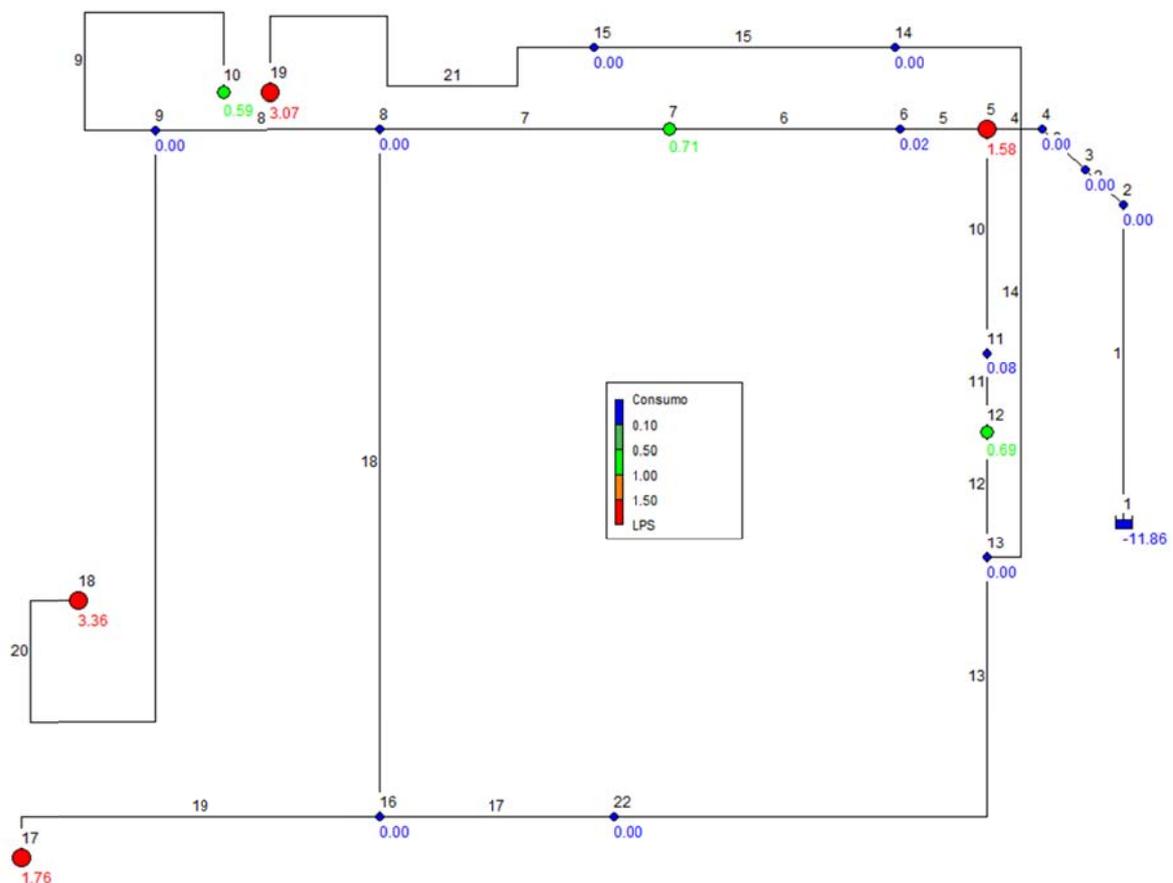


Figura 4.32 - Rede calibrada através da demanda

A comparação dos valores calculados e observados para a vazão na Figura 4.33 gerou um erro médio de 0,693 L/s e um desvio padrão de 1,185 L/s nas 7 amostras coletadas para a vazão. Os resultados de convergência do modelo, através dos critérios pela WRC, não foram bem sucedidos já que o trecho 6 apresentou um erro relativo entre o medido e o simulado para a vazão de 36,7%. A Tabela 4.10 contém os dados referentes aos resultados obtidos para as demandas.

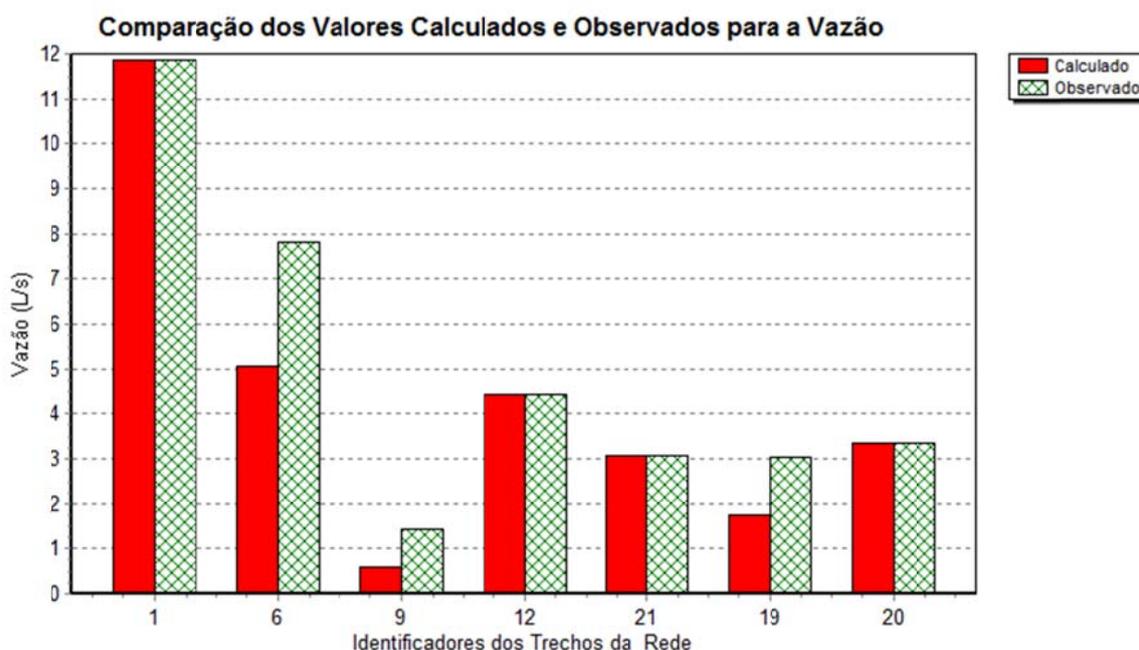


Figura 4.33 - Comparação dos Valores Calculados e Observados para a Vazão

Tabela 4.10 - Demandas encontradas após a calibração do modelo

Identificador do Nó	Demanda (L/s)	Identificador do Nó	Demanda (L/s)
2	0.00	8	0.00
3	0.00	9	0.00
4	0.00	10	0.59
5	1.58	11	0.08
6	0.02	12	0.69
7	0.71		

#### 4.4 CALIBRAÇÃO DE UMA REDE REAL

Com o intuito de validação do modelo de calibração, o LenhsCalibra foi aplicado ao modelo real da rede de abastecimento do Complexo Lagunar, que abastece alguns bairros da cidade de Maceió, Brasil. A rede é composta por tubos de ferro fundido e PVC, totalizando uma extensão de 158.187 metros. Pelo seu tempo de operação, a rede se encontra com sérios problemas de vazamentos e de incrustação nas tubulações, o que ocasiona um abastecimento deficitário, com pressões insuficientes em muitos pontos de consumo.

Foram utilizadas ambas as metodologias de calibração apresentadas neste trabalho para que seus resultados quanto à convergência, tempo de processamento e parâmetros encontrados possam ser comparados. Os parâmetros genéticos foram diferentes dos encontrados durante a análise devido à magnitude da rede de abastecimento a ser modelada. Portanto a população inicial foi de 2000, a população secundária de 1200, a probabilidade de reprodução de 80% e uma mutação de 3%.

Utilizando o seu desenho em *Autocad*® fornecido pela companhia para incorporar as cotas nos nós e os comprimentos dos trechos e posterior conversão para o Epanet, o modelo hidráulico da rede foi simulado com seus valores tabelados de rugosidades, ajustando o coeficiente C para os diversos tubos existentes. A Figura 4.34 representa a rede modelada e simulada ressaltando os pontos de pressão em toda a rede. Observa-se que, desta forma, a rede está com pressões elevadas, e em alguns pontos acima de 40 mca, mas que na realidade, segundo informações da Companhia de Abastecimento de Alagoas – CASAL, existem pontos da rede em que a água só chega quando o consumo diminui (período noturno). Isto significa que o modelo atual simulado na Figura 4.34, sem a calibração, não representa de forma adequada a rede de abastecimento do Complexo Lagunar.

As demandas nodais foram estimadas com dados comerciais fornecidos pela companhia. Para a realização da calibração foram fornecidos 15 pontos de pressão em pontos aleatórios na rede de abastecimento com leituras no mesmo período. Foi realizada uma simulação estática no mesmo período das medições fornecidas. A Figura 4.35 compara os dados de medição com o modelo da rede de abastecimento antes de realizar sua calibração. Os resultados comparados confirmam que o modelo sem calibração não

possui dados compatíveis com a rede real com diferenças absolutas de pressões de até 34 mca.

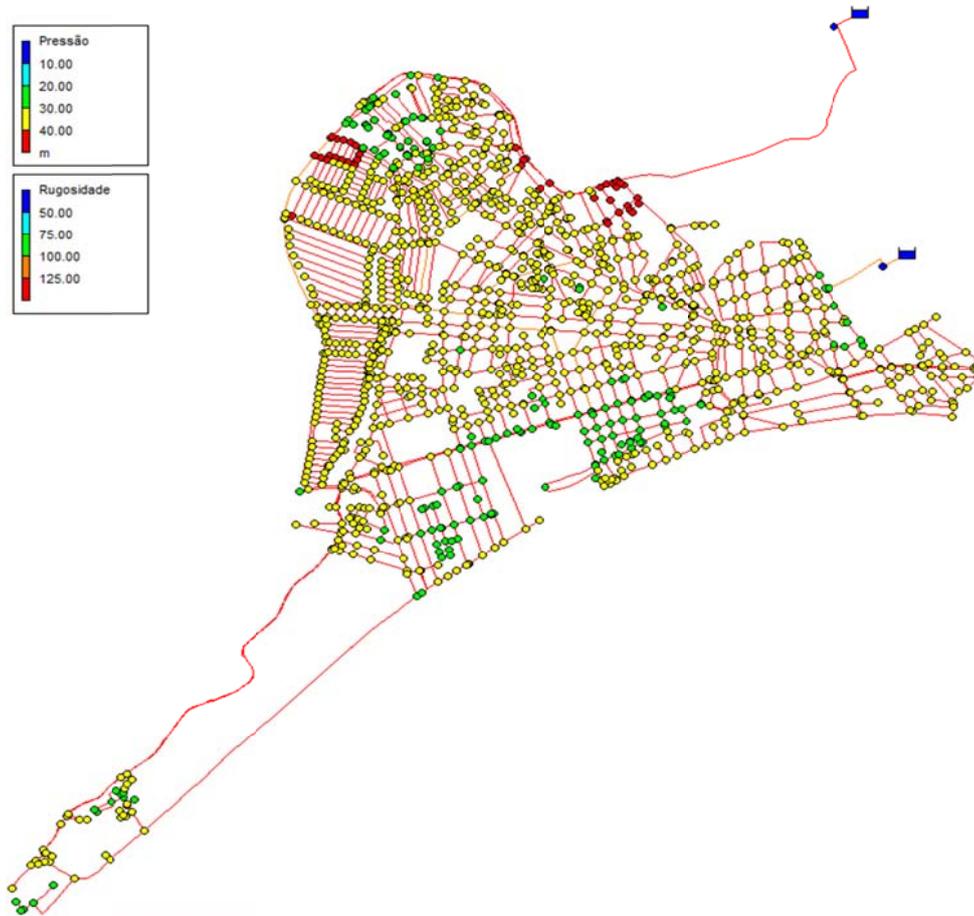


Figura 4.34 - Modelagem no Epanet do Complexo Lagunar

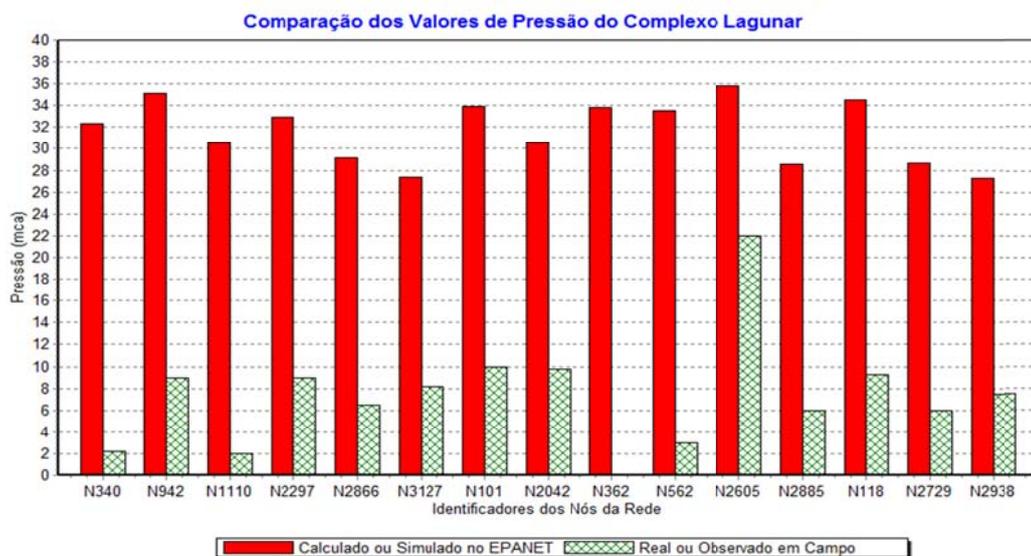


Figura 4.35 - Comparação dos valores de pressão - Complexo Lagunar

A calibração utilizando o processo iterativo através da modificação da rugosidade, variando o coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams, foi finalizada em 36 horas em uma máquina com o processador Core i7 da Intel® com 8 GB de RAM DDR3 e Windows 7 Ultimate x64®. A Figura 4.36 corresponde aos resultados de aproximação dos valores de pressão medidos e calculados após processamento utilizando o algoritmo iterativo. Em 75% das medidas as pressões não ultrapassaram 1 m e, portanto estão em conformidade com os critérios da WRC.

