



**UFSM**

**Dissertação de Mestrado**

**ESTUDO DA MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS FÍSICAS EM  
SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O  
MODELO EPANET**

---

**Lidiane Bittencourt Barroso**

**PPGEC**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005.**

**ESTUDO DA MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS FÍSICAS EM SISTEMA DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MODELO EPANET**

por

---

**Lidiane Bittencourt Barroso**

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2005.**

**Universidade Federal de Santa Maria**  
**Centro de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DA MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS FÍSICAS EM SISTEMA DE  
DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MODELO EPANET**

elaborada por

**Lidiane Bittencourt Barroso**

Como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini**  
(Presidente/Orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eloíza Maria Cauduro Dias de Paiva – UFSM

---

Prof. Dr. Luiz Fernando de Abreu Cybis – IPH UFRGS

Santa Maria, 24 de fevereiro de 2005.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Departamento de Hidráulica e Saneamento do Centro de Tecnologia da UFSM, pela infraestrutura e oportunidade de desenvolver este trabalho.

A Prof<sup>a</sup>. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, pela orientação desde a Iniciação Científica em 2001.

A Companhia Riograndese de Saneamento - CORSAN, pela disponibilidade do banco de dados, principalmente ao Eng. José Vilmar Viegas.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa durante o 1º do curso de mestrado.

Aos meus pais, José Engracio e Erodilde, pela vida e apoio incondicional.

A minha irmã, Daiane, pela amizade.

Ao meu esposo, José Valdenir, pelo amor e incentivo.

Aos meus colegas e amigos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, pela paciência e atenção em ouvir-me.

A Prof<sup>a</sup>. Luciane Ticks, pela revisão final do Abstract.

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

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE QUADROS	vi
LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO DA LITERATURA	3
3.1. Calibração de Redes de Distribuição	3
3.1.1. Técnicas de Calibração	5
3.1.2. Níveis Aceitáveis de Calibração	8
3.2. Coeficientes de Rugosidade	9
3.3. Relação Pressão versus Vazamento	12
3.4. Válvulas Redutoras de Pressão – características e importância	15
3.5. Modelos de Simulação Hidráulica	20
4. METODOLOGIA	23
4.1 Setor de Distribuição de Água em Estudo	24
4.1.1 Regras de Operação da VRP	26
4.1.2 Levantamentos e Ensaios de Campo	27
4.2 Aplicação do modelo EPANET	30
4.2.1 Componentes Físicos	30
4.2.2 Componentes Não Físicos	31
4.2.3 Procedimentos de Calibração da Vazão	32
4.2.3.1 Determinação dos parâmetros "N" e "C <sub>d</sub> "	35
4.2.4 Procedimentos de Calibração da Pressão	37
4.3 Minimização dos Vazamentos	39
4.3.1 Ajuste na VRP Existente	39
4.3.2 Substituição de Trechos	40

4.3.3	Setorização da Rede	41
4.3.4	Instalação de Nova VRP	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	Calibração da Vazão	45
5.2	Calibração da Pressão	52
5.3	Minimização dos Vazamentos	59
5.3.1	Ajuste na VRP Existente	59
5.3.2	Substituição de Trechos	60
5.3.3	Setorização da Rede	62
5.3.4	Instalação de Nova VRP	67
5.4	Resumo: Redes Simuladas	68
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	71
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
8.	APÊNDICE	80
A	Dados de Entrada do Setor de Distribuição em Estudo	80
B	Dados Observados e Cálculos "N" e "C <sub>d</sub> "	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema de funcionamento de uma VRP.	18
Figura 3.2 – Esquema da instalação padrão de uma VRP.	19
Figura 4.1 – Localização do setor em Santa Maria – RS.	24
Figura 4.2 – Setor de distribuição de água em estudo (s/ escala)	25
Figura 4.3 – Setor discretizado no modelo EPANET - material.	25
Figura 4.4 – Setor discretizado no modelo EPANET - diâmetro.	26
Figura 4.5 – VRP no setor do bairro Nossa Senhora de Lourdes.	27
Figura 4.6 – Regras de operação da VRP.	27
Figura 4.7 – EP11 e macromedidor na entrada do setor.	28
Figura 4.8 – Equipamentos de medição de vazão e pressão.	29
Figura 4.9 – Localização dos nós e trechos de teste.	29
Figura 4.10 – Procedimento de calibração das vazões.	34
Figura 4.11 – Distribuição dos nós representativos na rede.	36
Figura 4.12 – Curvas de nível do setor em estudo.	42
Figura 4.13 – Verificação de cavitação.	44
Figura 5.1 – Vazões simuladas e observadas trecho 202.	47
Figura 5.2 – Vazões simuladas e observadas trecho 77.	47
Figura 5.3 – Vazões simuladas e observadas trecho 21.	48
Figura 5.4 – Perfil de vazões no trecho 21, na entrada sub-setor 1.	50
Figura 5.5 – Perfil de vazões no trecho 77, na entrada sub-setor 2.	50
Figura 5.6 – Perfil de vazões no trecho 202.	51
Figura 5.7 – Perfil de vazões no trecho 84, entrada setor.	51
Figura 5.8 – Pressões simuladas e observadas nó 164 (7-8-9/agosto/2001).	53
Figura 5.9 – Pressões simuladas e observadas nó 20 (7-8-9/agosto/2001).	53
Figura 5.10 – Pressões simuladas e observadas nó 73 (7-8-9/agosto/2001).	54
Figura 5.11 – Pressões simuladas e observadas nó 72 (21/agosto/2001).	54
Figura 5.12 – Pressões simuladas e observadas nó 55 (21/agosto/2001).	55
Figura 5.13 – Pressões simuladas e observadas nó 29 (21/agosto/2001).	55

Figura 5.14 – Pressões simuladas e observadas nó 48 (22/agosto/2001).	56
Figura 5.15 – Pressões simuladas e observadas nó 154 (23/agosto/2001).	56
Figura 5.16 – Pressões simuladas e observadas nó 169 (29/agosto/2001).	57
Figura 5.17 – Pressões simuladas e observadas nó 136 (29/agosto/2001).	57
Figura 5.18 – Trechos super e subdimensionados do setor em estudo.	62
Figura 5.19 - Setorização proposta para o sub-setor 1.	63
Figura 5.20 – Setorização proposta para o sub-setor 2.	64
Figura 5.21 – Setorização proposta para o sub-setor 3.	64
Figura 5.22 - Trechos super e subdimensionados, após setorização.	65



## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Fórmulas para o cálculo da perda de carga contínua.	11
Quadro 4.1 – Localização dos nós e trechos de teste.	30
Quadro 4.2 – Parâmetros da relação pressão versus vazamento.	36
Quadro 4.3 – Coeficiente de rugosidade adotados.	37
Quadro 4.4 – Velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento.	40
Quadro 4.5 – Diâmetro nominal da VRP.	43
Quadro 5.1 – Estatística de calibração da vazão calculada pelo EPANET.	46
Quadro 5.2 – Valores médios da vazão (L/s) e relativas porcentagens.	49
Quadro 5.3 – Pressão de vazamento média dos sub-setores	49
Quadro 5.4 – Estatística de calibração de pressão calculada pelo EPANET.	52
Quadro 5.5 - Trechos super e subdimensionados do setor em estudo.	61
Quadro 5.6 – Extensão média dos 19 sub-setores.	65
Quadro 5.7 - Trechos super e subdimensionados, após setorização.	66
Quadro 5.8 - Regras de operação das válvulas.	67
Quadro 5.9 – Resumo das 5 redes simuladas.	69
Quadro 5.10 – Vazão de vazamento depois da instalação de novas VRP's.	70
Quadro 6.1 – Comparativo das intervenções simuladas.	72
Quadro 8.1 – Propriedades dos nós.	80
Quadro 8.2 – Propriedades dos trechos.	85
Quadro 8.3 – Padrões temporais	90
Quadro 8.4 – Regras de operação da VRP.	96
Quadro 8.5 – Dados de vazão e pressão observados.	97
Quadro 8.6 – Cálculo "N" – expoente do emissor.	98
Quadro 8.7 – N médio dos nós representativos, em cada dia.	98
Quadro 8.8 - Cálculo "Cd" – coeficiente de descarga (x 10 <sup>-5</sup> ).	99
Quadro 8.9 – Cd médio (x 10 <sup>-5</sup> ) dos nós representativos, em cada dia.	99

## LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a.....	coeficiente de perdas
A.....	termo de perda de carga
$\alpha_j$ .....	expoente de perdas no nó j
$A_o$ .....	área do orifício
B.....	expoente da vazão
C.....	coeficiente da fórmula de Hazen-Williams
$C_d$ .....	coeficiente de descarga
CORSAN.....	Companhia Riograndense de Saneamento
$C_v$ .....	coeficiente de perda de carga relativo a vazões
D, $D_{ij}$ .....	diâmetro da tubulação
$D_{Bj}$ .....	demanda base no nó j
$D_{CK}, \overline{D_{CK}}$ .....	demanda corrigida, média na iteração k
$D_{Mi}$ .....	demanda máxima-média no sub-setor i
$D_{SIMk}, \overline{D_{SIMk}}$ .....	demanda simulada, média na iteração k
$\Delta P$ .....	perda de carga da válvula totalmente aberta
$\Delta t$ .....	intervalo de tempo
$EC_i, EC_j$ .....	nº de economias controladas no sub-setor i e no nó j
EP.....	Estação Pitométrica
$\varepsilon$ .....	coeficiente de rugosidade absoluta
f.....	fator de resistência
$F_{CDK}$ .....	fator de correção da demanda na iteração k
FO.....	Função Objetivo
FoCo.....	tubulação de Fibro-Cimento
g.....	aceleração da gravidade
GIS.....	sistema de informação geográfica
$H_j$ .....	carga hidráulica no nó j
$h_L$ .....	perda de carga
$h_{obs,i}, H_{obs,i^*}$ .....	carga hidráulica observada
$h_{ref}, q_{ref}$ .....	valores de referência da carga de pressão de vazão
$h_{sim,i}, H_{sim,i^*}$ .....	carga hidráulica simulada
$\eta$ .....	coeficiente de Manning

$\Phi_{ij}$ .....	coeficiente de perda no trecho $L_{ij}$
$k_1, k_2$ .....	coeficiente do dia de maior consumo e da hora de maior demanda
$k_{VDj}$ .....	coeficiente de variabilidade da demanda nó $j$
$k_{VP}$ .....	coeficiente de variabilidade da pressão
$L, L_{ij}$ .....	comprimento da tubulação entre os nós $i$ e $j$
m.c.a.....	metros de coluna d'água
$N$ .....	expoente do emissor
NBR.....	Norma Brasileira
$\nu$ .....	viscosidade cinemática da água
$P$ .....	pressão
$P_{ij}$ .....	pressão média na tubulação
$P_{obsi}$ .....	pressão observada
$P_{simi}$ .....	pressão simulada
PVC.....	tubulação de Cloro Poli Vinil
$q, Q$ .....	vazão
$Q_0$ .....	vazão observada correspondente ao nível inicial de pressão $P_0$
$q_{ij}$ .....	vazão de vazamento na tubulação entre os nós $i$ e $j$
$q_j$ .....	vazão de vazamento no nó $j$
$Q_m$ .....	vazão observada correspondente ao nível inicial de pressão $P_m$
$Q_{obsj}, Q_{OBS}, \overline{Q_{OBS}}$ .....	vazão observada, média
$Q_{simj}, Q_{SIMk}$ .....	vazão simulada
$Q_{máx}$ .....	vazão máxima
$Q_{VAZij}$ .....	vazão de vazamento
$Re$ .....	número de Reynolds
RES.....	reservatório hipotético
SABESP.....	Saneamento Básico de São Paulo
SEDU/PR.....	Secretaria de Desenvolvimento Urbano/Presidência da República
$\text{signal}(q_{obs,j}), \text{signal}(q_{sim,j})$ .....	sentido dos escoamentos observados e simulados
$\Sigma$ .....	símbolo somatório
$V$ .....	velocidade
$V_{Di}$ .....	volume diário no sub-setor $i$
$V_{máx}$ .....	velocidade máxima
VRP.....	Válvula Redutora de Pressão
$w_H, w_Q$ .....	pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão
$z_j, Z_j$ .....	cota do nó $j$

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **ESTUDO DA MINIMIZAÇÃO DAS PERDAS FÍSICAS EM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO O MODELO EPANET**

Autora: Lidiane Bittencourt Barroso

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Santa Maria, 24 de fevereiro de 2005.

O controle e a redução das perdas de água no mundo é instrumento fundamental para a mudança cultural, que será necessária no que se refere à utilização deste recurso natural fundamental à vida.

O objetivo da pesquisa é estudar as possibilidades de minimização das perdas físicas (vazamentos) no setor de distribuição de água localizado no bairro Nossa Senhora de Lourdes e suas imediações na cidade de Santa Maria – RS. Este setor é estanque hidráulicamente, monitorado por um macromedidor de volume e operado com 3 estações pitométricas instaladas para medir vazão e pressão nas entradas dos sub-setores 1, 2 e 3.

Na modelagem do comportamento hidráulico do setor em estudo utilizou-se o modelo EPANET, de domínio público desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana. A partir deste modelo calibrado, com erro médio absoluto de 0,159 L/s para as vazões e 1,984 m para as pressões, foi possível criar um termo de comparação e simular intervenções, como: ajuste na VRP existente, substituição de trechos, setorização da rede, e instalação de nova VRP. A instalação de 2 novas VRP's na entrada dos sub-setores 1 e 2, operando com as aberturas mínimas foi a intervenção que apresentou a maior redução da vazão de vazamento média (2,14 L/s).

Foram simuladas redes no modelo EPANET com diferentes pares de parâmetros da relação pressão versus vazamento, a fim de verificar a variação nas pressões e conseqüentemente nos vazamentos, devido às manobras na VRP.

A correta operação de uma VRP aliada à distribuição apenas do volume de água necessário a cada setor; além de reduzir desperdícios, poderá suprir deficiências de abastecimento em outros setores. Com a redução das perdas de água, as companhias de saneamento e a população economizam, além de diminuir a quantidade de água retirada dos mananciais, contribuindo à preservação do meio ambiente.

## **ABSTRACT**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **MINIMIZATION STUDY OF PHYSICS LOSSES IN WATER DISTRIBUTION SYSTEM USING THE EPANET MODEL**

Authoress: Lidiane Bittencourt Barroso

Adviser: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Santa Maria, February 24<sup>th</sup> 2005.

The control and the reduction of water losses in the world is a fundamental instrument for cultural change, which is necessary as a basic natural resource to life.

The objective of this research is to study the minimization possibilities of physical losses (leakage) in the sector of water distribution system located in Nossa Senhora de Lourdes district and its immediacy in Santa Maria - RS. This sector is closed hydraulically, monitored by a volume macromesurer and operated with 3 pitot tube stations installed to measure flow and pressure in inlet subsectors 1, 2 and 3.

In the hydraulic behavior modeling of the sector in study, it was used EPANET model, free software developed by the U. S. Environmental Protection Agency. From this calibrated model with mean absolute error of 0.159 L/s for flows and 1.984 m for pressure, it was possible to create a comparison term and to simulate interventions as: adjustment in the existing PRV, links substitution, network setorization and installation of new PRV. The installation of 2 new PRV in inlet subsectors 1 and 2 operating with the minimum openings was the intervention that presented the best reduction of the average leakage flow (2.14 L/s).

Networks had been simulated in EPANET model with different pairs of parameters of pressure versus leakage relation, in order to verify the variation in pressures and consequently in leakage due to the setting in the PRV.

The correct operation of a PRV allied to the distribution of the only necessary water volume to each sector not only reduces waste, but could also to solve supply deficiencies in other sectors. Water loss reduction decreases costs of Sanitation Company and population. It also reduces the amount of water removed from natural sources and contributes to environment preservation.

## 1. INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional, a expansão agrícola e industrial, e a expansão urbana acelerada trazem como consequência uma maior utilização dos recursos naturais, introduzindo-lhes modificações e influências, que tornam menos adequado, e até impróprio o seu uso. Por outro lado, a quantidade e qualidade da água disponível para abastecimento público atuam como fator determinante no processo de desenvolvimento econômico e social de uma cidade.

Durante a Rio+10, realizada em Johannesburgo em 2002, a ONU divulgou índices segundo os quais, até 2025, metade da população do planeta ficará sem acesso à água. Portanto, o controle e a redução das perdas de água no mundo é instrumento fundamental para a mudança cultural que será necessária no que se refere à utilização deste recurso natural fundamental à vida. É preciso motivar a sociedade ao uso racional da água.

O uso racional dos recursos hídricos se torna cada vez mais complexo. Este fato tem afetado também o uso da água, considerado o mais nobre, que é o abastecimento público. A gestão do abastecimento de água de uma cidade inserida no interior de uma bacia hidrográfica é influenciada pela Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei nº 9.433 de 08/01/1997, que considera como fundamento básico que a água é um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Torna-se estratégico e importante que as companhias de saneamento preocupem-se com a eficiência operacional dos sistemas de abastecimento.

A eficiência de um sistema de abastecimento de água é avaliada pelo indicador "Índice de Perdas" que procura retratar todas as componentes desta ineficiência. Em 2001 a média nacional das perdas (englobando perdas reais e aparentes) nos sistemas de abastecimento de água brasileiros situou-se no patamar dos 40%, com os maiores valores alcançando a casa dos 70% e os menores valores girando em torno dos 20% (SEDU/PR, 2002).

Em sistemas de abastecimento público, do ponto de vista operacional, as perdas de água são consideradas correspondentes aos volumes não

contabilizados. Esses englobam tanto as perdas físicas (reais), que representam a parcela não consumida, como as perdas não físicas (aparentes), que correspondem à água consumida e não registrada.

As perdas físicas originam-se de vazamentos no sistema, envolvendo a captação, a adução de água bruta, o tratamento, a reservação, a adução de água tratada e a distribuição, além de procedimentos operacionais como: lavagem de filtros e descargas na rede, quando estes provocam consumos superiores ao estritamente necessário para operação.

As perdas não físicas originam-se de ligações clandestinas ou não cadastradas, hidrômetros parados ou que submedem, fraudes em hidrômetros e outras. São também conhecidas como perdas de faturamento, uma vez que seu principal indicador é a relação entre o volume disponibilizado e o volume faturado pela concessionária.

A redução das perdas físicas permite diminuir os custos de produção, mediante redução do consumo de energia, de produtos químicos e outros, e utilizar as instalações existentes para aumentar a oferta, sem expansão do sistema produtor. O combate às perdas físicas de água num sistema de abastecimento de água é a atividade mais importante quando se pretende melhorar a eficiência deste sistema.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo da pesquisa é estudar as possibilidades de minimização das perdas físicas (vazamentos) em um setor do sistema de distribuição de água de Santa Maria – RS. Utilizando o modelo EPANET 2.0 (ROSSMAN (2000)) na modelagem do comportamento hidráulico do setor. Foram avaliadas:

- a abertura ótima da válvula redutora de pressão existente;
- o controle de pressão excessiva nas tubulações pela substituição de trechos e setorização da rede;
- a análise da instalação de nova válvula redutora de pressão.

### **3. REVISÃO DA LITERATURA**

Os fundamentos teóricos desta pesquisa estão subdivididos em 5 seções principais. Na primeira, apresenta-se o conceito, os objetivos, as etapas e algumas técnicas de calibração de redes de distribuição, além dos níveis de aceitabilidade. Na segunda, recomendam-se os coeficientes de rugosidade a serem adotados no cálculo da perda de carga. Na terceira, equaciona-se as principais relações pressão versus vazamento. Na quarta, são apresentadas algumas características e importância das válvulas redutoras de pressão (VRP's). Na quinta, cita-se alguns dos modelos de simulação hidráulica.

#### **3.1. Calibração de Redes de Distribuição**

Vários algoritmos foram desenvolvidos nas últimas décadas para calibração de redes de distribuição de água (WALSKI (1983); BHAVE (1988); BOULOS & WOOD (1990); RIGHETTO (2001) dentre outros). A confiabilidade e eficiência dos algoritmos encontrados na literatura dependem do método de calibração utilizado.

A calibração é, segundo CESARIO & DAVIS (1984), o processo de ajuste fino de um modelo até à simulação das condições reais com um grau de exatidão estabelecido, para um horizonte de tempo específico.

Para WALSKI, CHASE & SAVIC (2001a), calibração é o processo de comparação entre os resultados simulados e as observações de campo. O processo de calibração inclui mudanças nas demandas do sistema, ajuste fino da rugosidade das tubulações, alteração de características de operação de bombas e outros ajustes dos dados de entrada do modelo que afetem os resultados simulados.



Os principais objetivos da calibração, segundo DIAS et al. (2000) são:

- estabelecer um modelo credível;
- criar um termo de comparação;
- estabelecer um instrumento de previsão;
- adquirir conhecimentos e compreender o funcionamento do sistema;
- descobrir erros de construção, ou outros, no sistema.

A calibração de um modelo deve seguir várias etapas definidas previamente, tendo em vista alcançar os objetivos pretendidos. ORMSBEE & LINGIREDDY (1997), enumeram sete passos para calibração de um modelo:

1. identificação do uso pretendido para o modelo;
2. determinação das estimativas iniciais dos parâmetros do modelo;
3. coleta dos dados para calibração;
4. avaliação dos resultados do modelo;
5. execução da macro-calibração;
6. realização da análise de sensibilidade;
7. execução da micro-calibração.

Os autores citam que as diferenças entre os resultados da aplicação do modelo e as observações de campo podem ser causadas por diversos fatores:

- erros na modelação dos parâmetros (valores de rugosidade de tubulações e distribuição de demandas nodais);
- geometria incorreta da rede (tubos conectados aos nós errados);
- definição incorreta dos limites das zonas de pressão;
- dados incorretos da rede (diâmetro dos tubos, comprimento, etc.);
- erros nas condições de contorno (ou seja, incorreções nos dados de válvulas redutoras de pressão, nível d'água nos reservatórios, curvas de bomba, etc.);
- erros em registros da operação do sistema (por exemplo, bombas partindo e parando em períodos incorretos);
- incorreções no equipamento de medição;
- erros de leitura nos instrumentos.

### **3.1.1. Técnicas de Calibração**

A dificuldade de ajuste dos consumos e dos coeficientes de perdas de carga, tem levado alguns investigadores a desenvolver várias técnicas de calibração automática de modelos hidráulicos. Estas técnicas são classificadas em três categorias: procedimentos de tentativa e erro com uso de equações analíticas, modelos explícitos ou simulação hidráulica, e modelos implícitos ou otimização.

WALSKI (1983) e BHAVE (1988) propuseram uma técnica analítica que ajusta simultaneamente os coeficientes de rugosidade das tubulações e as demandas nos nós. A técnica requer algumas informações que podem ser obtidas durante os testes de rotina nas redes de distribuição de água.

BHAVE (1988) desenvolveu uma modificação da aplicação feita por WALSKI (1983) utilizando um procedimento iterativo de calibração, no qual ajustou simultaneamente as demandas nos nós e os coeficientes de resistência das tubulações. O modelo utilizado ajustou os coeficientes de resistência das tubulações e/ou as demandas dos nós, através de um procedimento por tentativas, fazendo um prognóstico de pressões nos nós, e assim, combinando com as respectivas pressões observadas.

Um algoritmo explícito para determinar diretamente os parâmetros de projeto, operação e calibração foi apresentado por BOULOS & WOOD (1990). As equações de energia e continuidade fornecem técnicas para a determinação de condições de pressão e vazão em regime permanente, nas redes hidráulicas. A solução do problema é baseada na reformulação das equações de equilíbrio da rede, em termos de parâmetros específicos do sistema. Neste modelo, podem ser considerados todos os tipos de sistemas de distribuição. O método de Newton-Raphson é utilizado como procedimento para linearizar os

termos não-lineares e resolver simultaneamente o sistema de equações lineares.

De acordo com GRECO & GIUDICE (1999), o principal problema em calibração de modelos é o grande número de parâmetros a calibrar partindo-se de poucas medições (problema inverso do controle de redes). A fim de contorná-lo, apresentam um procedimento que combina um algoritmo de otimização não-linear com um simulador de redes, tal como o modelo EPANET. A rugosidade dos tubos é continuamente ajustada até que os resultados da simulação sejam condizentes com os dados observados em campo. O processo trabalha com diversas condições de carga, além de poder adotar diferentes equações de resistência ao escoamento.

Recentemente, CHEUNG, SOARES & SOUZA (2000) investigaram o método de calibração de sistemas de distribuição de água proposto por WALSKI (1983), implementaram em um modelo de rede teórica e propuseram melhorias em sua formulação.

CHEUNG & SOUZA (2001) realizaram um estudo sobre a influência da setorização de uma rede hidráulica na acurácia dos resultados produzidos pelo modelo de calibração. O método de calibração investigado foi proposto por BHAVE (1988).

Para RIGHETTO (2001), o problema da calibração de rede consiste em se determinar o conjunto de valores das demandas nodais e dos coeficientes de rugosidade das tubulações que minimizam a função objetivo  $F$ , equação (3.1), definida pela soma dos desvios quadrados das cargas nodais e vazões em trechos simulados e observados. Admitindo que se conheçam os valores das cargas hidráulicas em  $m_{obs}$  nós da rede, isto é, distinguindo tais nós com enumeração própria, isto é,  $i^* = 1, 2, \dots, m_{obs}$ , busca-se os conjuntos de valores de demanda e de rugosidade, tais que resultem em valores de  $H_{sim,i^*}$  que minimizem o valor da função objetivo, ou seja:

$$\min F = \sum_{i^*=1}^{m_{\text{obs}}} (H_{\text{obs},i^*} - H_{\text{sim},i^*})^2 \quad (3.1)$$

Caso se inclua na função objetivo observações de vazão em trechos da tubulação, convém adimensionalizar as duas variáveis, utilizando-se de valores de referência da carga de pressão,  $h_{\text{ref}}$ , e de vazão,  $q_{\text{ref}}$ . Neste caso, a função objetivo passa a ser expressa por:

$$F = \sum_{i=1}^{m_{\text{obs,no}}} \left[ \frac{(h_{\text{obs},i} - h_{\text{sim},i})}{h_{\text{ref}}} \right]^2 + \sum_{j=1}^{m_{\text{obs,tr}}} \left[ \frac{(q_{\text{obs},j} - q_{\text{sim},j})}{q_{\text{ref}}} \right]^2 + \sum_{j=1}^{m_{\text{obs,tr}}} \left[ \frac{(\text{sinal}(q_{\text{obs},j}) - \text{sinal}(q_{\text{sim},j}))}{2} \right]^2 \quad (3.2)$$

onde:  $m_{\text{obs,no}}$  e  $m_{\text{obs,tr}}$  = nº de nós e nº de trechos observados;  $q_{\text{obs},j}$  e  $q_{\text{sim},j}$  = vazões observadas e simuladas no trecho  $j$  (L/s);  $\text{sinal}(q_{\text{obs},j})$  e  $\text{sinal}(q_{\text{sim},j})$  = sentido dos escoamentos observados e simulados, respectivamente.

Para a obtenção da solução ótima, RIGHETTO (2001) empregou a técnica de um processo de busca baseado em algoritmo genético.

PIZZO & LUVIZOTTO Jr (2001) apresentaram uma nova metodologia de calibração de rugosidade de tubulação e de demandas nodais em redes, através do acoplamento do TMA – “*Time Marching Approach*”, resolvido pelo método das características, com o algoritmo de busca de Nelder-Mead (empregado no processo de otimização). O algoritmo de Nelder-Mead é uma ferramenta de busca de mínimo (ou máximo) de funções, que não utiliza derivadas da função objetivo, o que o torna bastante interessante na medida em que certos problemas de otimização apresentam funções objetivo não diferenciáveis ou de cálculo complexo de suas derivadas.