A Figura 4.37 mostra os resultados obtidos para o modelo da rede de abastecimento do Complexo Lagunar. Observa-se em análise dos pontos de pressão resultantes que o modelo não forneceu informações conclusivas uma vez que toda a rede apresenta muitos pontos de pressão fora da faixa necessária para o abastecimento. Portanto, pode-se concluir que para o processo iterativo, muitos pontos de medição são necessários para produzir resultados que possam dar subsídios para uma reabilitação mais eficaz, já que o algoritmo modificou os coeficientes C das tubulações que alimentavam apenas os pontos de medição, beneficiando-os.

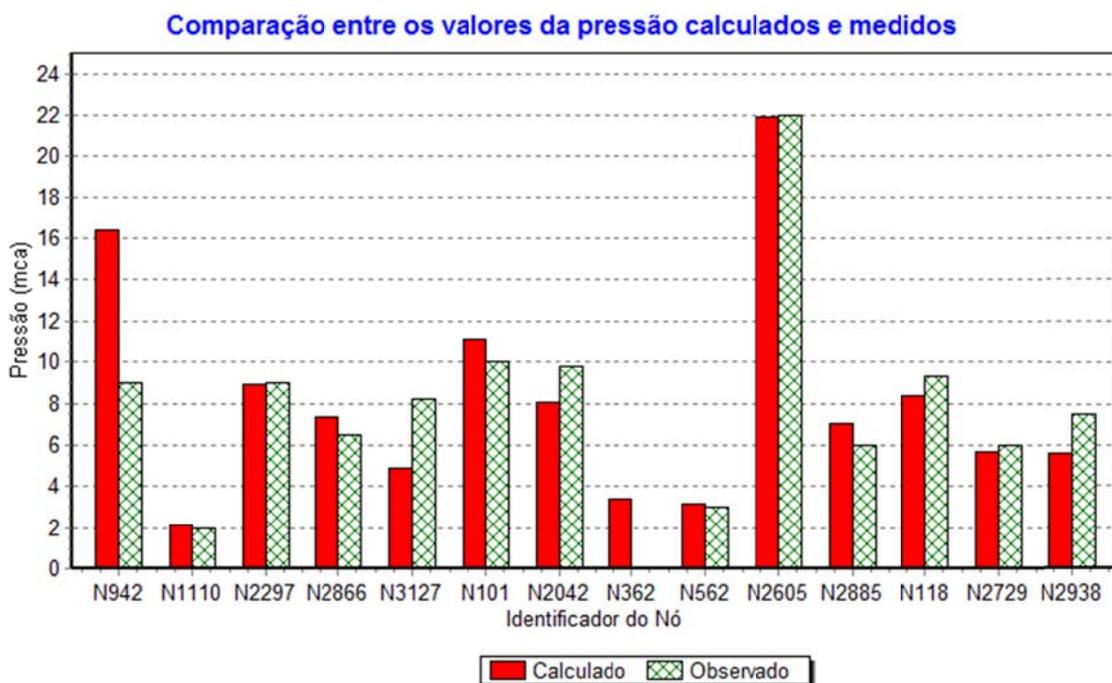


Figura 4.36 - Comparação dos valores de pressão do iterativo-Complexo Lagunar

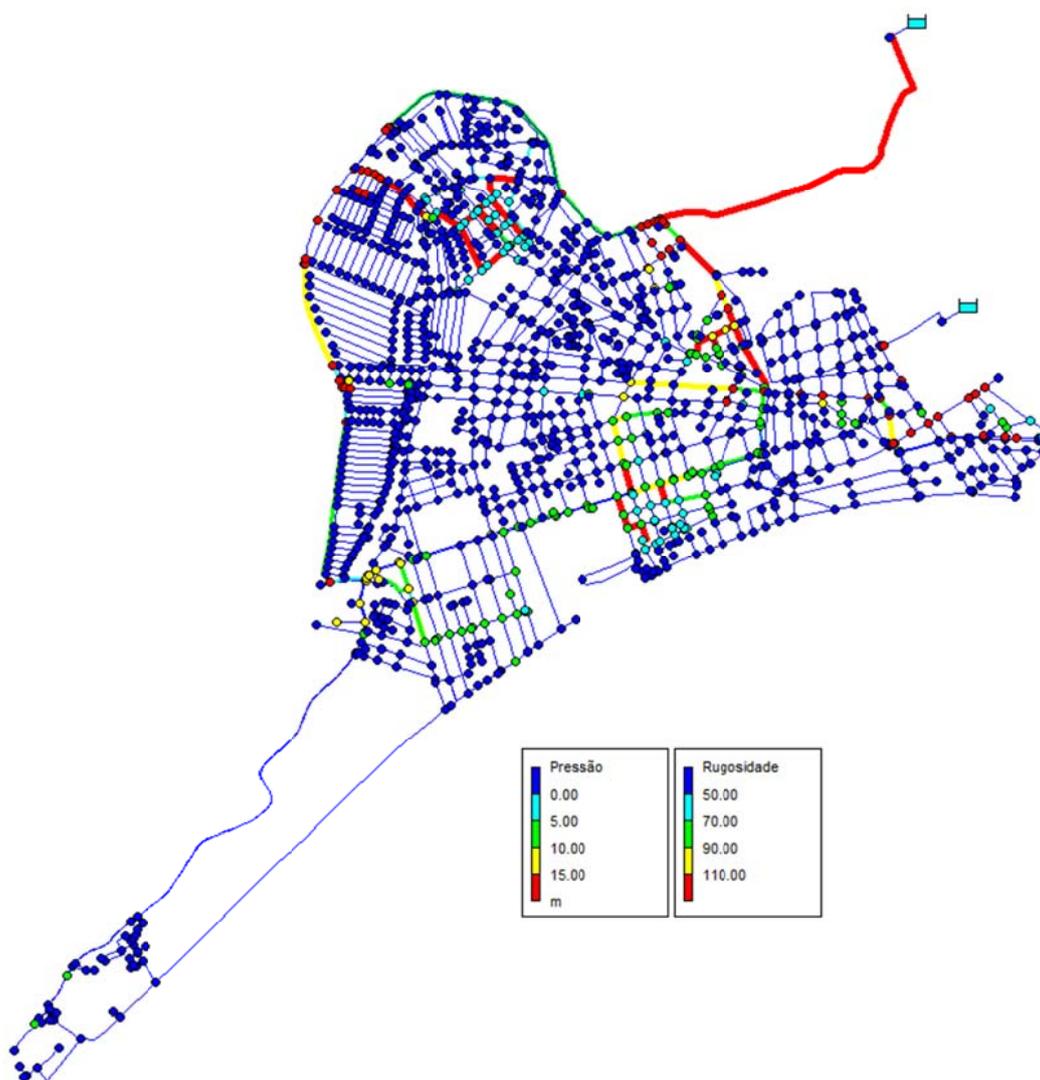


Figura 4.37 - Complexo Lagunar calibrado pelo processo iterativo

Com a utilização do LenhsCalibra através do algoritmo genético multiobjetivo com a modificação do parâmetro das rugosidades, representados pelo coeficiente C de Hazen-Williams, o modelo da rede de abastecimento do Complexo Lagunar foi calibrada e teve sua convergência próxima da 60ª geração, como pode ser observado na Figura 4.38. Foi processada no tempo de 1 hora e 35 minutos em um processador Intel® Quad-core com 4 Gbyte de RAM e com o sistema operacional Windows 7 Ultimate®.

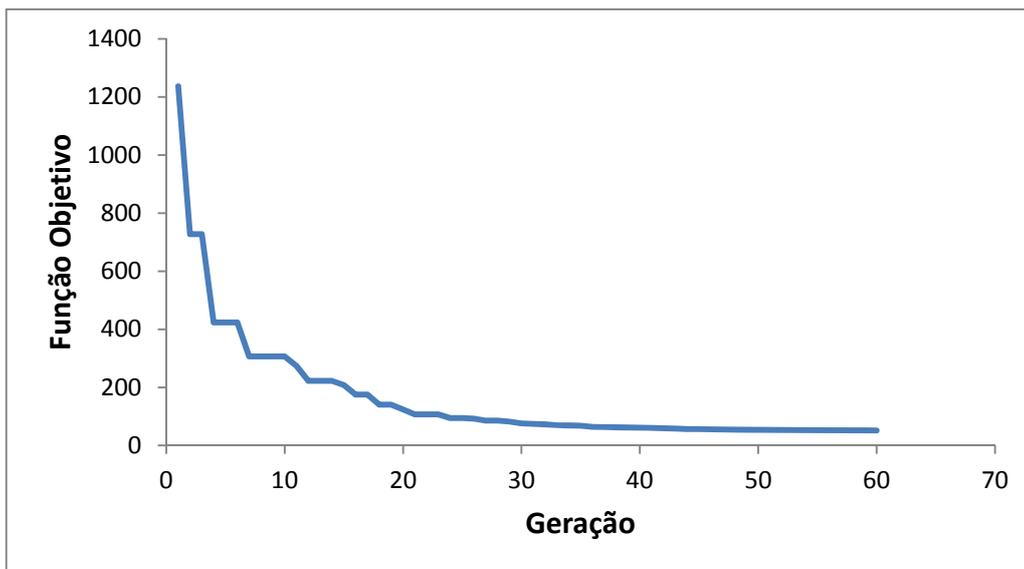


Figura 4.38 - Convergência da função objetivo

Os resultados dos coeficientes encontrados e das pressões que compõem o modelo da rede podem ser visualizados na Figura 4.39. Observa-se que foram obtidos diversos valores de pressão mais compatíveis com a realidade da rede em estudo. A área em azul referente as pressões abaixo de 5 mca serviram como referencia para futuras intervenções na rede de abastecimento como proposta de reabilitação. A diferença entre os valores das pressões medidas e calculadas após sua calibração pode ser observada na Figura 4.40. A correlação entre as medidas e o modelo para esses pontos de pressão foi de 0,934 e antes da calibração foi de 0,301. Para 75% das medidas de pressão as diferenças absolutas ficaram próximas de 1 m passando um pouco do critério estabelecido pela WRC. O algoritmo genético multiobjectivo, através do LenhsCalibra, mostrou ser uma ferramenta prática e que possibilita a calibração de redes reais modeladas no simulador hidráulico Epanet.