O problema inverso de determinação de parâmetros (rugosidades dos trechos da rede) através da minimização dos desvios entre valores produzidos via simulação hidráulica e dados de pressão e vazão observados em campo, proposta por SILVA, REIS & SOARES (2002), expresso através maximização da seguinte função objetivo (FO):

$$FO = \left\{ \sum_{k=1}^c \left\{ w_H^{(k)} \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \frac{P_{simi} - P_{obsi}}{\left[ \sum_{i=1}^N P_{obsi} \right] / N} \right]^2 + w_Q^{(k)} \cdot \sum_{j=1}^M \left[ \frac{Q_{simj} - Q_{obsj}}{\left[ \sum_{j=1}^M Q_{obsj} \right] / M} \right]^2 \right\} \right\}^{-1} \quad (3.3)$$

onde: P = pressão (m); Q = vazão (L/s); N = conjunto de nós de observação de valores de pressão; M = conjunto de nós de observação de valores de vazão; c = nº de condições de demanda ou dias de observação;  $w_H$ ,  $w_Q$  = pesos atribuídos aos desvios de pressão e vazão; sim, obs = denotam valores simulados e observados, respectivamente.

Basicamente, a FO a ser maximizada constitui o inverso da soma dos quadrados das diferenças adimensionalizadas entre valores de pressões e vazões simulados e observados, multiplicados pelos respectivos pesos atribuídos a cada uma das grandezas, definidos de acordo com a importância dada ao respectivo parâmetro.

### 3.1.2. Níveis Aceitáveis de Calibração

Um modelo real deve alcançar um nível de desempenho indiferente de quais abordagens de calibração forem adaptadas, de acordo com WALSKI, CHASE & SAVIC (2001a) os critérios para vazão e pressão são:

#### Critério para Vazão:

- Vazões modeladas na tubulação principal (quando a vazão é maior que 10 % da demanda total) devem estar dentro de  $\pm 5$  % das vazões medidas.
- Vazões modeladas na tubulação principal (quando a vazão é menor que 10 % da demanda total) devem estar dentro de  $\pm 10$  % das vazões medidas.

#### Critério para Pressão:

- 85 % dos testes de medição de campo devem estar dentro  $\pm 0,50$  m ou  $\pm 5$  % da perda de carga máxima através do sistema, qualquer que seja o maior.

- 95 % dos testes de medição de campo devem estar dentro  $\pm 0,75$  m ou  $\pm 7,5$  % da perda de carga máxima através do sistema, qualquer que seja o maior.
- 100 % dos testes de medição de campo devem estar dentro  $\pm 2,00$  m ou  $\pm 15$  % da perda de carga máxima através do sistema, qualquer que seja o maior.

A aplicação de um modelo é singular, portanto é impossível deduzir um conjunto único de normas para avaliar a calibração. Assim, o modelo é considerado calibrado quando os resultados produzidos podem ser usados com confiança para tomar decisões a respeito de projetos, operação e manutenção de um sistema de distribuição de água.

### **3.2. Coeficientes de Rugosidade**

Os fatores de rugosidade ou de resistência ( $C$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$ ) são coeficientes empíricos tabelados, que exprimem o efeito da rugosidade do material no cálculo da perda de carga contínua de modo distinto. A rugosidade absoluta,  $\epsilon$ , e o coeficiente de Manning,  $\eta$ , permitem medir a rugosidade diretamente. O coeficiente da fórmula de Hazen-Williams,  $C$ , relaciona-se com a rugosidade de modo inverso, sendo tanto mais elevado quanto menor for a rugosidade do material.

Segundo WALSKI (1983), muitos pesquisadores consideram os valores de rugosidade encontrados na literatura suficientes para uso nos modelos, porém isto não é geralmente verdadeiro pois:

1. os valores da literatura são meramente valores médios e há uma quantidade razoável de variações sobre a média;

2. em um modelo no esboço de um sistema, uma tubulação deve também considerar a capacidade de carga dos condutos mais próximos ao qual foram eliminados pelo modelo;
3. o fator de rugosidade C para uma tubulação deve também considerar perdas de carga localizadas ao qual não estão explicitamente consideradas para uso nos comprimentos equivalentes;
4. o consumo em um modelo é agrupado nos nós, enquanto no sistema real é espalhado entre os nós.

O desenvolvimento do autor tornou possível o cálculo do fator de rugosidade C e consumos de água através de testes em hidrantes de incêndio. O problema destas aproximações foi baseado na hipótese em que todos os erros não calibrados do modelo são um resultado de erros no fator C ou possivelmente no consumo de água. As experiências descritas concluíram que é improvável que um procedimento analítico simples ou uma técnica de otimização para calibrar um modelo sempre seja desenvolvido. Há simplesmente muitos outros fatores que podem estar incorretos em um modelo não calibrado, e existem muitas origens destes erros.

De acordo com ROSSMAN (2000), a fórmula de Hazen-Williams é uma das mais utilizadas para o cálculo da perda de carga. No entanto, não pode ser utilizada para outros líquidos, senão a água e foi inicialmente desenvolvida apenas para escoamento turbulento. A fórmula de Darcy-Weisbach é teoricamente a mais correta. É aplicável a todos os regimes de escoamento e a todos os líquidos. A fórmula de Chezy-Manning é utilizada usualmente em escoamentos em superfície livre.

As fórmulas referidas anteriormente se baseiam na seguinte expressão, para calcular a perda de carga contínua entre o nó inicial e final da tubulação:

$$h_L = A \cdot q^B \quad (3.4)$$

onde:  $h_L$  = perda de carga (comprimento);  $q$  = vazão (volume/tempo);  $A$  = termo de perda de carga;  $B$  = expoente da vazão.

O quadro 3.1 apresenta para cada fórmula a expressão do termo de perda de carga (A) e o valor para o expoente da vazão (B). Cada fórmula utiliza um coeficiente diferente, os quais são determinados empiricamente.

Quadro 3.1 – Fórmulas para o cálculo da perda de carga contínua.

Fórmula	A	B
Hazen-Williams	$10,674 C^{-1,852} D^{-4,871} L$	1,852
Darcy-Weisbach	$0,0827 f(\epsilon, D, Q) D^{-5} L$	2
Chezy-Manning	$10,294 \eta^2 D^{-5,33} L$	2

onde: f = fator de resistência (depende de  $\epsilon$ , D e Q);  
D = diâmetro (m); L = comprimento (m); Q = vazão (m<sup>3</sup>/s).

Adotando a fórmula de Darcy-Weisbach, o modelo EPANET utiliza diferentes métodos para calcular o fator de resistência (f), consoante o regime de escoamento:

- a fórmula de Hagen-Poiseuille, para regime laminar ( $Re < 2000$ );

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.5)$$

- a fórmula de Swamee e Jain, como aproximação da fórmula de Colebrook-White, para escoamento turbulento rugoso ( $Re > 4000$ );

$$f = \frac{0,25}{\left[ \ln \left( \frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.6)$$

- uma interpolação cúbica, a partir do ábaco de Moody, para o escoamento turbulento de transição ( $2000 < Re < 4000$ ).

$$f = (X1 + R(X2 + R(X3 + X4))) \quad (3.7)$$

$$R = \frac{Re}{2000} \quad (3.8)$$

$$X1 = 7FA - FB \quad (3.9)$$

$$X2 = 0,128 - 17FA + 2,5FB \quad (3.10)$$

$$X3 = -0,128 + 13FA - 2FB \quad (3.11)$$

$$X4 = R(0,032 - 3FA + 0,5FB) \quad (3.12)$$

$$FA = (Y3)^{-2} \quad (3.13)$$



$$FB = FA \left( 2 - \frac{0,00514215}{(Y2)(Y3)} \right) \quad (3.14)$$

$$Y2 = \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \quad (3.15)$$

$$Y3 = -0,86859 \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{4000^{0,9}} \right) \quad (3.16)$$

onde: Re = número de Reynolds.

### 3.3. *Relação Pressão versus Vazamento*

As válvulas redutoras de pressão (VRP's) são utilizadas visando à redução de perdas por vazamentos em redes de distribuição de água. Com este objetivo deve-se conhecer como as perdas se relacionam com a pressão de serviço. Vários trabalhos (GERMANOPOULOS & JOWITT (1989), JOWITT & XU (1990), GRATÃO & PORTO (2000), VIEGAS (2003), entre outros) utilizam um modelo do tipo pressão versus vazamento, da forma:

$$q_{ij} = (C_d \cdot L_{ij}) \cdot P_{ij}^N \quad (3.17)$$

onde:  $q_{ij}$  = vazão de vazamento na tubulação entre os nós i e j (L/s);  $C_d$  = coeficiente de descarga; N = expoente do emissor;  $L_{ij}$  = comprimento da tubulação (m);  $P_{ij}$  = pressão média na tubulação (m).

GERMANOPOULOS & JOWITT (1989) propuseram uma relação análoga à equação (3.17) como resultado de uma série de experimentos em redes de distribuição na Inglaterra. Tais experimentos consistiram de ensaios sobre distritos de operação com pouco ou nenhum consumo noturno, onde foram medidas as vazões, várias pressões e registrados os resultados, uma vez que a identificação da relação entre pressão de serviço e vazamento esbarra na necessidade de identificar o consumo noturno.

Este mesmo modelo, equação (3.17), foi aplicado por GRATÃO & PORTO (2000), em uma rede de distribuição de água localizada na cidade de São Carlos – SP, como um método eficiente de controlar e/ou reduzir perdas de água por vazamentos. As simulações computacionais foram realizadas utilizando parâmetros da relação pressão versus vazamento levantados na literatura ( $N = 1,18$  e  $C_d = 1,0 \times 10^{-5}$ ) de acordo com JOWITT & XU (1990) e em campo ( $N = 0,71$  e  $C_d = 6,2 \times 10^{-5}$ ). Com o propósito de avaliação da operação de VRP's, a metodologia proposta por RIGHETTO & CARRIJO (1989) foi adaptada e melhorada para a rede em estudo, no qual foi admitido que as vazões de demanda nos nós seguem uma distribuição de probabilidade triangular.

Observa-se a necessidade de levantamento de campo dos parâmetros da relação pressão versus vazamento, "N" e "C<sub>d</sub>", para cada rede e/ou setor em estudo, pois estes parâmetros sofrem mudanças de acordo com as características da rede e não é prudente utilizar dados importados de outras redes ou países sem nenhum critério técnico de avaliação. Assim, VIEGAS (2003) determinou os parâmetros ( $N = 0,611$  e  $C_d = 5,3985 \times 10^{-5}$ ) através de ensaios para o setor de distribuição de água localizada no bairro Nossa Senhora de Lourdes e suas imediações na cidade de Santa Maria – RS. Neste setor foram realizados estudos que objetivaram propor metodologias para determinação das perdas físicas de água. Analisaram-se os seguintes métodos: o "Balanço de Água", que é o método freqüentemente utilizado pelas empresas nos programas de redução de perdas de água; o modelo EPANET; e o método empírico "F<sub>ND</sub> - Fator Noite - Dia". Estes métodos têm em comum a facilidade para o seu uso e apresentaram nos testes realizados uma boa concordância.

SABESP (1998) apresenta resultados de um estudo realizado no Brasil no sentido de quantificar perdas e estabelecer a relação pressão versus vazamento. Utilizando-se um distrito pitométrico que atendesse a rede de distribuição, ligações e ramais até a caixa d'água, com 20,5 km de extensão e

4.459 ligações. Considera a equação da vazão através de um orifício, equação (3.18), como um modelo adequado para descrever vazamentos diversos numa rede de distribuição.

$$Q = A_o.C_d.P^N \quad (3.18)$$

onde: Q = vazão (m<sup>3</sup>/s); A<sub>o</sub> = área do orifício (m<sup>2</sup>); C<sub>d</sub> = coeficiente de descarga; P = pressão (m); N = expoente dependente da forma dos orifícios que varia entre 0,5 e 1,5.

Segundo SILVA et al. (1998), as perdas por vazamentos na rede de distribuição, sejam decorrentes de falhas construtivas, defeitos em peças especiais e conexões, rupturas, materiais inadequados, etc., aproximam-se ao escoamento em orifícios e fendas. Para tubos metálicos em geral, a vazão perdida é uma função proporcional à raiz quadrada da carga hidráulica. Dessa forma, especial atenção deve ser dada ao controle de cargas hidráulicas na rede, pois sua simples redução leva a substanciais reduções nas perdas nos vazamentos existentes, além de restringir o risco de novas rupturas.

TUCCIARELLI, CRIMINISI & TERMINI (1999) propuseram uma formulação que relaciona diretamente o vazamento com os nós, ao invés dos trechos como no trabalho de GERMANOPOULOS & JOWITT (1989). Essa nova formulação apresenta duas grandes vantagens: uma do ponto de vista computacional, já que na maioria dos modelos de simulação se trabalha com equações em nível de nó e não de trecho, e outra por incluir o diâmetro do tubo (D<sub>ij</sub>) como uma variável, melhorando a determinação do coeficiente de perdas. A relação entre carga hidráulica no nó j (H<sub>j</sub>) e vazamento é dada por:

$$q_j = (H_j - z_j)^{\alpha_j} \sum_{i=1}^{M_j} \varphi_{ij} \frac{\pi}{2} D_{ij} L_{ij} \quad (3.19)$$

onde: q<sub>j</sub> = vazão de vazamento no nó j (L/s); z<sub>j</sub> = cota do nó j (m); φ<sub>ij</sub> = coeficiente de perda no trecho L<sub>ij</sub>; α<sub>j</sub> = expoente de perdas no nó j; M<sub>j</sub> = n° de trechos adjacentes ao nó j.

Quando a demanda é variável no tempo, o vazamento de água é calculado como sendo a média das vazões ao longo do tempo.

SILVA et al. (2000) testaram uma metodologia para ajuste da relação pressão versus vazamento, a partir de ensaios noturnos. Neste trabalho foram testadas três aproximações para o problema. Os primeiros dois métodos foram baseados na variação de pressão obtida em nós representativos da rede e o terceiro fez uso de uma técnica de otimização por busca direta.

#### **3.4. Válvulas Redutoras de Pressão – características e importância**

As válvulas redutoras de pressão representam uma solução para conseguir um sistema de distribuição de água confiável. Um sistema sem válvulas é completamente incapacitado durante cada interrupção de tubulação ou evento de manutenção que requeira uma suspensão temporária. Não é dada devida atenção à importância das válvulas e suas disposições nos sistemas de distribuição, conforme WALSKI (1993).

De acordo com SILVA et al. (1998), a instalação de uma VRP, dimensionada para reduzir as cargas em 60 % (por exemplo, de 100 m.c.a. para 40 m.c.a.), em um setor com perdas físicas conhecidas de 50 %, acarretará uma redução de 37 % nas perdas existentes, as quais passarão de 50 % para 31,5 %, com uma redução efetiva de 18,5 %. Portanto, é possível quantificar previamente as reduções de perdas esperadas por meio de reduções de pressões e, com isso, avaliar economicamente o retorno dos investimentos a realizar para atingir os objetivos.

Segundo YOSHIMOTO, TARDELLI FILHO & SARZEDAS (1999), as variações topográficas aliadas às perdas de carga dentro de uma zona de pressão favorecem a utilização de válvulas redutoras de pressão, visando manter pressões na rede inferiores a 30 m.c.a. O princípio básico da VRP é a manutenção de uma pressão fixa na sua saída. Em locais onde se verificam consideráveis variações de pressão, decorrentes de perdas de carga no

sistema, torna-se interessante à utilização de controladores eletrônicos, que são equipamentos dotados de circuito eletrônico com armazenador de dados e válvulas solenóides, alimentados através de bateria de lítio, com uma vida útil de aproximadamente 5 anos. Assim, há três tipos básicos de controle de pressão com utilização de VRP:

- Pressão de Saída Fixa (VRP sem controlador): é usada quando o sistema a ser controlado não tem mudanças significativas de demanda, bem como perdas de carga relativamente pequenas (menores do que 10 m.c.a., sob quaisquer condições de operação).
- Modulação por Tempo: é usada para controlar um sistema que apresenta grande perda de carga (superior a 10 m.c.a.), porém de perfil regular de consumo. Assim, a válvula irá trabalhar com patamares de pressão de saída, ajustados no tempo.
- Modulação por Vazão: é usada para controle em sistemas que apresentam grande perda de carga (grandes áreas) e mudanças no perfil de consumo, que podem ser no tipo de uso, na sazonalidade ou na população (como no caso de cidades turísticas). Apesar de ser o tipo de controle mais eficiente, necessita de controlador mais caro, além de um medidor de pulso de vazão.

Para dimensionar corretamente a VRP e escolher o método de controle ou modulação (pressão de saída fixa, modulada pelo tempo ou pela vazão) é importante considerar o impacto das flutuações sazonais na demanda e o tipo de área que está sendo suprida. A maior parte das áreas tem alguma forma de macromedição (parcial ou total). Geralmente, a VRP deve controlar somente uma parte do setor; no entanto, as leituras de um macromedidor são uma boa indicação do tipo de mudança que pode ocorrer devido ao efeito da sazonalidade.

É recomendável a realização de uma pesquisa de vazamentos e o reparo de todos os vazamentos encontrados, na área de influência da futura válvula, antes da realização das medições de vazão, pois a tendência é haver uma redução na vazão do sistema após a implantação da VRP (redução dos vazamentos) e as vazões medidas serão utilizadas para o dimensionamento da válvula (isso evitará um possível superdimensionamento da VRP).

Para WALSKI, CHASE & SAVIC (2001b) a quantidade de vazamento em um sistema de distribuição de água está relacionada à pressão do sistema, portanto, reduzindo as pressões durante as horas de menor consumo pode-se reduzir os vazamentos. A redução da pressão é alcançada através da operação de válvula. Além do mais, o gerenciamento da pressão da água e o controle ativo de vazamentos envolvem a setorização de grandes redes em áreas menores (chamados Distritos Hidrométricos, na Inglaterra) que são melhor monitorados. Assim, a modelagem é usada para ajudar a gerenciar a redução de vazamentos pela determinação dos efeitos que cada setorização de redes em áreas menores ou a regulação dos controles de válvulas sobre pressão e vazão através do sistema.

VIEGAS (2001) cita os benefícios da operação das VRP's nas áreas de influência com controle de pressão:

- redução das vazões diárias de operação provocada pelo rebaixamento da pressão a níveis operacionais que evitem a falta de água nos pontos críticos, porém, reduzindo a pressão excedente;
- redução brusca da incidência de rompimentos de tubulações melhorando a qualidade do atendimento e reduzindo os custos de manutenção;
- operação do sistema de abastecimento de água com pressões mais estabilizadas e de intensidade adequada reduzindo a ocorrência de danos inclusive às instalações hidrossanitárias prediais.

A maioria dos fabricantes trabalha com uma válvula do tipo globo ou angular, operada hidraulicamente, controlada pelo acionamento direto de mola, diafragma e válvula piloto. O circuito piloto permite um total auto-ajuste da válvula, e assegura um controle extremamente preciso da pressão reduzida, dentro de extensas variações de vazão.

A válvula fica normalmente aberta quando a pressão da linha é aplicada na entrada da válvula. Quando essa mesma pressão é aplicada na cabeça da válvula, a válvula se fecha, porque a área do diafragma ou pistão é maior que a

área da sede da válvula. É o controle da pressão acima do diafragma ou pistão que determina a posição da válvula principal – ou seja, aberta, fechada ou em uma posição intermediária, conforme figura 3.1.

O controle piloto é um acionamento direto, ajustável, projetado para permitir o fluxo quando a pressão a jusante fica abaixo da ajustada pela mola. Com o incremento na demanda, há como resultado a queda na pressão de jusante (controlada). A válvula piloto sente esta queda na pressão e a mola irá causar uma abertura na válvula. Como a válvula piloto abre, a pressão é sangrada da cabeça da válvula principal, permitindo a linha de pressão principal abrir a válvula principal. A válvula principal continua a abrir até que a pressão a jusante tenha retornado ao valor correspondente ao ajustado na válvula piloto. O reverso acontecerá num incremento na pressão controlada, resultante de uma redução da demanda.

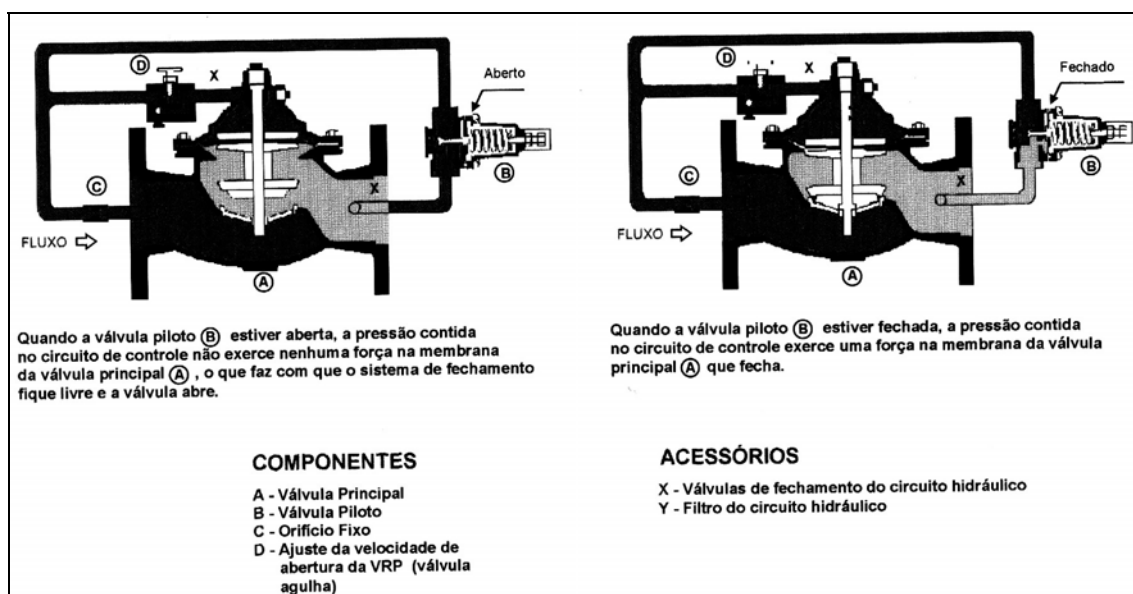


Figura 3.1 – Esquema de funcionamento de uma VRP.

Segundo TARDELLI FILHO (2004), as válvulas redutoras de pressão normalmente são instaladas em uma derivação da tubulação principal, chamada "by pass", guarnecidos por registros de bloqueio a montante e a jusante para as manutenções. Na tubulação principal também é instalado um registro para trabalhar normalmente fechado, só sendo aberto em situações de

manutenção ou alguma emergência operacional a jusante. A figura 3.2 apresenta um esquema da instalação padrão de uma VRP em rede de distribuição de água.

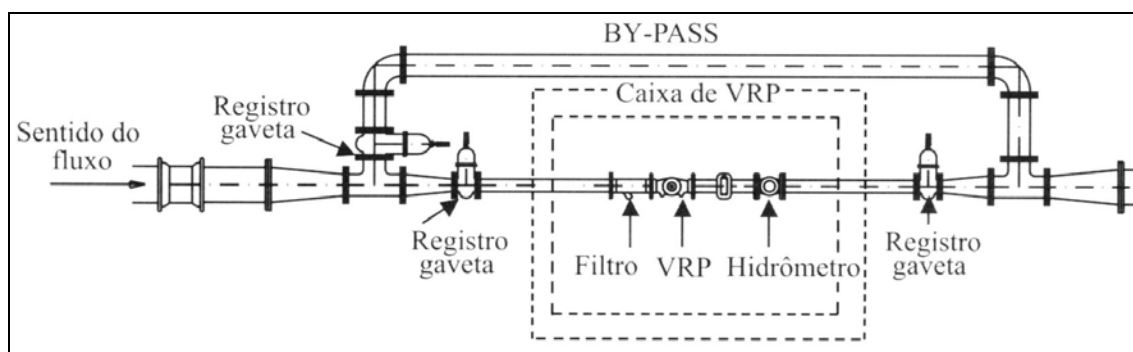


Figura 3.2 – Esquema da instalação padrão de uma VRP.

VAIRAVAMOORTHY & LUMBERS (1998) tratam apenas da otimização das aberturas das válvulas para uma dada localização destas, sem considerar localizações ótimas. A metodologia apresentada envolve o uso de técnica de solução baseada em uma programação quadrática seqüencial, gerando a cada passo uma direção que usado para corrigir o vetor solução. Duas funções objetivo foram consideradas e incorporadas no modelo de otimização. A primeira minimiza o volume total de vazamento na rede, e a segunda, a soma dos quadrados dos desvios entre a pressão dos nós e a pressão mínima requerida. As restrições para as duas funções objetivo são: a equação da continuidade para cada nó, incluindo a dependência pressão versus vazamento; e as pressões e aberturas das válvulas máximas e mínimas.

REIS, PORTO & CHAUDHRY (1997) desenvolvem uma proposta de solucionar o problema da localização ótima de válvulas de controle de pressão em um sistema de distribuição de água, bem como o número de válvulas a adotar, via algoritmos genéticos, que maximizam a redução de vazamentos para dadas demandas nos nós e níveis de reservatórios.

O problema de controle ótimo em tempo discreto para o ajuste do grau de abertura de válvulas usando a teoria do regulador quadrático linear foi



formulado por SOUZA, CHAUDHRY & POLIZER (2002). O controle do sistema foi representado pela seqüência de manobras exercidas sobre as válvulas (coeficientes de atrito) de forma a atender aos objetivos especificados. Esta seqüência de manobras (regras de operação) é definida conhecendo-se os dados relativos ao sistema, o seu estado atual e os estados provisionais embasados em cadastros de consumo. O controle automático realimentado pode grandemente aumentar a eficiência operacional da distribuição de água em redes, e aumentar os benefícios associados com o seu uso. A teoria do regulador quadrático linear foi utilizada para derivar uma expressão para a abertura ótima das válvulas redutoras de pressão com o propósito de conduzir o sistema à condição de equilíbrio em resposta aos distúrbios externos.

Em resumo, uma VRP permite o controle do consumo e a redução de pressão nos encanamentos, diminuindo o número de vazamentos e aumentando a vida útil das tubulações; desde que bem operadas e localizadas nos sistema de distribuição de água. Com a diminuição das perdas de água, as companhias de saneamento e a população economizam, além de diminuir a quantidade de água retirada dos mananciais, contribuindo para a preservação do meio ambiente.

### **3.5. Modelos de Simulação Hidráulica**

A Agência de Proteção Ambiental Americana (US EPA) desenvolveu o modelo EPANET (ROSSMAN (2000)) que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição sob pressão. Uma rede é constituída por tubulações, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O modelo EPANET permite obter os valores da vazão em cada tubulação, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede, durante um período de simulação, subdividido em múltiplos passos de cálculo.

O modelo EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, dentre estas a modelação da relação entre pressão e vazão de dispositivos emissores do tipo orifício, os quais fazem com que a vazão efluente dependa da pressão.

Esses dispositivos também podem ser utilizados para simular perdas em tubulações (se o coeficiente de perdas e o expoente do emissor forem estimados). O EPANET modela os dispositivos emissores como uma propriedade do nó e não como um componente separado.

O MIKE NET usa o mecanismo numérico do EPANET e é aplicável para simulações de: demandas nodais, análises de hidrante/vazão de incêndio, curvas de perda de carga do sistema, características do reservatório, idade da água, decaimento/concentração de cloro, percurso e concentração de poluentes, modelagem on-line baseada em SCADA. O MIKE NET foi desenvolvido em cooperação com BOSS International, EUA.

O WaterCAD foi desenvolvido pela Haestad Methods, é um sistema de gerenciamento de informações geográficas completo para: análise da qualidade da água, determinação da vazão de incêndio exigida, calibração de grandes redes de distribuição, entre outros. O WaterCAD é uma ferramenta sofisticada que permite a engenheiros e responsáveis pelas decisões analisar e gerenciar as redes de distribuição com exatidão e eficiência sem precedência.

O software de modelagem da Water Software Systems, Reino Unido, FINESSE é um pacote completamente integrado de simulação hidráulica, programação ótima de bomba e gerenciamento de vazamentos. O FINESSE é usado atualmente nos países Britânicos e Europeus. O software é compatível com pacotes de simulação hidráulica (EPANET, GINAS, WATNET) e pode ser ligado a GIS e SCADA.

O SCAnet é uma aplicação de apoio para operação de redes de abastecimento de água, que interliga um sistema SCADA com a ferramenta de

simulação hidráulica EPANET. Esta integração permite a simulação de ações de controle sobre a situação real da rede, assim como reprodução e simulação de registros passados pelo sistema. O SCAnet foi desenvolvido pelo grupo GRyCAP para o caso da rede de Valência, demonstrando as vantagens da conexão modelo-SCADA.