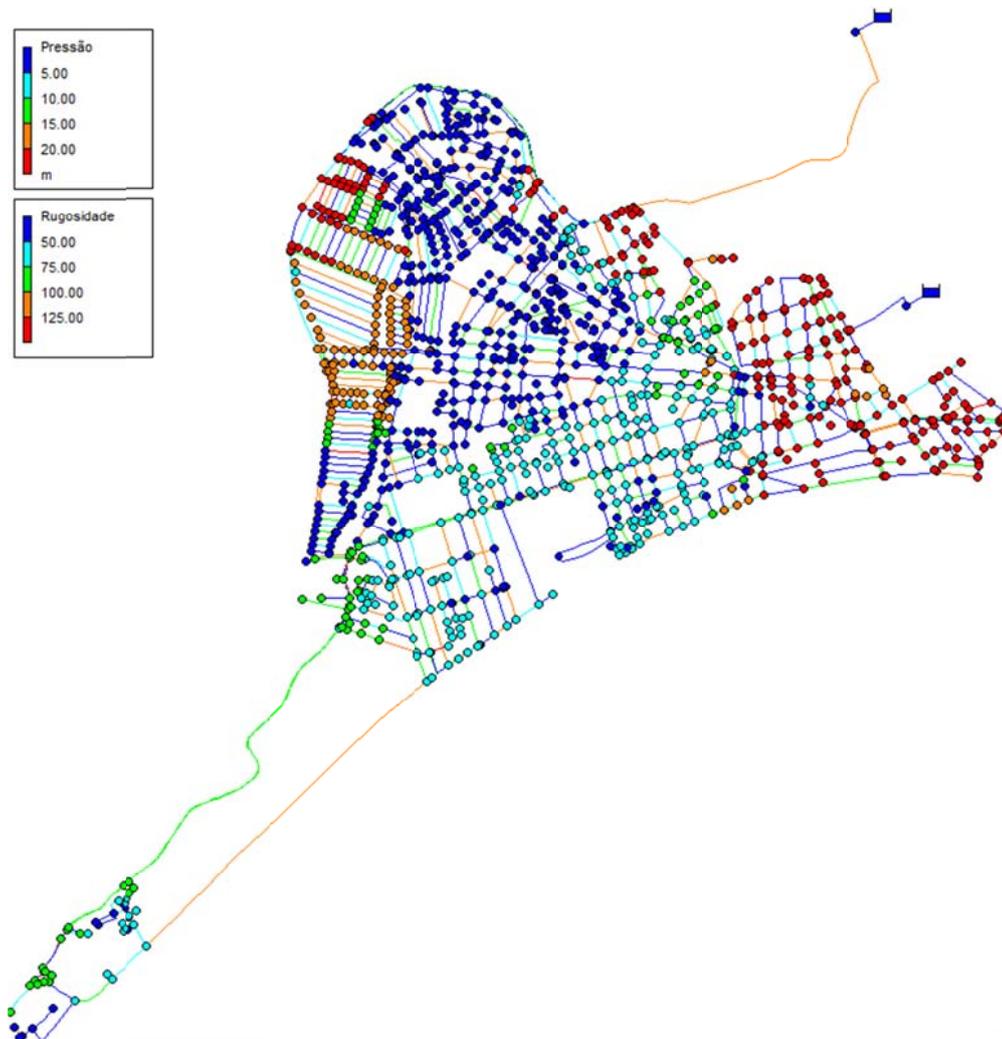


Figura 4.39 - Complexo Lagunar calibrado pelo algoritmo genético

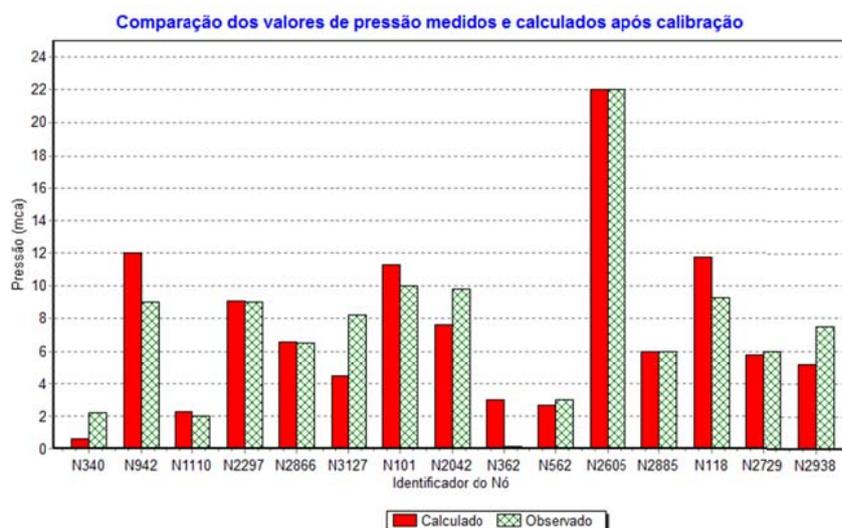


Figura 4.40 – Comparação dos valores de pressão após calibração via AGM

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 CONCLUSÕES

Esta tese teve como objetivo o desenvolvimento de dois modelos de calibração: um algoritmo iterativo e outro um algoritmo genético multiobjetivo, ambos os algoritmos foram validados através de dois estudos de caso: um da rede do laboratório de hidráulica, conhecida como Sistema Piloto de Distribuição de Água, e a outra uma rede de abastecimento de parte da cidade de Maceió – Brasil, conhecida como o Complexo Lagunar.

Foram desenvolvidos os Algoritmos Iterativo e Genético Multiobjetivo para a calibração de modelos hidráulicos associados ao simulador Epanet através do seu Toolkit de programação. No AGM os parâmetros consolidados foram: uma população inicial de 500, população temporária de 250, probabilidade de reprodução de 80%, tipo de seleção uniforme e mutação de 3%. A programação nas linguagens Delphi/Pascal dos algoritmos propostos, em especial o algoritmo genético multiobjetivo, teve como resultado um conjunto de funções e procedimento que associados a uma interface resulta em uma ferramenta robusta para calibração estática ou dinâmica de redes de distribuição de água. Pela contribuição do LENHS a ferramenta será conhecida como LenhsCalibra.

O algoritmo iterativo de calibração com alteração progressiva do trecho ou nó que melhor proporcionou ganhos na função objetivo mostrou bons resultados práticos, tanto pela identificação das obstruções ou perdas de carga acentuadas da rede, como também possíveis perdas reais de água. A aplicação no modelo hidráulico da rede de abastecimento do Complexo Lagunar, Maceió – Brasil mostrou que a metodologia obteve convergência encontrando diferenças satisfatórias dos valores calculados e medidos segundo os critérios da WRC, mas para uma possível identificação de pontos para reabilitação em análise dos

parâmetros resultantes do processo de calibração serão necessários mais pontos de medição para produzir bons resultados. Como proposta inicial o algoritmo iterativo foi desenvolvido para complementar um refinamento final no resultado encontrado pelo algoritmo genético; entretanto o algoritmo genético produziu melhores resultados. Portanto o algoritmo iterativo permanece como alternativa de calibração de redes de distribuição de água.

O algoritmo genético multiobjetivo, comparado com o algoritmo iterativo desenvolvido, proporcionou melhores resultados quanto a convergência da função objetivo e tempo de processamento, quando aplicado a redes de grande porte como foi o caso do Complexo Lagunar, Maceió – Brasil. O algoritmo iterativo levou 36 horas para encontrar uma solução, enquanto que o algoritmo genético durou apenas 1 hora e 35 minutos. Diante da magnitude da rede do Complexo Lagunar, apesar de terem sido utilizados apenas 15 (quinze) pontos de pressão de forma aleatória, disponibilizados pela companhia, o algoritmo encontrou um cenário que delimitava uma área com problemas de pressão, possibilitando assim uma reabilitação mais eficaz.

A calibração individual das variáveis mostraram resultados que indicam pontos de saída d'água e perdas de carga elevada, podendo representar respectivamente demandas não contabilizadas ou vazamentos e tubos com obstruções em seu interior ou registros instalados parcialmente fechados. Portanto, uma reabilitação com base em uma boa modelagem hidráulica seguida de uma calibração dos dados desconhecidos resulta em uma minimização de tempo e recursos para o reparo em sistemas de abastecimento. A utilização de sete variáveis dentro do modelo de calibração e ainda com a possibilidade de se utilizar quaisquer combinações dentre elas foi uma das importantes contribuições deste trabalho. Em todas as tentativas de calibração houve convergência do algoritmo, mesmo quando utilizado com 06 (seis) variáveis simultaneamente.

Pela evidência demonstrada nos dois estudos de caso pode-se concluir que o modelo é considerado eficaz, além de permitir ao usuário a sua utilização de forma prática com uma interface amigável, mostrando em tempo real a convergência da função objetivo. Ao final do processamento de calibração, o usuário pode modificar os parâmetros genéticos e efetuar uma nova calibração até que o resultado final da função objetivo esteja dentro dos limites que deseja para o modelo da rede.

Durante a manipulação do Sistema Piloto de Distribuição de Água do LENHS e coleta de dados, ficou evidente o quanto é complexo, em redes malhadas, prever de forma

exata, o fluxo da água no interior das tubulações, assim como, as pressões resultantes após modificações operacionais na rede.

## **5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Recomenda-se, em trabalhos futuros, utilizar outras linguagens de programação, assim como, a incorporação de mais parâmetros genéticos como opção para a utilização variada do algoritmo genético. Seria interessante incluir, como variável, os níveis dos reservatórios, possibilitando uma solução temporal tanto para o nível como para o posicionamento de válvulas.

Sugere-se ainda acoplar ao calibrador um sistema SCADA para realizar, em tempo real, a medição das variáveis de estado e a calibração do modelo hidráulico do sistema de abastecimento de água monitorado.

Na utilização de duas ou mais variáveis incluir os pesos para cada uma delas, assim como a relativização das variáveis de estado no cálculo da função objetivo quando forem utilizadas medidas de pressão e vazão conjuntamente.

## REFERÊNCIAS

ALVISI S. AND FRANCHINI M. Calibration and Sensitivity Analysis Of The C-Town Pipe Network. *In Model Water Distribution System Analysis 2010*, 12-15, Tucson, AZ, USA. 2010

BHAVE, P. R. “Calibrating water distribution network models.” *J. Envir. Engrg.*, ASCE, v.114(1), pp.120–136. 1988.

BOULOS P and ALTMAN T. A graph-theoretic approach to exhibit nonlinear pipe network optimization. *Appl Math Modeling*; V.15.pp.459–66. 1991

BOULOS P, ALTMAN T. and LIOU, J. C. P. On the solvability of water distribution networks with unknown pipe characteristics. *Appl Math Modeling*; V.17.pp.380–387. 1993

CHEUNG, P. B. Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo. São Carlos, 2004. 268p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CHEUNG, P. B. Comparação de métodos de calibração de redes hidráulicas. *In: SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água*, João Pessoa - Brasil, 2006.

FUJIWARA, O and LI, J. Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand. *Water Resources Research*, v. 34(7), pp.1843-1850. 1998

GOMES, H. P. e SALVINO, M. M. Epanet 2.0 Brasil: Manual do Usuário. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2007.

GOMES, H. P. BEZERRA, S. T. M. Reabilitação de Sistemas de Distribuição de Água. em: GOMES, H. P., GARCIA, R. P. e REY, P. L. I. (Org.). *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*. 1 ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB. (2009)

GOMES, H. P. BEZERRA, S. T. M. CARVALHO, P. S. O. GUERRA, H. H. G. SALVINO, M. M. Calibração do Sistema Automatizado de Distribuição de Água do LENHS UFPB. In: *SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua*, Valência(Espanha), 2009.

GRECO, M. GIUDICE, G. Member, ASCE “Calibrating water distribution network models.” *J. Hydraulic Engineering*.V. 125(8), pp. 849–854. 1999.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. 1989

HOLLAND, J.H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MIT Press.

JOWITT, P. W. Effects of Pipe Failures on Water Distribution Networks In: CABRERA, E. (ed.); VELA, A. F. (ed.): *Improving Efficiency and Reliability in Water Distribution Systems*, pp. 283-302. 1995

KANG, D. e KEVIN LANSEY, A. M. “Demand and Roughness Estimation in Water Distribution Systems.” *Journal of Water Resources Planning and Management.*, ASCE, v.137(1), pp. 20–30. 2011.

MACHADO, E. C. M. N e GALVÃO, C. O. Otimização Multiobjetivo Utilizando Algoritmos Genéticos. Apostila da disciplina Sistemas de Apoio a Decisão. Campina Grande, 2004.

MARCUZZO, F. F. N. Sistema de otimização hidráulica e econômica de rede de irrigação localizada usando algoritmos genéticos. 361 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

MARTINEZ, F.; CONEJOS, P. E VERCHER, J. Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands. Proceedings of the 26th ASCE *Water Resources Planning and Management Division Conference*, Tempe, Arizona, USA. 1999

MORAES, F. A. Calibração de Modelo de Decaimento de Cloro Aplicado a Setor de Rede de Distribuição de Água Real. São Carlos, 2008. 225p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008

NEVES, C. L. Calibração de Parâmetros de Modelos Hidráulicos de Redes de Distribuição de Água para Estudos de Operação de Rede. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-108/2007, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF. 143p. 2007

NELDER, J., and MEAD, R. “A simplex method for function minimization.” *Comput. J.*, v.7, pp. 308–311. 1965

NICOLINI M., GIACOMELLO C., DEB K. Calibration and Optimal Leakage Management for a Real Water Distribution Network. *Journal of Water Resources Planning Management*, 137(1): pp. 134-142. 2011

ORMSBEE, L. E., and LINGIREDDY, S. “Calibrating hydraulic network models.” *J. Am. Water Works Assn.*, 89(2), 42–50. 1997.

ORMSBEE, L. E., and WOOD, D. J. “Explicit pipe network calibration.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 112(2), 166–182. 1986

RIGHETTO, A. M. Calibração de Modelo Hidráulico de Rede de Distribuição de Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, v. 6, n. 3, p. 33-44. 2001

ROSSMAN, L. A. EPANET2: User’s manual. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, 2008.

SANTOS, A.C.N. Estudo de Calibração de uma rede de Distribuição de água de Itajubá-MG utilizando os Algoritmos Genéticos. Itajubá, 2010. 57p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. 2010.

SILVA, F. G. B. e REIS, L. F. R. Calibração de redes de distribuição de água com algoritmos genéticos aplicada a uma rede hipotética. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitoria - ES, Brasil, Setembro, 2002.

SILVA, F. G. B. Estudos de calibração de redes de Distribuição de água através de Algoritmos Genéticos – Tese de Doutorado apresentada a Universidade de São Paulo, Campus de São Carlos. São Carlos/SP, 2003.

SOARES, A. K. (2003). Calibração de Modelos de Redes de Distribuição de Água para Abastecimento Considerando Vazamentos e Demanda Dirigida pela Pressão. São Carlos. 153p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

SOARES, A. K. e REIS, L. F. R. Estudo dos parâmetros do modelo de vazamentos de um setor da rede de distribuição de água de Piracicaba-SP. In: IV SEREA - Seminário Hispano-Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa - PB, Brasil, Novembro, 2004.

TABESH, M. and KARIMZADEH, A., Optimum Design of Reliable Distribution Systems Considering Pressure Dependency of Outflows, *in Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, eds. Savic, D. A. e Walters, G. A., p. 211-220, 2000.

TODINI, E.; PILATI, S. A Gradient Algorithm for the Analysis of Pipe Networks. In: *Computer Applications In Water Supply – System Analysis And Simulation*. COULBECK, B.; ORR, C. H. (eds.), vol. 1, p. 1-20, 1988.

TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak Analysis in Pipeline Systems by Means of Optimal Valve Regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 277-285, Mar 1999.

WATER RESEARCH CENTRE. *Network Analysis – A Code for Practice*. Published by WRc, Swindon, UK. 1989.

WU, Z. Y. e SAGE, P. Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration. *In: ASCE 8th Annual International Symposium on Water Distribution System Analysis*, Cincinnati - Ohio, Agosto, 2006.

WU, Z. Y. and WALSKI, T. M. An Effective Approach for Solving Battle of Water Calibration Network Problem. *Journal of Water Resources Planning and Management* 2011.

## APÊNCIDE I – BIBLIOTECA DOS ALGORITMOS

```
984: //////////////////////////////////////
985: // Algoritmo Iterativo de Calibração - Redes Maiores //
986: //////////////////////////////////////
987: randomize();
988:
989: if (RadioButton1.Checked) then
990: begin
991:
992: ind_pressao_total := 1;
993: //coletando dados de pressao da tabela
994: for i:=1 to 100 do
995: begin
996: if ( CompareText(TabelaDados.Cells[2, i], 'Pressão' ) = 0 ) then
997: begin
998: pressoes[1][ind_pressao_total] := TabelaDados.Cells[1, i]; //id
999: pressoes[2][ind_pressao_total] := TabelaDados.Cells[3, i]; //tempo
1000: pressoes[3][ind_pressao_total] := TabelaDados.Cells[4, i]; //valor
1001: ind_pressao_total := ind_pressao_total + 1;
1002: end;
1003: end;
1004:
1005: ind_vazao_total := 1;
1006: //coletando dados de vazao da tabela
1007: for i:=1 to 100 do
1008: begin
1009: if ( CompareText(TabelaDados.Cells[2, i], 'Vazão' ) = 0 ) then
1010: begin
1011: vazoes[1][ind_vazao_total] := TabelaDados.Cells[1, i]; //id
1012: vazoes[2][ind_vazao_total] := TabelaDados.Cells[3, i]; //tempo
1013: vazoes[3][ind_vazao_total] := TabelaDados.Cells[4, i]; //valor
1014: ind_vazao_total := ind_vazao_total + 1;
1015: end;
1016: end;
1017:
1018: ENSolveH();
1019:
1020: ENgetcount( EN_LINKCOUNT, trechos);
1021: ENgetcount( EN_NODECOUNT, nos);
1022: continua_rug := false;
1023: continua_dem := false;
1024:
1025:
1026: 1027: // Rugosidade
1028: if (CheckBox1.Checked) then
1029: begin
1030: continua_rug := true;
1031: t_escolhido := -1;
1032: incremento := StrToFloat(Edit4.Text);
1033: for i := 1 to trechos do
1034: begin
```

```

1035: ENgetlinktype(i, tipo_trecho);
1036: if (tipo_trecho = EN_PIPE) then
1037: begin
1038: if ( CompareText(label8.Caption, ' (H-W) ') = 0 ) then
1039: ENsetlinkvalue(i, EN_ROUGHNESS, 1);
1040: end;
1041: end;
1042:
1043: end;
1044: // demanda
1045: if (CheckBox2.Checked) then
1046: begin
1047: continua_dem := true;
1048: n_escolhido := -1;
1049: incremento := StrToFloat(Edit5.Text);
1050: for i := 1 to nos do
1051: begin
1052: ENgetnodetype(i, tipo_no);
1053: if (tipo_no = EN_JUNCTION) then
1054: begin
1055: ENsetnodevalue(i, EN_BASEDEMAND, 0.0);
1056: end;
1057: end;
1058: end;
1059:
1060: ENSolveH();
1061:
1062: MaiorDiferenca := SomaDiferencaPressao(0); // simulacao estatica
1063: MaiorDiferencaDemanda := SomaDiferencaVazao(0);
1064:
1065: ProgressBar1.Max := round(Abs(MaiorDiferenca) +
Abs(MaiorDiferencaDemanda));
1066:
1067: while ((continua_rug) or (continua_dem)) do
1068: begin
1069:
1070: ProgressBar1.Position := (ProgressBar1.Max -
round(Abs(MaiorDiferenca) + Abs(MaiorDi
1071:
1072: // Demanda
1073: if (CheckBox2.Checked) and (continua_dem) then
1074: begin
1075: n_escolhido := -1;
1076: for i := 1 to nos do
1077: begin
1078: ENgetnodetype(i, tipo_no);
1079: if (tipo_no = EN_JUNCTION) then
1080: begin
1081: ENgetnodevalue(i, EN_BASEDEMAND, demanda);
1082:
1083: demanda := demanda + incremento;
1084:
1085: ENsetnodevalue(i, EN_BASEDEMAND, demanda);
1086:
1087: ENSolveH();
1088:
1089: if (SomaDiferencaVazao(0) <= MaiorDiferencaDemanda) and
(VerificaValoresDema
1090: begin
1091: MaiorDiferencaDemanda := SomaDiferencaVazao(0);

```

```

1092: n_escolhido := i;
1093: end;
1094:
1095: demanda := demanda - incremento;
1096:
1097: ENsetnodevalue(i, EN_BASEDEMAND, demanda);
1098:
1099: ENSolveH();
1100: end;
1101: end;
1102:
1103: if (n_escolhido >= 0) then
1104: begin
1105: ENgetnodevalue(n_escolhido, EN_BASEDEMAND, demanda);
1106:
1107: // por condição de H-W ou D-W
1108: demanda := demanda + incremento;
1109:
1110: ENsetnodevalue(n_escolhido, EN_BASEDEMAND, demanda);
1111:
1112: ENSolveH();
1113: end;
1114:
1115: if (n_escolhido < 0) then
1116: continua_dem := false;
1117:
1118: end;
1119:
1120: // Rugosidade
1121: if (CheckBox1.Checked) and (continua_rug) then
1122: begin
1123: t_escolhido := -1;
1124: for i := 1 to trechos do
1125: begin
1126: ENgetlinktype(i, tipo_trecho);
1127: if (tipo_trecho = EN_PIPE) then
1128: begin
1129: ENgetlinkvalue(i, EN_ROUGHNESS, rugosidade);
1130:
1131: // por condição de H-W ou D-W
1132: rugosidade := rugosidade + incremento;
1133:
1134: ENsetlinkvalue(i, EN_ROUGHNESS, rugosidade);
1135:
1136: ENSolveH();
1137:
1138: if (SomaDiferencaPressao(0) <= MaiorDiferenca) and
(VerificaValores()) and (
1139: begin
1140: MaiorDiferenca := SomaDiferencaPressao(0);
1141: t_escolhido := i;
1142: end;
1143:
1144: // por condição de H-W ou D-W
1145: rugosidade := rugosidade - incremento;
1146:
1147: ENsetlinkvalue(i, EN_ROUGHNESS, rugosidade);
1148:
1149: ENSolveH();
1150: end;

```

```

1151: end;
1152:
1153: if (t_escolhido >= 0) then
1154: begin
1155: ENgetlinkvalue(t_escolhido, EN_ROUGHNESS, rugosidade);
1156:
1157: // por condição de H-W ou D-W
1158: rugosidade := rugosidade + incremento;
1159:
1160: ENsetlinkvalue(t_escolhido, EN_ROUGHNESS, rugosidade);
1161:
1162: ENSolveH();
1163: end;
1164:
1165: if (t_escolhido < 0) then
1166: continua_rug := false;
1167:
1168: end;
1169: end;
1170: end
1171:
1172: //////////////////////////////////////
1173: // Algoritmo Genético Multiobjetivo - Multivariado
1174: //////////////////////////////////////
1175: else
1176: begin
1177: memo1.Lines.Clear;
1178: memo2.Lines.Clear;
1179: tempo_corrente := Now();
1180: //////////////////////////////////////
1181: // Criando tabelas iniciais //
1182: //////////////////////////////////////
1183: if (CheckBox3.Checked) then
1184: begin
1185: tabelaRug := TStringList.Create();
1186: if (RadioButton3.Checked) then
1187: tabelaRug := CodificaTabela(StrToFloat(Edit8.Text),
StrToFloat(Edit2.Text), StrToI
1188: else
1189: begin
1190: if (ListBox1.Count>0) then
1191: tabelaRug.AddStrings( ListBox1.Items )
1192: else
1193: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados de Rugosidade',
mtInformation, [
1194: end;
1195: geneRug := TStringList.Create();
1196: geneRugNova := TStringList.Create();
1197: end;
1198: if (CheckBox4.Checked) then
1199: begin
1200: tabelaDem := TStringList.Create();
1201: if (RadioButton7.Checked) then
1202: begin
1203: tabelaDem := CodificaTabela(StrToFloat(Edit10.Text),
StrToFloat(Edit9.Text), StrTo
1204: end
1205: else
1206: begin
1207: if (ListBox2.Count>0) then

```

```

1208: tabelaDem.AddStrings( ListBox2.Items )
1209: else
1210: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados de Demanda',
mtInformation, [mbO
1211: end;
1212: geneDem := TStringList.Create();
1213: geneDemNova := TStringList.Create();
1214:
1215: end;
1216: if (CheckBox5.Checked) then
1217: begin
1218: tabelaPer := TStringList.Create();
1219: if (RadioButton9.Checked) then
1220: tabelaPer := CodificaTabela(StrToFloat(Edit12.Text),
StrToFloat(Edit11.Text), StrT
1221: else
1222: begin
1223: if (ListBox3.Count>0) then
1224: tabelaPer.AddStrings( ListBox3.Items )
1225: else
1226: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados de Perda de Carga
Singular', mtInformation, [mbOk], 0);
1227: end;
1228: genePer := TStringList.Create();
1229: genePerNova := TStringList.Create();
1230: end;
1231: if (CheckBox6.Checked) then
1232: begin
1233: tabelaTop := TStringList.Create();
1234: if (RadioButton11.Checked) then
1235: tabelaTop := CodificaTabela(StrToFloat(Edit14.Text),
StrToFloat(Edit13.Text), StrT
1236: else
1237: begin
1238: if (ListBox4.Count>0) then
1239: tabelaTop.AddStrings( ListBox4.Items )
1240: else
1241: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados da Topografia',
mtInformation, [mbOk], 0);
1242: end;
1243: geneTop := TStringList.Create();
1244: geneTopNova := TStringList.Create();
1245: end;
1246: if (CheckBox7.Checked) then
1247: begin
1248: tabelaDia := TStringList.Create();
1249: if (RadioButton5.Checked) then
1250: tabelaDia := CodificaTabela(StrToFloat(Edit16.Text),
StrToFloat(Edit15.Text), StrT
1251: else
1252: begin
1253: if (ListBox5.Count>0) then
1254: tabelaDia.AddStrings( ListBox5.Items )
1255: else
1256: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados de Diâmetros',
mtInformation, [mbOk], 0);
1257: end;
1258: geneDia := TStringList.Create();
1259: geneDiaNova := TStringList.Create();
1260: end;

```

```

1261: if (CheckBox11.Checked) then
1262: begin
1263: tabelaVal := TStringList.Create();
1264: if (RadioButton13.Checked) then
1265: tabelaVal := CodificaTabela(StrToFloat(Edit31.Text),
StrToFloat(Edit25.Text), StrT
1266: else
1267: begin
1268: if (ListBox6.Count>0) then
1269: tabelaVal.AddStrings( ListBox6.Items )
1270: else
1271: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados da Válvula',
mtInformation, [mbOk], 0);
1272: end;
1273: geneVal := TStringList.Create();
1274: geneValNova := TStringList.Create();
1275: end;
1276: if (CheckBox13.Checked) then
1277: begin
1278: tabelaVaz := TStringList.Create();
1279: if (RadioButton13.Checked) then
1280: tabelaVaz := CodificaTabela(StrToFloat(Edit41.Text),
StrToFloat(Edit40.Text), StrT
1281: else
1282: begin
1283: if (ListBox7.Count>0) then
1284: tabelaVal.AddStrings( ListBox7.Items )
1285: else
1286: MessageDlg('Adicione valores a Tabela de Dados de Vazamentos',
mtInformation, [
1287: end;
1288: geneVaz := TStringList.Create();
1289: geneVazNova := TStringList.Create();
1290: end;
1291:
1292: lista_aptido := TStringList.Create();
1293: lista_funcaoobjetivo := TStringList.Create();
1294: lista_selec := TStringList.Create();
1295: lista := TStringList.Create();
1296: tmp := TStringList.Create();
1297: tempos_simulados := TStringList.Create();
1298: id_nodemanda := TStringList.Create();
1299: pressao_nodemanda := TStringList.Create();
1300: k_equivalente := TStringList.Create();
1301:
1302: //////////////////////////////////////
1303: //
1304: //coletando dados dos tempos necessarios (LIMITE DE 5000 DADOS DE
MEDICÃO)
1305: //
1306: //////////////////////////////////////
1307: //
1308: for i:=1 to 5000 do
1309: begin
1310: if (TabelaDados.Cells[3, i] = '') then
1311: break;
1312: if (tempos_simulados.IndexOf(TabelaDados.Cells[3, i])<0) then
1313: tempos_simulados.Add(TabelaDados.Cells[3, i]);
1314: end;
1315:

```

```

1312:
1313: //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
1314:
1315: // criando os individuos aleatoriamente
1316: for i:=0 to StrToInt(Edit18.Text)-1 do
1317: begin
1318: if (CheckBox3.Checked) then
1319: begin
1320: geneRug.Add(IndividuoAleatorio(tabelaRug));
1321: end;
1322: if (CheckBox4.Checked) then
1323: begin
1324: geneDem.Add(IndividuoAleatorio(tabelaDem));
1325: end;
1326: if (CheckBox5.Checked) then
1327: begin
1328: genePer.Add(IndividuoAleatorio(tabelaPer));
1329: end;
1330: if (CheckBox6.Checked) then
1331: begin
1332: geneTop.Add(IndividuoAleatorio(tabelaTop));
1333: end;
1334: if (CheckBox7.Checked) then
1335: begin
1336: geneDia.Add(IndividuoAleatorio(tabelaDia));
1337: end;
1338: if (CheckBox11.Checked) then
1339: begin
1340: geneVal.Add(IndividuoAleatorio(tabelaVal));
1341: end;
1342: if (CheckBox13.Checked) then
1343: begin
1344: geneVaz.Add(IndividuoAleatorio(tabelaVaz));
1345: end;
1346: end;
1347: // condicao de parada
1348: continua := true;
1349: geracoes := 1;
1350: // progress bar
1351: if (Checkbox8.Checked) then
1352: begin
1353: ProgressBar1.Max := StrToInt(Edit22.Text);
1354: ProgressBar1.Position := 0;
1355: end;
1356:
1357: while (continua) do
1358: begin
1359: // decodificando e aplicando as caracteristicas nas redes
1360: Application.ProcessMessages;
1361:
1362:
1363: for i:=0 to StrToInt(Edit18.Text)-1 do
1364: begin
1365: if (CheckBox3.Checked) then
1366: begin
1367: DecCromossomo(tabelaRug, 'Rug', geneRug[i]);
1368: end;
1369: if (CheckBox4.Checked) then
1370: begin
1371: DecCromossomo(tabelaDem, 'Dem', geneDem[i]);

```

```

1372: end;
1373: if (CheckBox5.Checked) then
1374: begin
1375: DecCromossomo(tabelaPer, 'Per', genePer[i]);
1376: end;
1377: if (CheckBox6.Checked) then
1378: begin
1379: DecCromossomo(tabelaTop, 'Top', geneTop[i]);
1380: end;
1381: if (CheckBox7.Checked) then
1382: begin
1383: DecCromossomo(tabelaDia, 'Dia', geneDia[i]);
1384: end;
1385: if (CheckBox11.Checked) then
1386: begin
1387: DecCromossomo(tabelaVal, 'Val', geneVal[i]);
1388: end;
1389: if (CheckBox13.Checked) then
1390: begin
1391: DecCromossomo(tabelaVaz, 'Vaz', geneVaz[i]);
1392: end;
1393:
1394: lista_funcaoobjetivo.Add( FloatToStr (
FuncaoObjetivo(tempo_simulados) ) );
1395: lista.Add( IntToStr(i) );
1396: end;
1397:
1398: tmp.Clear;
1399: tmp.AddStrings(lista);
1400: lista.Clear;
1401: lista.AddStrings(ordenaTOPcrescente(lista_funcaoobjetivo, tmp));
1402:
1403: Label56.Caption := IntToStr(geracoes);
1404: Label57.Caption := lista_funcaoobjetivo[StrToInt(lista[0])];
1405: memo2.Lines.Add(IntToStr(geracoes)+'
'+lista_funcaoobjetivo[StrToInt(lista[0])]);
1406:
1407: i := StrToInt(Edit20.Text);
1408:
1409: if (ComboBox5.ItemIndex = 0) then
1410: begin
1411: lista_selec.Clear;
1412: lista_selec.AddStrings( selecionaUNIF(lista_funcaoobjetivo, lista,
i));
1413: end
1414: else if (ComboBox5.ItemIndex = 1) then
1415: begin
1416: lista_selec.Clear;
1417: lista_selec.AddStrings( selecionaROUL(lista_funcaoobjetivo, lista,
i));
1418: end
1419: else
1420: begin
1421: lista_selec.Clear;
1422: lista_selec.AddStrings(selecionaTOUR(lista_funcaoobjetivo, lista,
i));
1423: end;
1424:
1425: // reprodução
1426: if (CheckBox3.Checked) then

```

```

1427: begin
1428: geneRugNova.Clear;
1429: end;
1430: if (CheckBox4.Checked) then
1431: begin
1432: geneDemNova.Clear;
1433: end;
1434: if (CheckBox5.Checked) then
1435: begin
1436: genePerNova.Clear;
1437: end;
1438: if (CheckBox6.Checked) then
1439: begin
1440: geneTopNova.Clear;
1441: end;
1442: if (CheckBox7.Checked) then
1443: begin
1444: geneDiaNova.Clear;
1445: end;
1446: if (CheckBox11.Checked) then
1447: begin
1448: geneValNova.Clear;
1449: end;
1450: if (CheckBox13.Checked) then
1451: begin
1452: geneVazNova.Clear;
1453: end;
1454:
1455: tmp.Clear;
1456: tmp.AddStrings(lista_selec);
1457:
1458: filhos := 0;
1459: //
1460: // Elitismo
1461: //
1462:
1463: for i:= 1 to StrToInt(Edit19.Text) do
1464: begin
1465:
1466: if (CheckBox3.Checked) then
1467: begin
1468: geneRugNova.Add(geneRug[StrToInt(lista[i-1])]);
1469: end;
1470: if (CheckBox4.Checked) then
1471: begin
1472: geneDemNova.Add(geneDem[StrToInt(lista[i-1])]);
1473: end;
1474: if (CheckBox5.Checked) then
1475: begin
1476: genePerNova.Add(genePer[StrToInt(lista[i-1])]);
1477: end;
1478: if (CheckBox6.Checked) then
1479: begin
1480: geneTopNova.Add(geneTop[StrToInt(lista[i-1])]);
1481: end;
1482: if (CheckBox7.Checked) then
1483: begin
1484: geneDiaNova.Add(geneDia[StrToInt(lista[i-1])]);
1485: end;
1486: if (CheckBox11.Checked) then

```

```

1487: begin
1488: geneValNova.Add(geneVal [StrToInt (lista [i-1])]);
1489: end;
1490: if (CheckBox13.Checked) then
1491: begin
1492: geneVazNova.Add(geneVaz [StrToInt (lista [i-1])]);
1493: end;
1494: filhos := filhos + 1;
1495: end;
1496:
1497: reproducao := 0;
1498:
1499: while (filhos < StrToInt (Edit18.Text)) do
1500: begin
1501: Application.ProcessMessages;
1502:
1503: i := random(tmp.Count-1);
1504: i1 := StrToInt (tmp [i]);
1505: pai1 := tmp [i];
1506: tmp.Delete (i);
1507: i := random(tmp.Count-1);
1508: i2 := StrToInt (tmp [i]);
1509: tmp.Add (pai1);
1510:
1511: Fator := Random;
1512:
1513: if (Fator > StrToFloat (Edit17.Text)) then
1514: begin
1515: if (CheckBox3.Checked) then
1516: begin
1517: geneRugNova.Add (geneRug [i1]);
1518: if (geneRugNova.Count < StrToInt (Edit18.Text)) then
1519: geneRugNova.Add (geneRug [i2]);
1520: end;
1521: if (CheckBox4.Checked) then
1522: begin
1523: geneDemNova.Add (geneDem [i1]);
1524: if (geneDemNova.Count < StrToInt (Edit18.Text)) then
1525: geneDemNova.Add (geneDem [i2]);
1526: end;
1527: if (CheckBox5.Checked) then
1528: begin
1529: genePerNova.Add (genePer [i1]);
1530: if (genePerNova.Count < StrToInt (Edit18.Text)) then
1531: genePerNova.Add (genePer [i2]);
1532: end;
1533: if (CheckBox6.Checked) then
1534: begin
1535: geneTopNova.Add (geneTop [i1]);
1536: if (geneTopNova.Count < StrToInt (Edit18.Text)) then
1537: geneTopNova.Add (geneTop [i2]);
1538: end;
1539: if (CheckBox7.Checked) then
1540: begin
1541: geneDiaNova.Add (geneDia [i1]);
1542: if (geneDiaNova.Count < StrToInt (Edit18.Text)) then
1543: geneDiaNova.Add (geneDia [i2]);
1544: end;
1545: if (CheckBox11.Checked) then
1546: begin

```

```

1547: geneValNova.Add(geneVal[i1]);
1548: if (geneValNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1549: geneValNova.Add(geneVal[i2]);
1550: end;
1551: if (CheckBox13.Checked) then
1552: begin
1553: geneVazNova.Add(geneVaz[i1]);
1554: if (geneVazNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1555: geneVazNova.Add(geneVaz[i2]);
1556: end;
1557: end
1558: else
1559: begin
1560: reproducao := reproducao + 1;
1561: if (ComboBox6.ItemIndex = 1) then
1562: begin
1563: if (CheckBox3.Checked) then
1564: begin
1565: geneRugNova.Add(reproducaoSING(geneRug[i1], geneRug[i2]));
1566: if (geneRugNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1567: geneRugNova.Add(reproducaoSING(geneRug[i2], geneRug[i1]));
1568: end;
1569: if (CheckBox4.Checked) then
1570: begin
1571: geneDemNova.Add(reproducaoSING(geneDem[i1], geneDem[i2]));
1572: if (geneDemNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1573: geneDemNova.Add(reproducaoSING(geneDem[i2], geneDem[i1]));
1574: end;
1575: if (CheckBox5.Checked) then
1576: begin
1577: genePerNova.Add(reproducaoSING(genePer[i1], genePer[i2]));
1578: if (genePerNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1579: genePerNova.Add(reproducaoSING(genePer[i2], genePer[i1]));
1580: end;
1581: if (CheckBox6.Checked) then
1582: begin
1583: geneTopNova.Add(reproducaoSING(geneTop[i1], geneTop[i2]));
1584: if (geneTopNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1585: geneTopNova.Add(reproducaoSING(geneTop[i2], geneTop[i1]));
1586: end;
1587: if (CheckBox7.Checked) then
1588: begin
1589: geneDiaNova.Add(reproducaoSING(geneDia[i1], geneDia[i2]));
1590: if (geneDiaNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1591: geneDiaNova.Add(reproducaoSING(geneDia[i2], geneDia[i1]));
1592: end;
1593: if (CheckBox11.Checked) then
1594: begin
1595: geneValNova.Add(reproducaoSING(geneVal[i1], geneVal[i2]));
1596: if (geneValNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1597: geneValNova.Add(reproducaoSING(geneVal[i2], geneVal[i1]));
1598: end;
1599: if (CheckBox13.Checked) then
1600: begin
1601: geneVazNova.Add(reproducaoSING(geneVaz[i1], geneVaz[i2]));
1602: if (geneVazNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1603: geneVazNova.Add(reproducaoSING(geneVaz[i2], geneVaz[i1]));
1604: end;
1605: end
1606: else

```

```

1607: begin
1608: if (CheckBox3.Checked) then
1609: begin
1610: geneRugNova.Add(reproducaoALEA(geneRug[i1], geneRug[i2]));
1611: if (geneRugNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1612: geneRugNova.Add(reproducaoALEA(geneRug[i1], geneRug[i2]));
1613: end;
1614: if (CheckBox4.Checked) then
1615: begin
1616: geneDemNova.Add(reproducaoALEA(geneDem[i1], geneDem[i2]));
1617: if (geneDemNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1618: geneDemNova.Add(reproducaoALEA(geneDem[i1], geneDem[i2]));
1619: end;
1620: if (CheckBox5.Checked) then
1621: begin
1622: genePerNova.Add(reproducaoALEA(genePer[i1], genePer[i2]));
1623: if (genePerNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1624: genePerNova.Add(reproducaoALEA(genePer[i1], genePer[i2]));
1625: end;
1626: if (CheckBox6.Checked) then
1627: begin
1628: geneTopNova.Add(reproducaoALEA(geneTop[i1], geneTop[i2]));
1629: if (geneTopNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1630: geneTopNova.Add(reproducaoALEA(geneTop[i1], geneTop[i2]));
1631: end;
1632: if (CheckBox7.Checked) then
1633: begin
1634: geneDiaNova.Add(reproducaoALEA(geneDia[i1], geneDia[i2]));
1635: if (geneDiaNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1636: geneDiaNova.Add(reproducaoALEA(geneDia[i1], geneDia[i2]));
1637: end;
1638: if (CheckBox11.Checked) then
1639: begin
1640: geneValNova.Add(reproducaoALEA(geneVal[i1], geneVal[i2]));
1641: if (geneValNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1642: geneValNova.Add(reproducaoALEA(geneVal[i1], geneVal[i2]));
1643: end;
1644: if (CheckBox13.Checked) then
1645: begin
1646: geneVazNova.Add(reproducaoALEA(geneVaz[i1], geneVaz[i2]));
1647: if (geneVazNova.Count < StrToInt(Edit18.Text)) then
1648: geneVazNova.Add(reproducaoALEA(geneVaz[i1], geneVaz[i2]));
1649: end;
1650: end;
1651: end;
1652: filhos := filhos + 2;
1653: end;
1654:
1655: if (CheckBox3.Checked) then
1656: begin
1657: geneRug.Clear;
1658: geneRug.AddStrings( geneRugNova );
1659: end;
1660: if (CheckBox4.Checked) then
1661: begin
1662: geneDem.Clear;
1663: geneDem.AddStrings( geneDemNova );
1664: end;
1665: if (CheckBox5.Checked) then
1666: begin