ALONSO et al. (2000) apresenta o HIPERWATER, um software demonstrador baseado em computação paralela para a simulação e minimização de vazamentos de redes de água. Este demonstrador, baseado no pacote EPANET, tenta resolver três tipos diferentes de problemas fazendo uso da computação paralela. Primeiro, a solução do problema hidráulico foi discutida por meio do método gradiente. Segundo, o problema de simulação da qualidade da água foi aproximado pelo uso do método elemento de volume discreto. Finalmente, o problema de minimização de vazamentos usando válvulas redutoras de pressão.

Os engenheiros da Universidade de Kentucky e seus associados desenvolveram e auxiliaram a tecnologia de modelagem em rede de tubulação por mais de 30 anos. Inúmeros prêmios de realização técnica e ensino foram ofertados aos membros da equipe de desenvolvimento do Pipe2000 em reconhecimento ao seu trabalho. O Pipe2000 incorpora todas as principais capacidades de modelagem e introduz novas.

Dentre os modelos citados de simulação hidráulica foi escolhido o EPANET, por ser um software de domínio público, bem elaborado e utilizado em vários trabalhos da literatura (ARIMA & CYBIS (1999), ALONSO et al. (2000), DIAS et al. (2000), SOARES (2003), VIEGAS (2003), entre outros), apresentando desempenho satisfatório.

#### 4. METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa está organizada em 3 seções principais. Na primeira, caracteriza-se o setor de distribuição de água em estudo. Na segunda, descreve-se resumidamente o modelo adotado na simulação hidráulica – EPANET, bem como os procedimentos de calibração. Na terceira, propõe-se a minimização dos vazamentos.

Esta é uma pesquisa de ordem teórica, que objetiva propor a minimização dos vazamentos identificados por VIEGAS (2003), no mesmo setor de distribuição de água em estudo. Utilizando o modelo EPANET, calibrado a partir dos levantamentos e ensaios de campo da campanha de Agosto/2001.

Algumas adaptações foram propostas nos procedimentos de calibração da vazão e da pressão, na busca de melhores ajustes. VIEGAS (2003), calibrou somente o trecho de entrada do setor (trecho 202), uma vez que não era objeto de seu estudo uma otimização da vazão de demanda e de vazamento ao longo de cada trecho da rede. Adotou a fórmula de Hazen-Williams no cálculo da perda de carga com valores de C, coeficiente de rugosidade, 140 para PVC e 130 para o fibro-cimento.

Nesta pesquisa, são calibradas as vazões em 3 trechos de teste (202, 77, 21), sendo adotada a fórmula de Darcy-Weisbach no cálculo da perda de carga e ajustados os valores de  $\varepsilon$ , coeficiente de rugosidade, nos os trechos entre os 10 nós de teste de pressão. A fórmula de Darcy-Weisbach é aplicável a todos os regimes de escoamento, conforme argumentado na seção 3.2.

A acurácia da calibração hidráulica do modelo foi importante para propor a minimização dos vazamentos.

#### **4.1 Setor de Distribuição de Água em Estudo**

A pesquisa foi desenvolvida no setor de distribuição de água do bairro Nossa Senhora de Lourdes e suas imediações, figura 4.1, na cidade de Santa Maria – RS.

Este setor é estanque hidráulicamente, monitorado por um macromedidor de volume e operado com 3 estações pitométricas (EP11, EP12 e EP13) instaladas para medir vazão e pressão nas entradas dos sub-setores 1, 2 e 3, figura 4.2.

O bairro Nossa Senhora de Lourdes é predominantemente residencial, segundo os dados comerciais referentes à campanha de Agosto/2001: 3.449 economias, sendo 3.147 residenciais, 242 comerciais, 32 públicas e 28 industriais e 1711 ramais ligados (CORSAN, 2002).

A rede de abastecimento é formada por 59,9 % de tubulações em PVC e 40,1 % em fibro-cimento (FoCo), figura 4.3; numa extensão total de 28.328 m; com diâmetros que variam entre 50 e 350 mm, figura 4.4.

O setor foi discretizado no modelo EPANET em: 233 nós, 242 trechos, 1 reservatório hipotético (RES) e 1 válvula redutora de pressão (VRP). Este reservatório hipotético representa a variabilidade de pressão existente na entrada do setor e é um elemento indispensável na simulação.

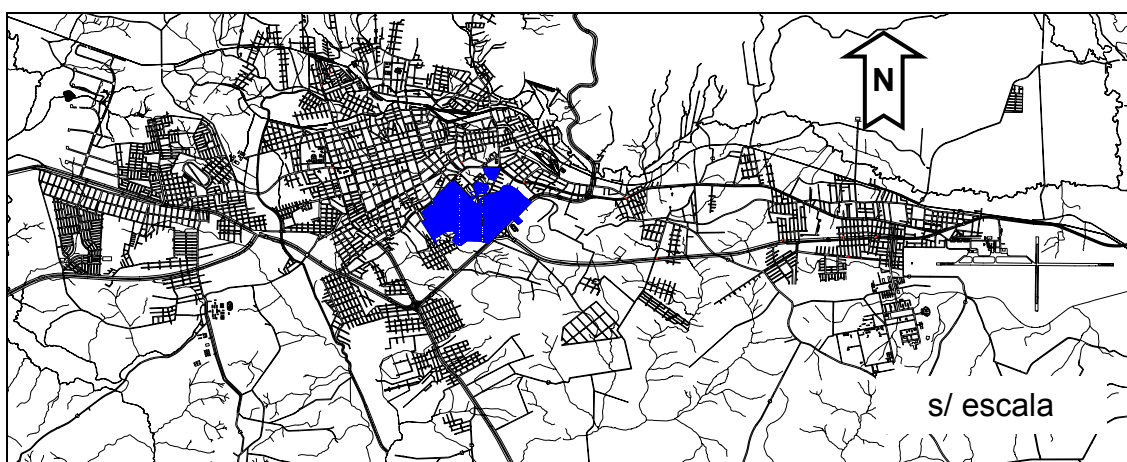


Figura 4.1 – Localização do setor em Santa Maria – RS.

Fonte: Adaptada de VIEGAS (2003), Figura 4.1 Localização do bairro N.S.Lourdes.



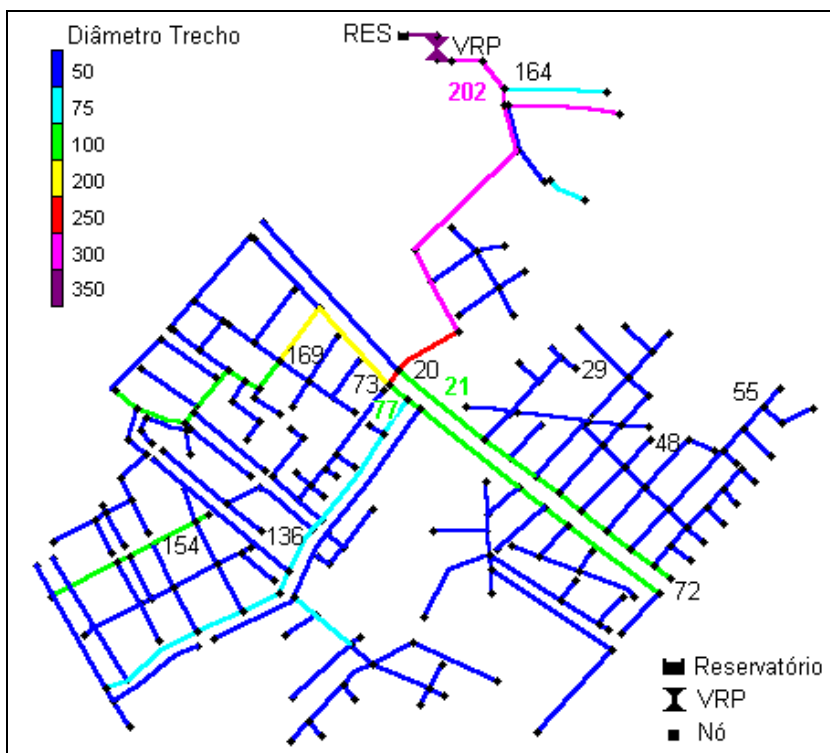


Figura 4.4 – Setor discretizado no modelo EPANET - diâmetro.

#### 4.1.1 Regras de Operação da VRP

O gerenciamento da pressão é feito através de válvula redutora de pressão com piloto e unidade controladora que permitem variar a regulagem ao longo do dia (figura 4.5). Está instalada numa cota de  $\pm 130,0$  m e mantém o controle permanente das pressões na rede em padrões pré-estabelecidos, figura 4.6. A oscilação em torno do valor médio é devida principalmente a variação do consumo.

VIEGAS (2003) coletou dados de pressão à jusante da VRP, os quais foram discretizados em intervalos de 20 minutos, nesta pesquisa optou-se por utilizar o valor médio diurno (36,0 m) e noturno (26,0 m); pois estes são os valores regulados e acionados, respectivamente, pela válvula piloto, das 7:40 às 21:00 h; e pela unidade controladora das 21:05 às 7:35 h. Estas regras de operação garantem uma redução média nas pressões de 4 % no período diurno e de 37 % no noturno.



Figura 4.5 – VRP no setor do bairro Nossa Senhora de Lourdes.

Fonte: VIEGAS (2003), Figura 3.2 VRP instalada no setor B.N.S. Lourdes.

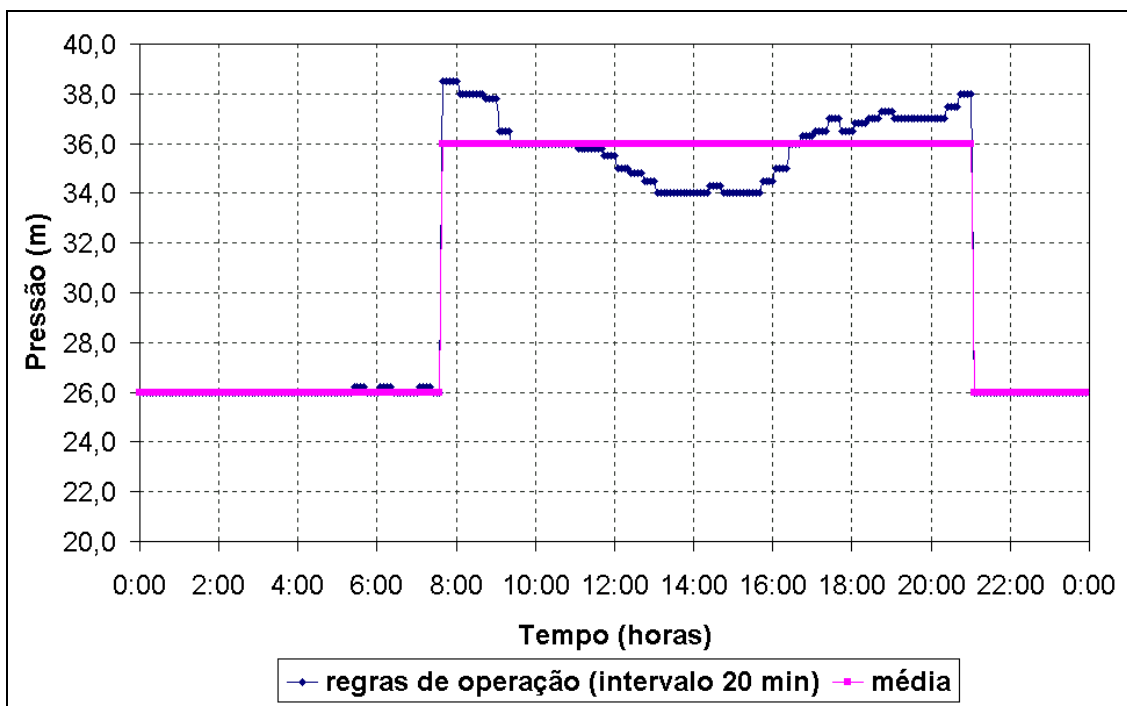


Figura 4.6 – Regras de operação da VRP.

#### 4.1.2 Levantamentos e Ensaio de Campo

Nesta pesquisa foram utilizados os levantamentos e ensaios de campo, citados a seguir, realizados por VIEGAS (2003); que propôs metodologias para



determinar as perdas físicas de água neste setor de distribuição do bairro Nossa Senhora de Lourdes e suas imediações, em Santa Maria – RS:

- revisão cadastral da rede de distribuição do setor;
- determinação espacial da distribuição dos consumidores;
- determinação das propriedades dos 233 nós: cota, demanda base, coeficiente de perdas (quadro 8.1 Apêndice A);
- determinação das propriedades dos 242 trechos: nó início e fim, comprimento, diâmetro, coeficiente rugosidade (quadro 8.2 Apêndice A);
- determinação de parâmetros para modelagem hidráulica (item 4.2.3.1);
- revisão de válvulas de contorno do distrito hidráulico para garantir a estanqueidade da área;
- testes de vazão, nos trechos 202, 77 e 21, com tubo Pitot tipo Cole; acoplado a registrador gráfico, figuras 4.7 e 4.8, que registra continuamente as deflexões (carga cinética) no centro da tubulação e transforma-as em vazão com precisão de 2,0 à 4,0 %, no intervalo de velocidade central de 0,3 à 2,0 m/s;
- testes de pressão, nos nós de entrada dos sub-setores (164, 20 e 73), com coletores de dados Metrolog, figura 4.8; precisão e resolução de 0,5 % no fundo da escala. Simultaneamente, coletaram-se dados de pressão em outros 7 nós representativos do setor, figura 4.9 e quadro 4.1, localização dos nós e trechos de teste, utilizados nesta pesquisa.

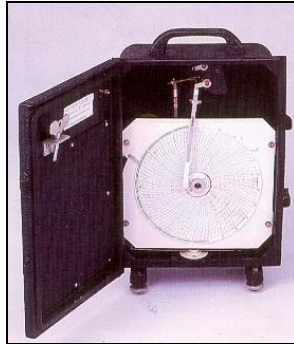


Figura 4.7 – EP11 e macromedidor na entrada do setor.

Fonte: VIEGAS (2003), Figura 3.3 Estação de medição de vazão e pressão. Figura 3.8 Tipo do Macromedidor instalado no setor.



Tubo Pitot tipo Cole



Registrador Gráfico



Coletor de Dados Metrolog

Figura 4.8 – Equipamentos de medição de vazão e pressão.