```

```

1667: genePer.Clear;
1668: genePer.AddStrings( genePerNova );
1669: end;
1670: if (CheckBox6.Checked) then
1671: begin
1672: geneTop.Clear;
1673: geneTop.AddStrings( geneTopNova );
1674: end;
1675: if (CheckBox7.Checked) then
1676: begin
1677: geneDia.Clear;
1678: geneDia.AddStrings( geneDiaNova );
1679: end;
1680: if (CheckBox11.Checked) then
1681: begin
1682: geneVal.Clear;
1683: geneVal.AddStrings( geneValNova );
1684: end;
1685: if (CheckBox13.Checked) then
1686: begin
1687: geneVaz.Clear;
1688: geneVaz.AddStrings( geneVazNova );
1689: end;
1690:
1691: if (Checkbox8.Checked) then
1692: begin
1693: if (geracoes < StrToInt(Edit22.text)) then
1694: begin
1695: ProgressBar1.StepIt;
1696: lista.Clear;
1697: //lista_aptidao.Clear;
1698: lista_funcaoobjetivo.Clear;
1699: end
1700: else
1701: begin
1702: continua := false;
1703: end;
1704: end
1705: else if (Checkbox9.Checked) then
1706: begin
1707: if (StrToInt(Label59.Caption) < StrToInt(Edit23.text)) then
1708: begin
1709: ProgressBar1.StepIt;
1710: lista.Clear;
1711: //lista_aptidao.Clear;
1712: lista_funcaoobjetivo.Clear;
1713: end
1714: else
1715: begin
1716: continua := false;
1717: end;
1718: end
1719: else if (Checkbox10.Checked) then
1720: begin
1721: if (StrToInt(Label60.Caption) > StrToInt(Edit24.text)) then
1722: begin
1723: ProgressBar1.StepIt;
1724: lista.Clear;
1725: //lista_aptidao.Clear;
1726: lista_funcaoobjetivo.Clear;

```

```

1727: end
1728: else
1729: begin
1730: continua := false;
1731: end;
1732: end
1733: else
1734: begin
1735: MessageDlg('Escolha um ou mais critérios de parada', mtwarning,
[mbOk], 0);
1736: continua := false;
1737: end;
1738: geracoes := geracoes + 1;
1739: Label59.Caption := IntToStr(trunc(24*3600*(now() -
tempo_corrente)));
1740:
1741: end;
1742: //////////////////////////////////////
1743: //Mostra indice -> valor da lista
1744: lista := ordenaTOPpdecrescente(lista_aptidao, lista);
1745:
1746: // atribuindo a rede o melhor resultado
1747: if (CheckBox3.Checked) then
1748: begin
1749: DecCromossomo(tabelaRug, 'Rug', geneRug[StrToInt(lista[0])]);
1750: end;
1751: if (CheckBox4.Checked) then
1752: begin
1753: DecCromossomo(tabelaDem, 'Dem', geneDem[StrToInt(lista[0])]);
1754: end;
1755: if (CheckBox5.Checked) then
1756: begin
1757: DecCromossomo(tabelaPer, 'Per', genePer[StrToInt(lista[0])]);
1758: end;
1759: if (CheckBox6.Checked) then
1760: begin
1761: DecCromossomo(tabelaTop, 'Top', geneTop[StrToInt(lista[0])]);
1762: end;
1763: if (CheckBox7.Checked) then
1764: begin
1765: DecCromossomo(tabelaDia, 'Dia', geneDia[StrToInt(lista[0])]);
1766: end;
1767: if (CheckBox11.Checked) then
1768: begin
1769: DecCromossomo(tabelaVal, 'Val', geneVal[StrToInt(lista[0])]);
1770: end;
1771: if (CheckBox13.Checked) then
1772: begin
1773: DecCromossomo(tabelaVaz, 'Vaz', geneVaz[StrToInt(lista[0])]);
1774: end;
1775:
1776: ENSolveH();
1777:
1778: for i:=0 to lista.Count-1 do
1779: begin
1780: Memol.Lines.add(lista[i] + ' -> ' +
lista_funcaoobjetivo[StrToInt(lista[i])]);
1781: end;
1782:
1783:

```

```

1784:
1785: end;
1786:
1787: MessageDlg('Calibração concluída!', mtInformation, [mbOk], 0);
1788: if ( length(ParamStr(1)) > 0 ) then
1789: begin
1790: salvararquivoinp(ParamStr(1));
1791:
memo2.Lines.SaveToFile('.\grafico_geracoes_x_aptidao_pop_'+Edit18.Text+'_
Pop_Inter_'+Edit
1792:
'_Crossover_'+Edit17.text+'_Reproducao_'+Combobox6.SelText+'_Mutacao_'+Ed
it21.text+'.txt'
1793: end;

1937: //////////////////////////////////////
1938: //
1939: // Funções do Algoritmo Genético
1940: // Autor: Moisés Menezes Salvino
1941: // Data: 31/10/2011
1942: //
1943: //////////////////////////////////////
1944: function TPrincipal.CodificaTabela(Vmin: Extended; Vmax: Extended;
n_valores: Integer):TString
1945: var TabelaCod: TStringList;
1946: i: integer;
1947: begin
1948: TabelaCod := TStringList.Create();
1949: for i:=0 to n_valores-1 do
1950: begin
1951: if (n_valores <> 1) then
1952: begin
1953: TabelaCod.Add(FloatToStr((Vmin + (Vmax - Vmin)*i/(n_valores-1))));
1954: end;
1955: end;
1956: TabelaCod.Sort;
1957: Result := TabelaCod;
1958: end;
1959: //
1960: // Função que retorna o cromossomo para uma variável específica
1961: //
1962: function TPrincipal.Cromossomo(TabelaCod: TStringList; Variavel:
String):String;
1963: var i, j, trechos, nos, algarismos, tipo_trecho: integer;
1964: rugosidade, perda, demanda, topografia, diametro, valvula, emissor:
single;
1965: resposta: String;
1966: begin
1967: algarismos := Ceil(ln(TabelaCod.Count)/ln(2));
1968: if ((Variavel = 'Rug') or (Variavel = 'Per') or (Variavel = 'Dia')
or (Variavel = 'Val')) t
1969: begin
1970: ENgetcount(EN_LINKCOUNT, trechos);
1971: Resposta := '';
1972: for i := 1 to trechos do
1973: begin
1974: // para a rugosidade
1975: ENgetlinktype(i, tipo_trecho);
1976: if ((tipo_trecho = EN_PIPE) and (Variavel = 'Rug')) then
1977: begin

```

```

1978: ENgetlinkvalue( i, EN_ROUGHNESS, rugosidade );
1979: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
1980: begin
1981: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(rugosidade)) = 0) then
1982: begin
1983: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
1984: end;
1985: end;
1986: end
1987: // para a perda de carga localizada
1988: else if ((tipo_trecho = EN_PIPE) and (Variavel = 'Per')) then
1989: begin
1990: ENgetlinkvalue( i, EN_MINORLOSS, perda );
1991: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
1992: begin
1993: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(perda)) = 0) then
1994: begin
1995: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
1996: end;
1997: end;
1998: end
1999: // para o diametro interno
2000: else if ((tipo_trecho = EN_PIPE) and (Variavel = 'Dia')) then
2001: begin
2002: ENgetlinkvalue( i, EN_DIAMETER, diametro );
2003: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
2004: begin
2005: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(diametro)) = 0) then
2006: begin
2007: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
2008: end;
2009: end;
2010: end
2011: // para valvulas
2012: else if ((tipo_trecho = EN_PRV) and (Variavel = 'Val')) then
2013: begin
2014: ENgetlinkvalue( i, EN_INITSETTING, valvula );
2015: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
2016: begin
2017: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(valvula)) = 0) then
2018: begin
2019: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
2020: end;
2021: end;
2022: end;
2023: end;
2024: end
2025: else
2026: begin
2027: ENgetcount(EN_NODECOUNT, nos);
2028: Resposta := '';
2029: for i := 1 to nos do
2030: begin
2031: // para a demanda
2032: if (Variavel = 'Dem') then
2033: begin
2034: ENgetnodevalue( i, EN_BASEDEMAND, demanda );
2035: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
2036: begin
2037: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(demanda)) = 0) then

```

```

2038: begin
2039: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
2040: end;
2041: end;
2042: end
2043: // para a topografia
2044: else if (Variavel = 'Top') then
2045: begin
2046: ENgetnodevalue( i, EN_ELEVATION, topografia );
2047: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
2048: begin
2049: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(topografia)) = 0) then
2050: begin
2051: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
2052: end;
2053: end;
2054: end
2055: // para a vazamento
2056: else if (Variavel = 'Vaz') then
2057: begin
2058: ENgetnodevalue( i, EN_EMITTER, emissor );
2059: for j:=0 to TabelaCod.Count-1 do
2060: begin
2061: if (CompareText(TabelaCod[j], FloatToStr(emissor)) = 0) then
2062: begin
2063: resposta := resposta + IntToBin(j, algarismos);
2064: end;
2065: end;
2066: end;
2067: end;
2068: end;
2069: Result := resposta;
2070: end;
2071:
2072: //
2073: // Função que decodifica o cromossomo para uma rede
2074: //
2075: procedure TPrincipal.DecCromossomo(TabelaCod: TStringList;
Variavel: String; Cromossomo: Strin
2076: var i, j, trechos, nos, algarismos, tipo_trecho: integer;
2077: rugosidade, perda, demanda, topografia, valvula, emissor: single;
2078: gene: String;
2079: begin
2080: algarismos := Ceil(ln(TabelaCod.Count)/ln(2));
2081: if ((Variavel = 'Rug') or (Variavel = 'Per') or (Variavel = 'Dia')
or (Variavel = 'Val')) t
2082: begin
2083: ENgetcount(EN_LINKCOUNT, trechos);
2084: for i := 1 to trechos do
2085: begin
2086: // rugosidade
2087: gene := copy( Cromossomo, (i-1)*algarismos+1, algarismos);
2088: ENgetlinktype(i, tipo_trecho);
2089: if ((tipo_trecho = EN_PIPE) and (Variavel = 'Rug')) then
2090: begin
2091: if (BinToInt(gene) >= TabelaCod.Count) then
2092: ENsetlinkvalue( i, EN_ROUGHNESS,
StrToFloat(TabelaCod[TabelaCod.Count-1]) )
2093: else

```

```

2094: ENsetlinkvalue( i, EN_ROUGHNESS,
StrToFloat (TabelaCod[BinToInt (gene)] ) );
2095: end
2096: // perda de carga localizada
2097: else if ((tipo_trecho = EN_PIPE) and (Variavel = 'Per')) then
2098: begin
2099: if (BinToInt (gene) >= TabelaCod.Count) then
2100: ENsetlinkvalue( i, EN_MINORLOSS,
StrToFloat (TabelaCod[TabelaCod.Count-1] ) )
2101: else
2102: ENsetlinkvalue( i, EN_MINORLOSS,
StrToFloat (TabelaCod[BinToInt (gene)] ) );
2103: end
2104: // diametro interno
2105: else if ((tipo_trecho = EN_PIPE) and (Variavel = 'Dia')) then
2106: begin
2107: if (BinToInt (gene) >= TabelaCod.Count) then
2108: ENsetlinkvalue( i, EN_DIAMETER,
StrToFloat (TabelaCod[TabelaCod.Count-1] ) )
2109: else
2110: ENsetlinkvalue( i, EN_DIAMETER,
StrToFloat (TabelaCod[BinToInt (gene)] ) );
2111: end
2112: //valvulas de controle
2113: else if ((tipo_trecho = EN_PRV) and (Variavel = 'Val')) then
2114: begin
2115: if (BinToInt (gene) >= TabelaCod.Count) then
2116: ENsetlinkvalue( i, EN_INITSETTING,
StrToFloat (TabelaCod[TabelaCod.Count-1] ) )
2117: else
2118: ENsetlinkvalue( i, EN_INITSETTING,
StrToFloat (TabelaCod[BinToInt (gene)] ) );
2119: end;
2120: end;
2121: end
2122: else
2123: begin
2124: ENgetcount (EN_NODECOUNT, nos);
2125: for i := 1 to nos do
2126: begin
2127: // para a demanda
2128: gene := copy( Cromossomo, (i-1)*algarismos+1, algarismos);
2129: ENgetlinktype(i, tipo_trecho);
2130: if (Variavel = 'Dem') then
2131: begin
2132: if (BinToInt (gene) >= TabelaCod.Count) then
2133: ENsetnodevalue( i, EN_BASEDEMAND,
StrToFloat (TabelaCod[TabelaCod.Count-1] ) )
2134: else
2135: ENsetnodevalue( i, EN_BASEDEMAND,
StrToFloat (TabelaCod[BinToInt (gene)] ) );
2136: end
2137: // topografia
2138: else if (Variavel = 'Top') then
2139: begin
2140: if (BinToInt (gene) >= TabelaCod.Count) then
2141: ENsetnodevalue( i, EN_ELEVATION,
StrToFloat (TabelaCod[TabelaCod.Count-1] ) )
2142: else