Fonte: VIEGAS (2003), Figura 3.7 Equipamentos de medição de vazão. Figura 3.9 Registrador de pressão.

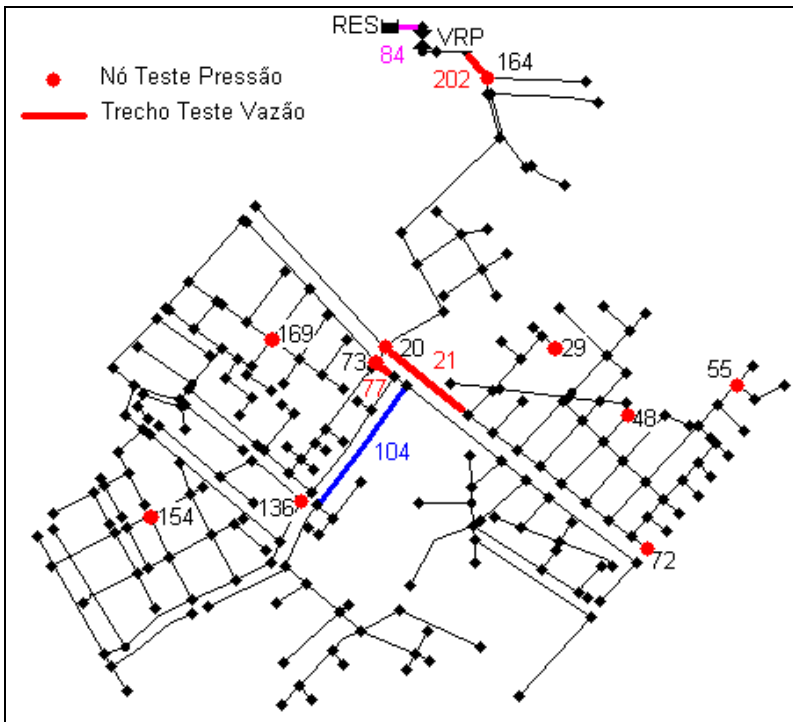


Figura 4.9 – Localização dos nós e trechos de teste.

O trecho 84, entre o reservatório hipotético (RES) e a VRP, e o trecho 104 estão destacados na figura 4.9, no entanto, não são trechos de teste de vazão, apenas serão utilizados nas simulações: para efeito de comparação entre as vazões de demanda e de vazamento (trecho 84) e verificação da perda de carga máxima (trecho 104).

Quadro 4.1 – Localização dos nós e trechos de teste.

<b>Nó</b>	<b>Local</b>	<b>Trecho</b>	<b>Local</b>
164	Posto Bambino	202	Posto Bambino
20	Fernando Ferrari Esquerda (FFE)	77	FFD (entrada Sub-setor 2)
73	Fernando Ferrari Direita (FFD)	21	FFE (entrada Sub-setor 1)
72	FFE c/ BR 158		
55	Israel Seligmann, 591		
29	Ivan Coelho, 50		
48	Francisco Crossetti		
154	Anchieta/3 de maio		
169	Conrado Hoffman/19 de Novembro		
136	Tamanday/Rigoberto Duarte		

## **4.2 Aplicação do modelo EPANET**

O modelo EPANET foi configurado para simular a vazão de demanda e de vazamento (perda física) implicitamente com os cálculos, sendo realizados concomitantemente, onde a vazão de vazamento é dependente da pressão e a demanda dos coeficientes de variabilidade.

### **4.2.1 Componentes Físicos**

O modelo EPANET simula um sistema de distribuição de água como sendo um conjunto de trechos ligados a nós. Os trechos representam as tubulações e as válvulas redutoras de pressão. Os nós representam as conexões e os reservatórios.

Os nós são os pontos da rede onde os trechos se interligam e onde a água entra e sai da rede. Os principais dados de entrada para os nós são: cota geométrica; demanda base (inicial); coeficiente de perdas e demanda variável no tempo.

Os reservatórios são nós especiais da rede, possuindo uma capacidade de armazenamento limitada e podendo o volume de água armazenada variar

ao longo da simulação. Um reservatório é definido pelas seguintes propriedades principais: cota do fundo; diâmetro (ou forma, se não for cilíndrico); altura de água inicial, mínima e máxima.

As tubulações são trechos que transportam água entre os vários pontos da rede. O modelo EPANET considera que o escoamento ocorre em pressão em todas as tubulações, ao longo da simulação. O escoamento ocorre dos pontos com carga hidráulica mais elevada para os pontos com carga hidráulica mais baixa. Os principais parâmetros a inserir nas propriedades das tubulações são: nó inicial e final; diâmetro; comprimento; coeficiente de rugosidade e estado inicial de operação, opção de estado padrão: *aberto* para trechos e bombas ou *ativo* para válvulas.

#### **4.2.2 Componentes Não Físicos**

Adicionalmente aos componentes físicos, o modelo EPANET permite definir categorias de informação sobre a rede: padrões e controles, que descrevem o comportamento e os aspectos operacionais de um sistema de distribuição de água.

Os padrões temporais foram configurados para estabelecer um conjunto de coeficientes: de variabilidade da demanda ( $k_{VD}$ ) para cada um dos três sub-setores; de variabilidade da pressão no reservatório ( $k_{VP}$ ), e de variabilidade da vazão na VRP; em intervalos de tempo de 5 minutos, indicados no quadro 8.3 Apêndice A.

Os controles são instruções que estabelecem o modo como a rede opera ao longo do tempo, estes foram aplicados para simular as variações de pressão impostas no setor em estudo, pela válvula redutora de pressão. O formato de entrada das regras de operação da VRP é apresentado no quadro 8.4 Apêndice A; permitindo estabelecer os horários de acionamento da válvula piloto e da unidade controladora, conforme figura 4.6.

### 4.2.3 Procedimentos de Calibração da Vazão

A calibração da vazão de demanda e de vazamento, no modelo EPANET, foi obtida pela correlação entre os valores simulados e os dados observados nos 3 trechos de teste, 202, 77 e 21, figura 4.9.

A vazão simulada no modelo é composta da vazão de vazamento dependente das pressões dos nós e pela demanda ajustada através de um processo de iterações descrito a seguir, adaptado de VIEGAS (2003).

A partir do cadastro comercial da Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) obteve-se o número de economias controladas e os consumos medidos, referentes aos três sub-setores. Os dados comerciais permitiram equacionar a demanda máxima, média para cada sub-setor  $i$ , como:

$$D_{Mi} = \frac{V_{Di} \cdot k_1 \cdot k_2}{Ec_i \cdot 86,4} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.1)$$

onde:  $D_{Mi}$  = demanda máxima-média no sub-setor  $i$  (L/s/economia);  $V_{Di}$  = volume diário no sub-setor  $i$  (m<sup>3</sup>/dia);  $Ec_i$  = n° de economias controladas no sub-setor  $i$ ; 86,4 = fator de correção de unidades;  $k_1 = 1,22$  e  $k_2 = 1,50$ , respectivamente, coeficiente do dia de maior consumo e da hora de maior demanda para a cidade de Santa Maria – RS, fornecidos pela CORSAN.

Então, adotou-se esta demanda máxima-média para todas as economias do sub-setor  $i$  correspondente, possibilitando o cálculo da demanda base ( $D_B$ ) para cada nó  $j$ , conforme a equação (4.2).

$$D_{Bk} = D_{Mi} \cdot Ec_j \quad j = 1, 2 \dots 233 \quad (4.2)$$

onde:  $D_{Bk}$  = demanda base na iteração  $k$  (L/s);  $Ec_j$  = n° de economias no nó  $j$ .

Os coeficientes de variabilidade das demandas foram definidos para cada sub-setor  $i$ , pela equação (4.3).

$$k_{VDk} = \frac{Q_{OBS}}{\overline{Q_{OBS}}} \quad (4.3)$$

onde:  $k_{VDk}$  = coeficiente de variabilidade da demanda na iteração  $k$ ;  $Q_{OBS}$  = vazão observada;  $\overline{Q_{OBS}}$  = vazão observada média no período extenso de 72 h, discretizados em intervalos  $\Delta t = 5$  min.

Após cada simulação hidráulica, o modelo EPANET gera um relatório contendo os erros de calibração; sendo que as vazões simuladas devem estar dentro de  $\pm 5\%$  das vazões observadas (WALSKI, CHASE & SAVIC, 2001a).

O procedimento prévio para a iteração  $k+1$  é a determinação dos fatores de correção da demanda, pela diferença entre as vazões simuladas e observadas para cada intervalo de tempo.

$$F_{CDk} = Q_{SIMk} - Q_{OBS} \quad (4.4)$$

onde:  $F_{CDk}$  = fator de correção da demanda na iteração  $k$  (L/s);  $Q_{SIMk}$  = vazão simulada pelo modelo EPANET na iteração  $k$  (L/s).

Na iteração  $k+1$  inicia-se o procedimento de correção das demandas e dos coeficientes de variabilidade. As demandas foram corrigidas a partir da diferença entre as demandas simuladas e os fatores de correção da demanda.

$$D_{Ck} = D_{SIMk} - F_{CDk} \quad (4.5)$$

$$D_{SIMk} = k_{VDk} \cdot \sum D_{Bk} \quad (4.6)$$

onde:  $D_{Ck}$  = demanda corrigida na iteração  $k$  (L/s);  $D_{SIMk}$  = demanda simulada pelo modelo EPANET na iteração  $k$  (L/s).

As demandas corrigidas foram atribuídas ponderadamente aos 233 nós da rede conforme equação (4.7).

$$D_{Bk+1} = D_{Bk} \frac{\overline{D_{Ck}}}{\overline{D_{SIMk}}} \quad (4.7)$$

onde:  $D_{Bk+1}$  = demanda base na iteração  $k+1$  (L/s);  $\overline{D_{Ck}}$  = demanda corrigida média na iteração  $k$  (L/s);  $\overline{D_{SIMk}}$  = demanda simulada média na iteração  $k$  (L/s).

Os coeficientes de variabilidade das demandas também foram corrigidos para cada sub-setor  $i$ , pela equação (4.8).

$$k_{VDk+1} = \frac{D_{Ck}}{D_{Ck}} \quad (4.8)$$

onde:  $k_{VDk+1}$  = coeficiente de variabilidade da demanda na iteração  $k+1$ .

A simulação hidráulica do modelo calibrado após sucessivas iterações permite gerar simultaneamente vazão de demanda e de vazamento ( $Q_{SIM}$ ), e

somente vazão de demanda ( $D_{SIM}$ ) conforme equação (4.9), quando a vazão de vazamento ( $Q_{VAZ}$ ) é considerada nula.

$$Q_{SIM} = D_{SIM} + Q_{VAZ} \quad (4.9)$$

$$D_{SIMj} = D_{Bj} \cdot k_{VDi} \quad (4.10)$$

onde:  $D_{Bi}$  = demanda base no nó  $j$  (L/s);  $k_{VDi}$  = coeficiente de variabilidade da demanda no sub-setor  $i$ .

O modelo EPANET simula a vazão de vazamento através de dispositivos emissores associados a nós, que modelam o escoamento através de orifícios ou fissuras, com descarga direta para a atmosfera. A vazão nestes dispositivos varia em função da pressão do nó, de acordo com a relação pressão versus vazamento:

$$Q_{VAZij} = (C_d \cdot L_{ij}) \cdot P_j^N = a \cdot P_j^N \quad (4.11)$$

onde:  $C_d$  = coeficiente de descarga;  $L_{ij}$  = comprimento do trecho entre os nós  $i$  e  $j$  (m);  $P_j$  = pressão do nó  $j$  (m);  $N$  = expoente do emissor;  $a$  = coeficiente de perdas no nó  $j$ .

Na figura 4.10, apresenta-se o resumo do procedimento de iterações descrito.

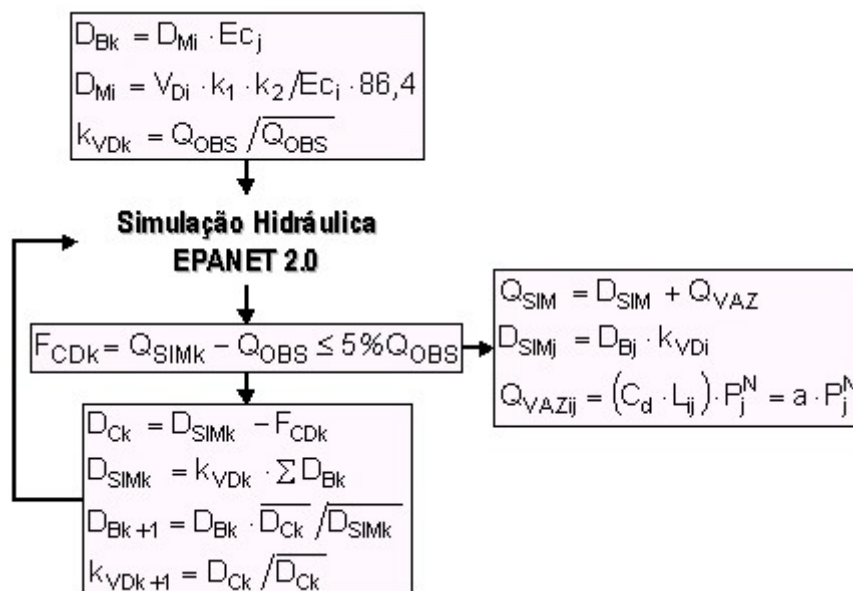


Figura 4.10 – Procedimento de calibração das vazões.

#### 4.2.3.1 Determinação dos parâmetros "N" e "C<sub>d</sub>"

VIEGAS (2003) determinou os parâmetros da relação pressão versus vazamento,  $N = 0,611$  e  $C_d = 5,3985 \times 10^{-5}$ , no setor de distribuição em estudo, utilizando o método proposto por SILVA et al. (2000). Este método consiste na implantação, na entrada do setor, de estação para medir vazão e pressão noturnas; seleção de nós representativos da rede para monitorar pressão e vazão, no período de teste; geração de estágios de vazão e pressão no período entre 3:00 e 5:00 h, através de manobras na VRP na entrada do setor.

Nesta pesquisa foram simuladas 5 redes, numeradas de 1 a 5, no modelo EPANET com diferentes pares de "N" e "C<sub>d</sub>". A fim de verificar a variação nas pressões e conseqüentemente nos vazamentos, devido às manobras na VRP, de fechamento gradativo na unidade controladora, simulada das 21:05 às 7:35 h.