```

```

2143: ENsetnodevalue( i, EN_ELEVATION,
StrToFloat(TabelaCod[BinToInt(gene)]) );
2144: end
2145: // vazamento
2146: else if (Variavel = 'Vaz') then
2147: begin
2148: if (BinToInt(gene) >= TabelaCod.Count) then
2149: ENsetnodevalue( i, EN_EMITTER,
StrToFloat(TabelaCod[TabelaCod.Count-1]) )
2150: else
2151: ENsetnodevalue( i, EN_EMITTER,
StrToFloat(TabelaCod[BinToInt(gene)]) );
2152: end;
2153: end;
2154: end;
2155: end;
2156:
2157: //
2158: // Função que cria um individuo aleatório
2159: //
2160: function TPrincipal.IndividuoAleatorio(TabelaCod:
TStringList):String;
2161: var i, j, trechos, Algarismos, tipo_trecho: integer;
2162: rugosidade, perda: single;
2163: resposta: String;
2164: begin
2165: Algarismos := Ceil(ln(TabelaCod.Count)/ln(2));
2166: Resposta := '';
2167: Randomize;
2168: ENgetcount(EN_LINKCOUNT, trechos);
2169: for i := 1 to trechos*Algarismos do
2170: begin
2171: resposta := resposta + IntToStr(Random(2));
2172: end;
2173: Result := resposta;
2174: end;
2175:
2176: //
2177: // Função de aptidão da rede
2178: //
2179: function TPrincipal.FuncaoObjetivo(tempo: TStringList):Single;
2180: var resposta, pmin, padrao : Single;
2181: i, j, tempo_atual, trun, passotempo: integer;
2182: tmp: String;
2183: begin
2184:
2185: resposta := 0;
2186: if (ComboBox8.ItemIndex < 0) then
2187: begin
2188: MessageDlg('Escolha a função objetivo', mtInformation, [mbOk], 0);
2189: resposta := 999999;
2190: end
2191: else if (tempo.count < 1) then
2192: begin
2193: MessageDlg('Tempo inválido na tabela de leituras reais de pressão e
vazão', mtInformation
2194: resposta := 999999;
2195: end
2196: else if (ComboBox8.ItemIndex = 0) then
2197: begin

```

```

2198: ENopenH();
2199: ENinitH(0);
2200: for j := 0 to 23 do
2201: begin
2202: ENrunH( trun );
2203: ENnextH( passotempo );
2204: for i := 0 to tempos.Count-1 do
2205: begin
2206: tmp := tempos[i];
2207: tempo_atual := 3600*StrToInt(tmp);
2208:
2209: if (trun = tempo_atual) then
2210: begin
2211: resposta := resposta + SomaDiferencaPressao(StrToInt(tempos[i])) +
SomaDiferen
2212: if (Checkbox12.Checked) then
2213: begin
2214: pmin := PressaoMinimaDaRede();
2215: if (pmin < StrToFloat(Edit39.Text)) then
2216: begin
2217: resposta := resposta + abs(StrToFloat(Edit39.Text)-pmin);
2218: end;
2219: end;
2220: break;
2221: end;
2222: end;
2223: end;
2224: ENcloseH();
2225: end
2226: else if (ComboBox8.ItemIndex = 1) then
2227: begin
2228: ENopenH();
2229: ENinitH(0);
2230:
2231: for j := 0 to 23 do
2232: begin
2233: ENrunH( trun );
2234: ENnextH( passotempo );
2235: for i := 0 to tempos.Count-1 do
2236: begin
2237: tmp := tempos[i];
2238: tempo_atual := 3600*StrToInt(tmp);
2239:
2240: if (trun = tempo_atual) then
2241: begin
2242: resposta := resposta + SomaDiferencaPressao2(StrToInt(tempos[i])) +
SomaDifere
2243: if (Checkbox12.Checked) then
2244: begin
2245: pmin := PressaoMinimaDaRede();
2246: if (pmin < StrToFloat(Edit39.Text)) then
2247: begin
2248: resposta := resposta + abs(StrToFloat(Edit39.Text)-pmin);
2249: end;
2250: end;
2251: break;
2252: end;
2253: end;
2254: end;
2255: ENcloseH();

```

```

2256: end
2257: else
2258: begin
2259: ENopenH();
2260: ENinitH(0);
2261:
2262: for j := 0 to 23 do
2263: begin
2264: ENrunH( trun );
2265: ENnextH( passotempo );
2266: for i := 0 to tempos.Count-1 do
2267: begin
2268: tmp := tempos[i];
2269: tempo_atual := 3600*StrToInt(tmp);
2270:
2271: if (trun = tempo_atual) then
2272: begin
2273: resposta := resposta + MaiorDiferencaPressao(StrToInt(tempos[i])) +
MaiorDifer
2274: if (Checkbox12.Checked) then
2275: begin
2276: pmin := PressaoMinimaDaRede();
2277: if (pmin < StrToFloat(Edit39.Text)) then
2278: begin
2279: resposta := resposta + abs(StrToFloat(Edit39.Text)-pmin);
2280: end;
2281: end;
2282: break;
2283: end;
2284: end;
2285: end;
2286: ENcloseH();
2287: end;
2288: Result := abs(resposta);
2289: end;
2290:
2291: function TPrincipal.AptidaoReal(valores: TStringList): TStringList;
2292: var maior: single;
2293: i: integer;
2294: apt: TStringList;
2295: begin
2296: apt := TStringList.Create;
2297:
2298: apt.AddStrings(valores);
2299:
2300: for i:= 0 to valores.count-1 do
2301: begin
2302: apt[i] := FloatToStr( 100/StrToFloat(apt[i]) );
2303: end;
2304:
2305: result := apt;
2306: end;
2307:
2308: function TPrincipal.zerosaesquerda(valor: TStringlist):
TStringList;
2309: var i, j, tam: Integer;
2310: begin
2311: tam := 0;
2312: for i:= 0 to valor.Count-1 do
2313: begin

```

```

2314: if length(valor[i])>tam then
2315: tam := length(valor[i]);
2316: end;
2317: for i:= 0 to valor.Count-1 do
2318: begin
2319: for j := 1 to (tam - length(valor[i])) do
2320: valor[i] := '0'+valor[i];
2321: end;
2322: Result := valor;
2323: end;
2324:
2325: function TPrincipal.ordenaTOPdecescente(valor: TStringlist;
indice: TStringlist):TStringlist;
2326: var i, j, tam: Integer;
2327: altera: boolean;
2328: aux1, aux2: String;
2329: begin
2330: altera := true;
2331: tam := valor.Count-2;
2332: while (altera) do
2333: begin
2334: altera := false;
2335: for i:= 0 to tam do
2336: begin
2337: if StrToFloat(valor[StrToInt(indice[i])]) <
StrToFloat(valor[StrToInt(indice[i+1])])
2338: begin
2339: aux2 := indice[i];
2340: indice[i] := indice[i+1];
2341: indice[i+1] := aux2;
2342: altera := true;
2343: end;
2344: end;
2345: tam := tam - 1;
2346: end;
2347: Result := indice;
2348: end;
2349:
2350: function TPrincipal.ordenaTOPcrescente(valor: TStringlist; indice:
TStringlist):TStringlist;
2351: var i, j, tam: Integer;
2352: altera: boolean;
2353: aux1, aux2: String;
2354: begin
2355: altera := true;
2356: tam := valor.Count-2;
2357: while (altera) do
2358: begin
2359: altera := false;
2360: for i:= 0 to tam do
2361: begin
2362: if StrToFloat(valor[StrToInt(indice[i])]) >
StrToFloat(valor[StrToInt(indice[i+1])])
2363: begin
2364: aux2 := indice[i];
2365: indice[i] := indice[i+1];
2366: indice[i+1] := aux2;
2367: altera := true;
2368: end;
2369: end;

```

```

2370: tam := tam - 1;
2371: end;
2372: Result := indice;
2373: end;
2374: //////////////////////////////////////
2375: // Seleção das especies
2376: //////////////////////////////////////
2377:
2378: function TPrincipal.selecionaUNIF(valor: TStringlist; indice:
TStringlist; Qt: Integer):TStrin
2379: var i: integer;
2380: novos: TStringList;
2381: begin
2382: novos := TStringList.Create();
2383: for i:=0 to Qt-1 do
2384: novos.Add(indice[Qt-i-1]);
2385: Result := novos;
2386: end;
2387:
2388: function TPrincipal.selecionaROUL(valor: TStringlist; indice:
TStringlist; Qt: Integer):TStrin
2389: var i, j, tam: Integer;
2390: altera: boolean;
2391: soma, sorteio, pos, maior: extended;
2392: aux1, aux2: String;
2393: resultado, temp: TStringList;
2394: begin
2395: resultado := TStringList.Create();
2396: temp := TStringList.Create();
2397: randomize();
2398: soma := 0;
2399: maior := 0;
2400:
2401: for i:= 0 to valor.Count-1 do
2402: begin
2403: temp.add(indice[valor.Count-1-i]);
2404: soma := soma + 1000/StrToFloat(valor[StrToInt(indice[i])]);
2405: end;
2406:
2407: while (temp.Count>0) and (resultado.Count < Qt) do
2408: begin
2409: sorteio := random(trunc(soma));
2410: pos := 0;
2411: for i:= 0 to temp.Count-1 do
2412: begin
2413: pos := pos + 1000/StrToFloat(valor[StrToInt(temp[i])]);
2414: if (sorteio < pos) then
2415: begin
2416: soma := soma - 1000/StrToFloat(valor[StrToInt(temp[i])]);
2417: resultado.Add(temp[i]);
2418: temp.Delete(i);
2419: break;
2420: end;
2421: end;
2422: end;
2423:
2424: Result := resultado;
2425: end;
2426:

```

```

2427: function TPrincipal.selecionaTOUR(valor: TStringlist; indice:
TStringlist; Qt: Integer):TStrin
2428: var i, j, tam, sorteio, melhor: Integer;
2429: altera: boolean;
2430: soma, pos, maior: extended;
2431: aux1, aux2: String;
2432: resultado, duelo, temp: TStringList;
2433: begin
2434: resultado := TStringList.Create();
2435: duelo := TStringList.Create();
2436: temp := TStringList.Create();
2437:
2438: randomize();
2439:
2440: temp.AddStrings(indice);
2441:
2442: while (temp.Count >= 3) and (resultado.Count < Qt-1) do
2443: begin
2444: for i:=1 to 3 do
2445: begin
2446: sorteio := random(temp.Count-1);
2447: duelo.Add(IntToStr(sorteio));
2448: end;
2449:
2450: maior := StrToFloat(valor[StrToInt(temp[StrToInt(duelo[0])])]);
2451: melhor := 0;
2452:
2453: for i:=1 to duelo.Count-1 do
2454: begin
2455: if StrToFloat(valor[StrToInt(temp[StrToInt(duelo[i])])]) < maior
then
2456: begin
2457: maior := StrToFloat(valor[StrToInt(temp[StrToInt(duelo[i])])]);
2458: melhor := i;
2459: end;
2460: end;
2461:
2462: resultado.Add(temp[StrToInt(duelo[melhor])]);
2463: temp.Delete(StrToInt(duelo[melhor]));
2464:
2465: duelo.Clear;
2466: end;
2467:
2468: Result := resultado;
2469: end;
2470:
2471: //////////////////////////////////////
2472: // Reprodução
2473: //////////////////////////////////////
2474:
2475: function TPrincipal.reproducaoALEA(Pai: String; Mae:
String):String;
2476: var i, sorteio: Integer;
2477: filho: String;
2478: valor: Single;
2479: begin
2480: randomize();
2481: filho := '';
2482: if length(Pai) = length(Mae) then
2483: begin

```

```

2484: for i:=1 to length(Pai) do
2485: begin
2486: valor := Random;
2487: if valor > 0.5 then
2488: filho := filho + Pai[i]
2489: else
2490: filho := filho + Mae[i];
2491: end;
2492: end;
2493: mutacao(filho, StrToFloat(edit21.Text));
2494: Result := filho;
2495: end;
2496:
2497: function TPrincipal.reproducaoSING(Pai: String; Mae:
String):String;
2498: var i, sorteio: Integer;
2499: filho: String;
2500: valor: single;
2501: begin
2502: filho := '';
2503: randomize();
2504: valor := random;
2505: if length(Pai) = length(Mae) then
2506: begin
2507: for i:=1 to length(Pai) do
2508: begin
2509: if length(Pai)*valor > i then
2510: filho := filho + Pai[i]
2511: else
2512: filho := filho + Mae[i];
2513: end;
2514: end;
2515: mutacao(filho, StrToFloat(edit21.Text));
2516: Result := filho;
2517: end;
2518:
2519: function TPrincipal.mutacao( Indivíduo: String; Fator:
Single):String;
2520: var i: Integer;
2521: valor: single;
2522: begin
2523: randomize();
2524: for i:=1 to length(Indivíduo) do
2525: begin
2526: valor := Random;
2527: if (valor <= Fator) then
2528: begin
2529: if Indivíduo[i] = '1' then
2530: Indivíduo[i] := '0'
2531: else Indivíduo[i] := '1';
2532: end;
2533: end;
2534: Result := Indivíduo;
2535: end;

```

## APÊNCIDE II – MODELAGEM DA REDE DO SPDA LENHS (\*.INP)

[TITLE]

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern	
PT-02	0.8000	0.000000	1	;
N1	0.0000	0.000000	1	;
PT-04	0.0000	0.000000	1	;
N5	0.0000	0.000000	1	;
N7	0.0000	0.000000	1	;
N9	0.0000	0.000000	1	;
D3	0.0000	1.250000	1	;
PT-05	0.0000	0.000000	1	;
PT-06	0.0000	0.000000	1	;
N2	0.0000	0.000000	1	;
N4	0.0000	0.000000	1	;
PT-03	0.7700	0.000000	1	;
N3	0.7700	0.000000	1	;
N8	0.0000	0.000000	1	;
D6	0.0000	0.970000	1	;
D5	0.0000	1.030000	1	;
D4	0.0000	0.930000	1	;
N6	0.0000	0.000000	1	;
D1	4.9326	1.120000	1	;
D2	4.2600	0.000000	1	;
PT-10	-2.5000	0.000000	1	;
PT-01	0.8000	0.000000	1	;
PT-22	0.2000	0.000000	1	;
PT-23	0.3500	0.000000	1	;
PT-21	0.4000	0.000000	1	;
PT-20	0.4000	0.000000	1	;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
1	20.0000	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel
MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve

[PIPES]

;ID	Node1	Node2	Length
Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
T5	N1	PT-04	1.3400
50.0000	130	10.7632	Open ;
FT-01	PT-04	N5	4.1000
50.0000	130	4.5205	Open ;
T6	N5	N7	4.6800
50.0000	130	9.0411	Open ;

T7		N7		N9	3.2100	
50.0000		130		1.3777	Open	;
FT-09		PT-20		D3	3.8000	
50.0000		130		11.6243	Open	;
T9		N1		PT-05	5.0953	
50.0000		130		18.9863	Open	;
T10		PT-05		PT-06	0.5647	
50.0000		130		18.9863	Open	;
FT-04		PT-06		N2	2.4100	
50.0000		130		0.0431	Open	;
T14		N2		N4	9.1200	
50.0000		130		2.0665	Open	;
T11		N2		PT-03	12.5800	
50.0000		130		18.9863	Open	;
T12		PT-03		N3	4.2000	
50.0000		130		0.0431	Open	;
T15		N4		N3	11.5200	
50.0000		130		21.7847	Open	;
T17		N4		N8	4.4300	
50.0000		130		0.0431	Open	;
T16		N8		N7	10.0100	
50.0000		130		4.5205	Open	;
FT-07		PT-22		D6	4.1300	
50.0000		130		14.2505	Open	;
T19		N9		PT-23	8.9000	
50.0000		130		2.0665	Open	;
FT-10		PT-21		D4	3.7200	
50.0000		130		19.6751	Open	;
T20		N5		N6	2.3100	
50.0000		130		8.6967	Open	;
FT-02		N6		D1	8.0000	
50.0000		130		18.0391	Open	;
T1		1		PT-10	0.1000	
100.0000		130		18.9863	Open	;
T2		PT-10		PT-01	4.2500	
100.0000		130		18.9863	Open	;
T3		PT-01		PT-02	2.4000	
100.0000		130		18.9863	Open	;
T4		PT-02		N1	4.8000	
100.0000		130		18.9863	Open	;
FT-03		N6		D2	9.8000	
50.0000		130		3.8317	Open	;
T18		N8		PT-22	0.1500	
50.0000		130		4.5205	Open	;
FT-08		PT-23		D5	3.0000	
50.0000		130		14.5949	Open	;
T8		N9		PT-20	0.6000	
50.0000		130		18.9863	Open	;
T13		N3		PT-21	0.3500	
50.0000		130		0.0861	Open	;

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
-----	-------	-------	------------

[VALVES]

;ID	Type	Setting	Node1	Node2	Diameter
				MinorLoss	

[TAGS]

```

[DEMANDS]
;Junction          Demand          Pattern          Category

[STATUS]
;ID                Status/Setting

[PATTERNS]
;ID                Multipliers
;
1                  0.33          0.43          1.1
1.64
1                  1.3           0.76          1.43

[CURVES]
;ID                X-Value          Y-Value

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency  75.0000
Global Price      0
Demand Charge     0.0000

[EMITTERS]
;Junction          Coefficient

[QUALITY]
;Node              InitQual

[SOURCES]
;Node              Type              Quality          Pattern

[REACTIONS]
;Type              Pipe/Tank          Coefficient

[REACTIONS]
Order Bulk        1.00
Order Tank        1.00
Order Wall        1
Global Bulk       0.000000
Global Wall       0.000000
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank              Model

[TIMES]
Duration          24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep  0:05
Pattern Timestep  3:00
Pattern Start     0:00
Report Timestep   1:00
Report Start      0:00
Start ClockTime   0:00:00

```

Statistic	NONE
[REPORT]	
Status	No
Summary	No
Page	0
[OPTIONS]	
Units	LPS
Headloss	H-W
Specific Gravity	1.000000
Viscosity	1.000000
Trials	40
Accuracy	0.00100000
CHECKFREQ	10
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0.00000000
Unbalanced	Continue 10
Pattern	1
Demand Multiplier	1.0000
Emitter Exponent	0.5000
Quality	NONE mg/L
Diffusivity	1.000000
Tolerance	0.01000000

[COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
PT-02	8726.66	8370.12
N1	7300.51	9168.08
PT-04	6383.70	9168.08
N5	3972.84	9168.08
N7	933.79	9168.08
N9	-1423.22	9161.31
D3	-689.25	9556.07
PT-05	7303.44	6801.38
PT-06	7303.44	5969.46
N2	7303.44	4645.18
N4	3381.54	1911.74
PT-03	6335.70	10027.19
N3	3177.80	10027.19
N8	936.72	1911.74
D6	-2815.41	1470.31
D5	-2221.18	4186.78
D4	-217.78	9551.81
N6	3975.76	7276.76
D1	5469.82	8550.11
D2	5565.54	6603.53
PT-10	8726.64	5455.61
PT-01	8722.51	6820.07
PT-22	-178.55	1907.96
PT-23	-2047.66	2899.50
PT-21	2374.38	9806.09
PT-20	-2150.24	9749.10
1	8714.95	4964.95

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
FT-09	-2153.27	10383.72
FT-09	-693.17	10383.72
T14	7303.44	1911.74

T11	7659.98	4645.18
T11	7659.98	10027.19
T15	3381.54	3609.53
T15	3008.02	3609.53
T15	3008.02	6275.07
T15	3177.80	6275.07
FT-07	-2815.41	1911.74
T19	-1423.22	2896.46
FT-10	2379.84	9619.72
FT-10	1021.60	9619.72
FT-10	1021.60	10349.77
FT-10	-217.78	10349.77
FT-02	4824.66	7276.76
FT-02	4824.66	8770.82
FT-02	5469.82	8770.82
T1	8726.64	5420.56
T4	7867.74	9167.85
FT-03	3981.36	5395.44
FT-03	4870.32	5395.44
FT-03	4870.32	6945.44
FT-03	5554.14	6945.44
FT-08	-2685.90	2899.50
FT-08	-2685.90	4187.36
T8	-2150.24	9156.46
T13	2374.38	10022.63

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
----------	---------	---------------------

[BACKDROP]

DIMENSIONS	-3392.51	1042.47	9303.76
10455.03			
UNITS	None		
FILE			
OFFSET	0.00	0.00	

[END]

## APÊNCIDE III – DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS

```
[DADOS]
;Arquivo do LenhsCalibra
;
;Tipo ID      Medida      Horário      Valor
;
No      PT-01 Pressão      14      14.93
No      PT-03 Pressão      14      9.48
No      PT-04 Pressão      14      14.11
No      PT-05 Pressão      14      13.32
No      PT-06 Pressão      14      10.74
No      PT-20 Pressão      14      8.63
No      PT-21 Pressão      14      10.36
No      PT-22 Pressão      14      10.25
No      PT-23 Pressão      14      10.40
No      PT-01 Pressão      16      15.43
No      PT-03 Pressão      16      11.30
No      PT-04 Pressão      16      15.00
No      PT-05 Pressão      16      14.63
No      PT-06 Pressão      16      12.61
No      PT-20 Pressão      16      10.40
No      PT-21 Pressão      16      12.39
No      PT-22 Pressão      16      12.18
No      PT-23 Pressão      16      12.34
No      PT-01 Pressão      20      15.43
No      PT-03 Pressão      20      12.11
No      PT-04 Pressão      20      15.34
No      PT-05 Pressão      20      14.97
No      PT-06 Pressão      20      13.10
No      PT-20 Pressão      20      11.38
No      PT-21 Pressão      20      13.17
No      PT-22 Pressão      20      13.14
No      PT-23 Pressão      20      13.33
No      PT-01 Pressão      8      15.76
No      PT-03 Pressão      8      13.39
No      PT-04 Pressão      8      16.04
No      PT-05 Pressão      8      15.62
No      PT-06 Pressão      8      14.38
No      PT-20 Pressão      8      12.86
No      PT-21 Pressão      8      14.53
No      PT-22 Pressão      8      14.49
No      PT-23 Pressão      8      13.93
No      PT-01 Pressão      22      15.79
No      PT-03 Pressão      22      15.11
No      PT-04 Pressão      22      16.59
No      PT-05 Pressão      22      16.38
No      PT-06 Pressão      22      15.71
No      PT-20 Pressão      22      14.74
No      PT-21 Pressão      22      16.27
No      PT-22 Pressão      22      16.33
No      PT-23 Pressão      22      17.13
```

No	PT-01	Pressão	4	17.03
No	PT-03	Pressão	4	16.16
No	PT-04	Pressão	4	16.95
No	PT-05	Pressão	4	16.77
No	PT-06	Pressão	4	16.65
No	PT-20	Pressão	4	15.83
No	PT-21	Pressão	4	17.44
No	PT-22	Pressão	4	17.49
No	PT-23	Pressão	4	18.22
No	PT-01	Pressão	2	16.22
No	PT-03	Pressão	2	16.29
No	PT-04	Pressão	2	17.14
No	PT-05	Pressão	2	17.13
No	PT-06	Pressão	2	16.81
No	PT-20	Pressão	2	16.13
No	PT-21	Pressão	2	17.63
No	PT-22	Pressão	2	17.68
No	PT-23	Pressão	2	18.52

[FIM]

[DADOS]

;Arquivo do LenhsCalibra

;

;Tipo ID Medida Horário Valor

;

Trecho	FT-11	Vazão	14	9.31
Trecho	FT-01	Vazão	14	6.54
Trecho	FT-02	Vazão	14	2.11
Trecho	FT-03	Vazão	14	0.00
Trecho	FT-04	Vazão	14	3.03
Trecho	FT-07	Vazão	14	1.16
Trecho	FT-08	Vazão	14	1.63
Trecho	FT-09	Vazão	14	2.21
Trecho	FT-10	Vazão	14	1.99
Trecho	FT-11	Vazão	16	8.13
Trecho	FT-01	Vazão	16	5.68
Trecho	FT-02	Vazão	16	1.79
Trecho	FT-03	Vazão	16	0.00
Trecho	FT-04	Vazão	16	2.60
Trecho	FT-07	Vazão	16	1.28
Trecho	FT-08	Vazão	16	1.75
Trecho	FT-09	Vazão	16	1.73
Trecho	FT-10	Vazão	16	1.17
Trecho	FT-11	Vazão	20	7.41
Trecho	FT-01	Vazão	20	5.18
Trecho	FT-02	Vazão	20	1.48
Trecho	FT-03	Vazão	20	0.00
Trecho	FT-04	Vazão	20	2.38
Trecho	FT-07	Vazão	20	1.29
Trecho	FT-08	Vazão	20	1.67
Trecho	FT-09	Vazão	20	1.41
Trecho	FT-10	Vazão	20	1.28
Trecho	FT-11	Vazão	8	6.22
Trecho	FT-01	Vazão	8	4.40
Trecho	FT-02	Vazão	8	1.19
Trecho	FT-03	Vazão	8	0.00
Trecho	FT-04	Vazão	8	2.01
Trecho	FT-07	Vazão	8	1.55
Trecho	FT-08	Vazão	8	1.20
Trecho	FT-09	Vazão	8	1.05

Trecho	FT-10 Vazão 8	0.95
Trecho	FT-11 Vazão 22	4.31
Trecho	FT-01 Vazão 22	3.03
Trecho	FT-02 Vazão 22	0.83
Trecho	FT-03 Vazão 22	0.00
Trecho	FT-04 Vazão 22	1.40
Trecho	FT-07 Vazão 22	0.95
Trecho	FT-08 Vazão 22	0.70
Trecho	FT-09 Vazão 22	0.81
Trecho	FT-10 Vazão 22	0.79
Trecho	FT-11 Vazão 4	2.43
Trecho	FT-01 Vazão 4	1.73
Trecho	FT-02 Vazão 4	0.35
Trecho	FT-03 Vazão 4	0.00
Trecho	FT-04 Vazão 4	0.77
Trecho	FT-07 Vazão 4	0.29
Trecho	FT-08 Vazão 4	0.36
Trecho	FT-09 Vazão 4	0.75
Trecho	FT-10 Vazão 4	0.39
Trecho	FT-11 Vazão 2	1.86
Trecho	FT-01 Vazão 2	1.39
Trecho	FT-02 Vazão 2	0.39
Trecho	FT-03 Vazão 2	0.00
Trecho	FT-04 Vazão 2	0.59
Trecho	FT-07 Vazão 2	0.28
Trecho	FT-08 Vazão 2	0.29
Trecho	FT-09 Vazão 2	0.43
Trecho	FT-10 Vazão 2	0.23

[FIM]