Sendo adotado na rede N° 5 o valor final dos parâmetros determinado por VIEGAS (2003) e nas demais redes os 4 pares intermediários, indicados no quadro 4.2. Estes últimos calculados através de uma planilha Excel, pelas equações (4.12) e (4.13), com base nos dados de campo obtidos nos nós representativos, figura 4.11.

$$N = \frac{\ln(Q_m/Q_0)}{\ln(P_m/P_0)} \quad (4.12)$$

$$C_d = \frac{(Q_0 - Q_m)}{L_T (P_0 - P_m)^N} \quad (4.13)$$

onde:  $Q_0$  = vazão observada (L/s) correspondente ao nível inicial de pressão  $P_0$  (m.c.a.), VRP totalmente aberta;  $Q_m$  = vazão observada (L/s) correspondente ao nível de pressão  $P_m$  (m.c.a.);  $m$  = índice que denota o fechamento gradativo da VRP existente (7/8, 3/4, 5/8, 1/2);  $L_T$  = extensão total da rede de 28.238 m.

Nos quadros 8.5 a 8.9 Apêndice B, estão os dados observados nestes nós representativos e os resultados dos cálculos dos parâmetros "N" e "C<sub>d</sub>".



Quadro 4.2 – Parâmetros da relação pressão versus vazamento.

Rede	Manobra	N	$C_d$
1	35 (7/8)	0,811	$2,9250 \times 10^{-5}$
2	30 (3/4)	0,726	$3,8052 \times 10^{-5}$
3	25 (5/8)	0,699	$4,9782 \times 10^{-5}$
4	20 (1/2)	0,673	$6,1806 \times 10^{-5}$
<b>5</b>	<b>Valor Final</b>	<b>0,611</b>	<b><math>5,3985 \times 10^{-5}</math></b>

Durante a simulação partiu-se da hipótese que a vazão de vazamento está distribuída ao longo de todos os 242 trechos da rede (28.328 m). Sendo atribuída ao nó de jusante de cada trecho, através da propriedade do nó: coeficiente de perdas (a), que segundo a equação (4.11) é proporcional ao comprimento de cada trecho, uma vez que o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) é constante, quadro 4.2.

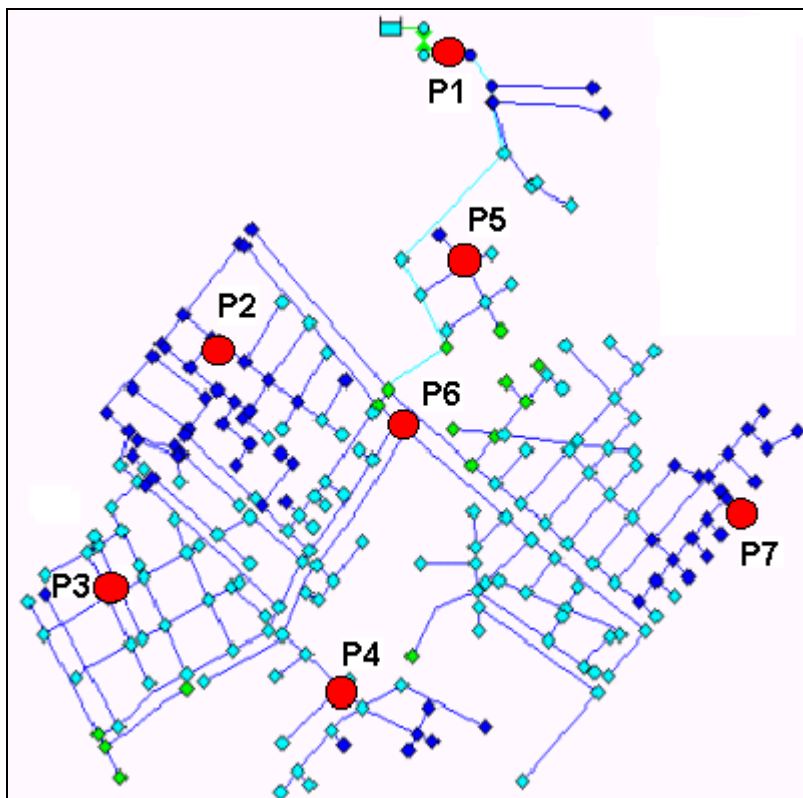


Figura 4.11 – Distribuição dos nós representativos na rede.

Fonte: Adaptada de VIEGAS (2003), Figura 4.4 Distribuição dos pontos representativos na rede.

#### 4.2.4 Procedimentos de Calibração da Pressão

A calibração das pressões foi realizada após a calibração das vazões. Os 10 nós de teste (164, 20, 73, 72, 55, 29, 48, 154, 169 e 136) foram utilizados para verificar a correlação entre os dados observados e simulados.

O parâmetro de calibração das pressões é basicamente o coeficiente de rugosidade,  $\varepsilon$ . No quadro 4.3, estão indicados os valores de  $\varepsilon$  adotados inicialmente, para a configuração da perda de carga das tubulações.

Quadro 4.3 – Coeficiente de rugosidade adotados.

Material	$\varepsilon$ (mm)
Cimento amianto ( $\approx$ FoCo)	0,025
PVC	0,0015

Uma vez que as vazões estejam calibradas, as velocidades simuladas pelo modelo EPANET também estão. Logo, partiu-se destes valores de velocidades, para ajustar os coeficientes de rugosidade nos trechos compreendidos entre dois nós de teste.

Estas velocidades simuladas nos respectivos trechos, foram utilizadas numa planilha Excel no cálculo: do fator de atrito, do número de Reynolds e da perda de carga nos trechos; assim como da pressão do nó de teste e do relativo erro médio absoluto.

No cálculo do fator de atrito utilizou-se a equação geral (4.14), válida para os escoamentos: laminar, turbulento liso, de transição e turbulento rugoso proposta SWAMEE (1993) apud PORTO (1998), na forma:

$$f = \left\{ \left( \frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left( \frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4.14)$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (4.15)$$

onde:  $f$  = fator de atrito;  $Re$  = número de Reynolds;  $\varepsilon$  = coeficiente de rugosidade (mm);  $D$  = diâmetro do trecho (m);  $V$  = velocidade simulada pelo modelo EPANET (m/s);  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  = viscosidade cinemática da água, a temperatura de 20°C.

Segundo PORTO (1998) a fórmula da Hazen-Williams, deve ser vista com reservas, a despeito de sua popularidade entre projetistas. Em problemas de condução de água, que pela sua importância exija avaliação das perdas de cargas tão rigorosa quanto possível, diante da incerteza sobre o tipo de escoamento turbulento, recomenda-se a fórmula de Darcy-Weisbach (4.16):

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4.16)$$

onde:  $h_L$  = perda de carga (m);  $L$  = comprimento do trecho (m);  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  = aceleração da gravidade.

O modelo simula as pressões dos nós conforme a equação (4.17), e no reservatório hipotético (RES) pela equação (4.18).

$$P_{SIMj} = P_{SIMi} - h_{Lij} - (Z_j - Z_i) \quad (4.17)$$

$$P_{RES} = Z_{RES} \cdot (k_{VP} - 1) \quad (4.18)$$

onde:  $P_{SIM}$  = pressão simulada pelo modelo EPANET (m);  $Z_j$  = cota do nó  $j$  (m);  $k_{VP}$  = coeficiente de variabilidade da pressão;  $i, j, RES$  = índices que denotam os nós  $i, j$  e o reservatório, respectivamente.

Obtém-se a pressão do nó  $j$  de teste, pela equação (4.17), sendo a perda de carga igual ao somatório de todas as perdas de carga existentes nos trechos compreendidos entre dois nós de teste; onde o primeiro nó  $i$  considerado é o reservatório de pressão conhecida, dada pela equação (4.18).

O erro médio absoluto entre cada valor observado e simulado, no período de simulação, é igual ao desvio absoluto médio em relação ao valor simulado. Onde os testes de medição de campo devem estar dentro  $\pm 2,0 \text{ m}$  ou  $\pm 15 \%$  da perda de carga máxima através do sistema, qualquer que seja o maior (WALSKI, CHASE & SAVIC, 2001a).

A ferramenta Solver da planilha Excel foi utilizada para auxiliar no ajuste dos coeficientes de rugosidade dos trechos entre dois nós de teste. A célula

definida como destino foi o erro médio absoluto, as variáveis os coeficientes de rugosidade.

Se atribuído o valor de  $\varepsilon = 0,0$  mm (tubo liso), o modelo EPANET retorna a mensagem erro "202: *An illegal numeric value was assigned to a property*"; logo, para que haja a simulação o coeficiente de rugosidade deve ser maior do que zero.

### **4.3 Minimização dos Vazamentos**

Com o objetivo de reduzir a vazão de vazamento média e melhorar o desempenho operacional do setor de distribuição em estudo, as seguintes intervenções são simuladas e comparadas com a rede calibrada correspondente, a fim de verificar a redução teórica dos vazamentos: o ajuste na VRP existente, a substituição de trechos, a setorização da rede e a instalação de nova VRP.

#### **4.3.1 Ajuste na VRP Existente**

A válvula redutora de pressão que gerencia a pressão no setor em estudo possui basicamente quatro regras de operação (manobras), ou seja: aberta, fechada e duas opções semi-abertas (intermediárias).

A válvula opera nestas duas opções de manobra semi-aberta, de 26,0 m, acionada pela unidade controladora no horário de menor consumo (21:05 – 7:35 h), e 36,0 m, pela válvula piloto no horário de maior consumo (7:40 – 21:00 h), conforme o perfil da figura 4.6, item 4.1.1. Logo, são estes os valores que podem ser otimizados, no entanto a redução ou aumento destes valores implica em alterações nas condições de operação em outros setores de distribuição a montante.

As VRP's atuam em sistemas de abastecimento de água com o intuito de reduzir as perdas e desperdícios à jusante de sua área de influência. Conseqüentemente, a montante há uma recuperação nas condições de operação em termos de pressão e vazão disponíveis, ou seja, o volume de água que deixa de ser perdido por vazamento pode garantir, por exemplo, o abastecimento em algum ponto crítico.

### 4.3.2 Substituição de Trechos

A partir da simulação hidráulica no modelo EPANET previamente calibrado, pode-se verificar se o setor em estudo está operando adequadamente, isto é, se atende as recomendações da NBR 12218 (1994).

Nos pré-dimensionamentos dos diâmetros em redes ramificadas e malhadas, é usual a utilização da equação empírica (4.19) ou quadro 4.4, no cálculo da velocidade máxima admissível ( $V_{m\acute{a}x}$ ).

$$V_{m\acute{a}x} = 0,6 + 1,5 \cdot D \quad (4.19)$$

Quadro 4.4 – Velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento.

D (mm)	50	75	100	150	200	250	300	350
$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)	0,68	0,71	0,75	0,83	0,90	0,98	1,05	1,13
$Q_{m\acute{a}x}$ (L/s)	1,34	3,14	5,89	14,67	28,27	47,86	74,22	108,72

Tendo os diâmetros de todos os 242 trechos, no qual o setor em estudo foi discretizado, e as velocidades simuladas no modelo EPANET calibrado pode-se, portanto compará-las aos resultados da equação (4.19) ou quadro 4.4. Deste modo, verifica-se a existência de trechos operando super ou subdimensionados, e pode-se sugerir a substituição de trechos e/ou reforço de parte da rede que opera de modo insatisfatório, considerando a situação mais desfavorável em relação as vazões e as velocidades, o horário de maior consumo.

### 4.3.3 Setorização da Rede

Segundo YOSHIMOTO, TARDELLI FILHO & SARZEDAS (1999), na implantação de um sistema de abastecimento, pela setorização clássica, a definição das zonas de pressão é feita tomando como base à limitação da pressão estática máxima em 50,0 m.c.a. no ponto mais baixo da zona de pressão e a limitação da pressão dinâmica mínima em 10,0 m.c.a. no ponto crítico da zona de pressão.

O ponto crítico é aquele, dentro da zona de pressão, onde se verifica a menor pressão dinâmica, isto é, o ponto mais elevado ou o mais distante. Com o passar do tempo o ponto crítico pode se deslocar devido ao aumento de rugosidade em função da idade da tubulação, tendendo a se localizar inicialmente no ponto mais alto da zona de pressão e futuramente nos pontos mais distantes em relação ao referencial de pressão (reservatório, booster ou VRP). Ele é utilizado para se estimar o potencial de redução de pressão da área, além de ser um ponto de controle do abastecimento. A mínima pressão aceitável neste ponto pode variar entre as companhias de água, entretanto, em muitas áreas, a pressão mínima das redes de distribuição, de 10,0 a 15,0 m.c.a., manterá o abastecimento de forma satisfatória.

Definidas as zonas de pressão e fracionados os sub-setores, também, denominados distritos de manutenção ou operação, garantir-se-á:

- redução do volume de perdas de água nas ações de manutenção pelo menor volume de escoamento nos períodos de interrupções;
- melhoria na qualidade do atendimento pelo fato do isolamento de menores áreas de influência;
- melhor configuração para aplicações em pesquisas de vazamentos devido à diminuição da área a ser pesquisada.

Na figura 4.12, são apresentadas as curvas de nível do setor em estudo, e indicados o nó 166 de menor cota (81,0 m) e os nós 21 e 186 de maior cota (145,0 m); ambos de interesse na determinação da setorização.

As cotas geométricas foram coletadas a partir de dados existentes de um levantamento aerofotográfico de 1979, em plantas com curvas de nível de 2,0 em 2,0 m.

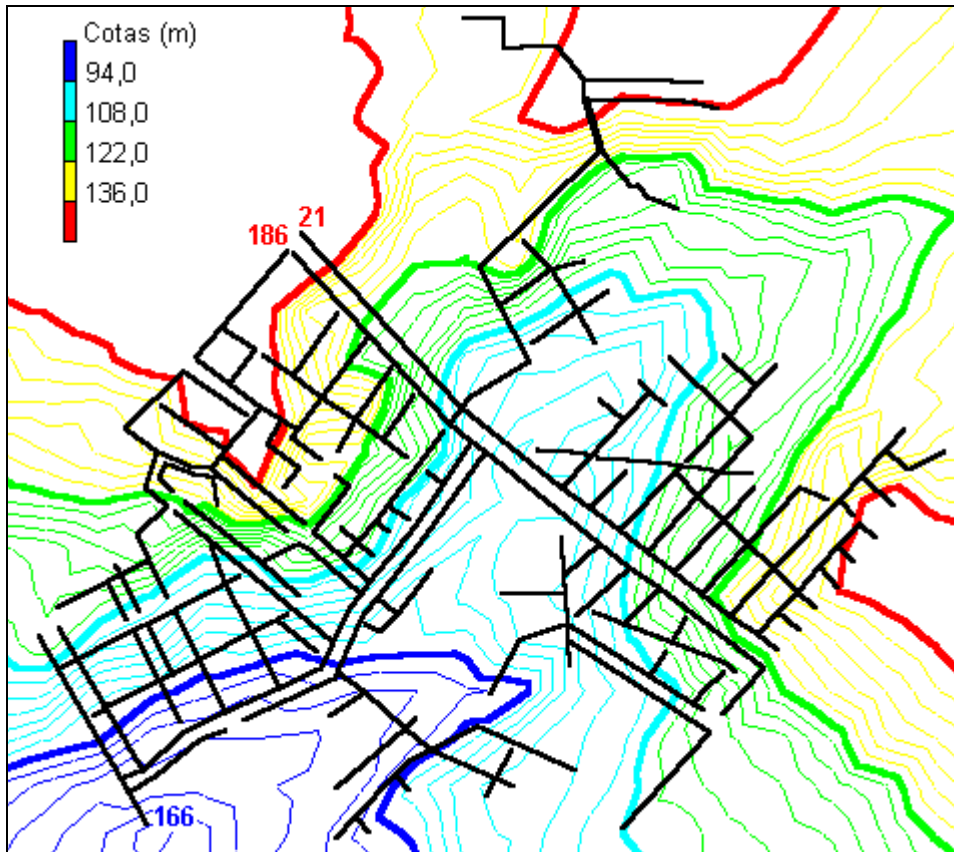


Figura 4.12 – Curvas de nível do setor em estudo.

#### 4.3.4 Instalação de Nova VRP

Cada fabricante tem sua metodologia para o dimensionamento de uma nova válvula, mas, de maneira geral, a velocidade mínima deve ser de 1,2 m/s e a máxima de 7,5 m/s, referentes ao diâmetro nominal da válvula, quadro 4.5.

O diâmetro escolhido deve ser aquele com a vazão máxima nominal igual ou maior que a vazão máxima horária do local a ser controlado. A vazão mínima nominal não poderá ser maior que a vazão mínima horária. Caso isso ocorra, deve-se utilizar uma segunda VRP de diâmetro menor (dimensionada

para operar com as vazões mínimas) em paralelo a VRP principal, onde a somatória das vazões máximas seja superior à vazão máxima requerida.

Quadro 4.5 – Diâmetro nominal da VRP.

Diâmetro Nominal		Vazão (m <sup>3</sup> /h)		Cv
(mm)	(polegada)	mínima	máxima	
32	1 ¼	3	26	8,40
38	1 ½	5	36	9,09
50	2	8	59	12,49
65	2 ½	14	84	21,58
80	3	22	129	28,39
100	4	34	227	49,97
150	6	76	522	104,48
200	8	136	886	190,79
250	10	212	1.363	317,98
300	12	305	1.953	392,93
350	14	416	2.385	522,40
400	16	543	3.180	670,03

É necessário verificar se a válvula escolhida não produz uma perda de carga superior à perda desejada (pressão de entrada mínima menos a pressão de saída) durante a vazão máxima horária. A perda de carga a ser produzida pela válvula totalmente aberta é determinada através da equação (4.20):

$$\Delta P = \left( \frac{Q}{Cv} \right)^2 \quad (4.20)$$

onde:  $\Delta P$  = perda de carga da válvula totalmente aberta (m.c.a.); Q = vazão (m<sup>3</sup>/h); Cv = coeficiente de perda de carga relativo a vazões, quadro 4.5.

Caso a perda de carga da válvula seja superior ou fique muito próxima da perda desejada, escolher a válvula com diâmetro nominal imediatamente superior e recalcular. Caso os valores fiquem muito próximos, é preciso verificar a perda de carga dos demais elementos do sistema.

Ainda é necessário verificar o risco de cavitação da válvula. Utilizando a figura 4.13, faz-se o cruzamento da pressão máxima de entrada da VRP com a pressão de saída requerida. Caso o ponto de cruzamento caia dentro da área sombreada, é sinal de que haverá, além de ruídos, danos físicos à válvula. Nesse caso deve-se prever instalação em série de válvulas com o mesmo



diâmetro, ou rever a concepção, criando-se mais de um plano piezométrico na área onde se pretende reduzir a pressão.

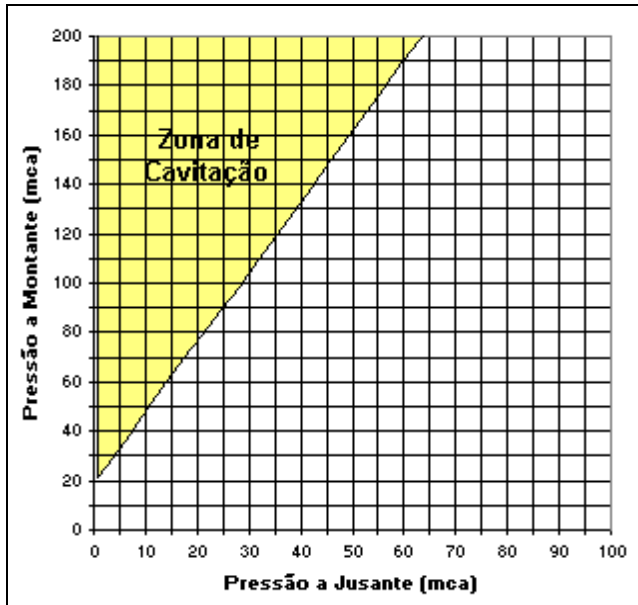


Figura 4.13 – Verificação de cavitação.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões desta pesquisa foram organizados em 4 seções. Na primeira, apresenta-se a calibração de vazão nos 3 trechos de teste. Na segunda, mostra-se a calibração de pressão nos 10 nós de teste. Na terceira, simula-se as intervenções descritas nos itens 4.3.1 a 4.3.4, comparando-as com a rede calibrada correspondente, com o objetivo de quantificar a redução dos vazamentos.

As figuras e os quadros apresentados, nas seções 5.1 a 5.3, se referem à rede modelada N° 5, com o valor final de "N" e "C<sub>d</sub>" determinado por VIEGAS (2003), ou seja,  $N = 0,611$  e  $C_d = 5,3985 \times 10^{-5}$ .

Na seção 5.4, apresenta-se o resumo dos resultados obtidos para as outras 4 redes simuladas utilizando os valores intermediários de "N" e "C<sub>d</sub>" do quadro 4.2, com as correspondentes aberturas na unidade controladora, da VRP existente, das 21:05 às 7:35 h. A fim de verificar a variação nas pressões e conseqüentemente nos vazamentos, devido ao fechamento gradativo (manobras) da válvula.

### 5.1 *Calibração da Vazão*

As vazões de demanda e de vazamento foram calibradas nos 3 trechos de teste: 202, 77 e 21 (figura 4.9), através de ajustes na demanda base (D<sub>B</sub>), de acordo com o item 4.2.3. Sendo os vazamentos distribuídos proporcionalmente ao comprimento dos trechos nos relativos nós de jusante, pelo coeficiente de perdas.

Após 5 iterações o erro médio absoluto foi praticamente nulo (0,005 L/s). No entanto, nesta etapa ainda não haviam sido calibrados os coeficientes de rugosidade ( $\epsilon$ ). Após o ajuste dos mesmos, nos trechos entre dois nós de teste, foi necessária mais uma iteração (6ª) para que o erro fosse reduzido a 0,159 L/s, quadro 5.1. Permanecendo dentro dos limites recomendados pela

literatura, ou seja, quando a vazão no trecho de teste é maior que 10 % da demanda total média ( $D_{SIM}$  trecho 84 = 53,25 L/s), as vazões simuladas média devem estar dentro de  $\pm 5\%$  das vazões observadas média. Para o trecho de teste 202, neste caso, admite-se um erro médio absoluto de até 1,49 L/s ( $5\% \cdot 29,89$  L/s).

Quadro 5.1 – Estatística de calibração da vazão calculada pelo EPANET.

Location	Num Obs	Obs Mean	Comp Mean	Mean Error	RMS Error
202	863	29.89	30.15	0.263	0.312
21	863	3.74	3.70	0.047	0.057
77	863	8.69	8.53	0.167	0.205
Network	2589	14.11	14.13	0.159	0.218

Correlation Between Means: 1.000

onde: **Num Obs** = nº de observações; **Obs Mean** = média dos valores observados; **Comp Mean** = média dos valores simulados; **Mean Error** = erro médio absoluto entre cada valor observado e simulado, igual ao desvio absoluto médio em relação ao valor simulado; **RMS Error** = raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros entre os valores observados e simulados, desvio padrão em relação aos valores simulados).

As figuras 5.1 a 5.3 mostram graficamente os resultados obtidos na calibração das vazões para os 3 trechos de teste (202, 77 e 21); a partir dos dados observados em 7-8-9/agosto/2001, discretizado em intervalos de 5 minutos; portanto, simulação em período extenso de 72 horas.

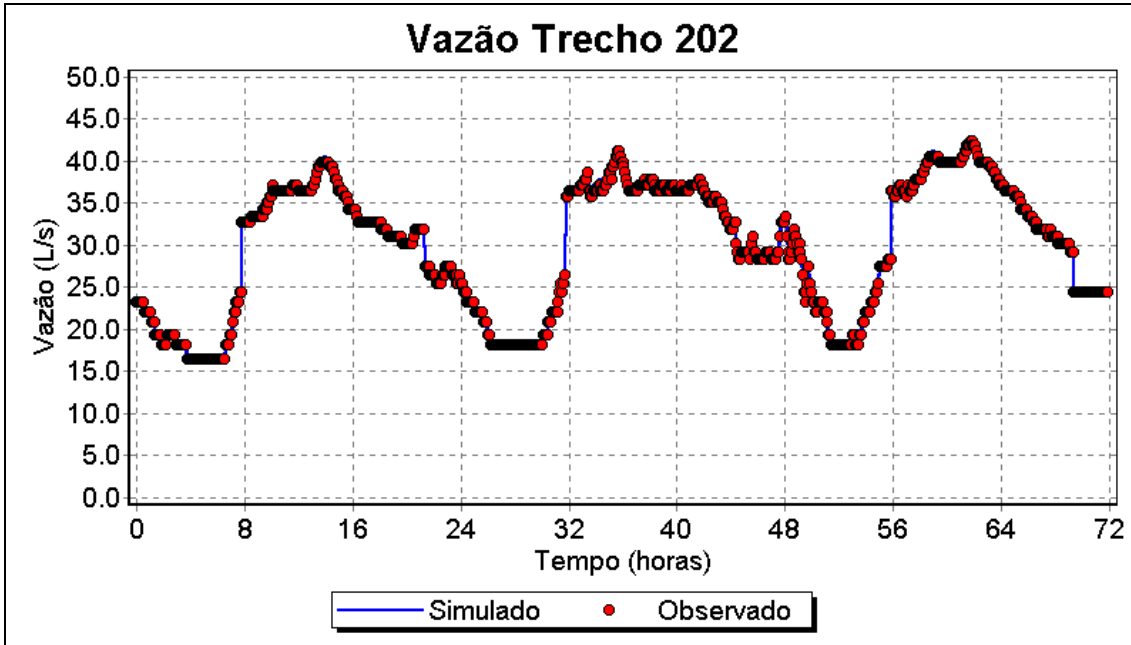


Figura 5.1 – Vazões simuladas e observadas trecho 202.

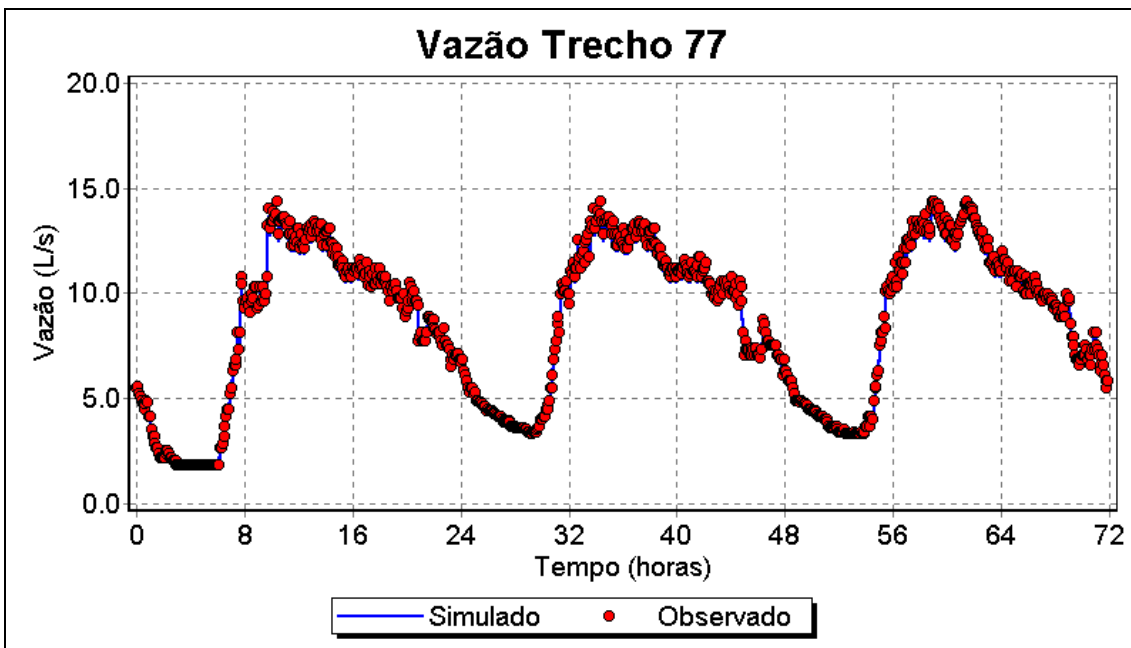


Figura 5.2 – Vazões simuladas e observadas trecho 77.

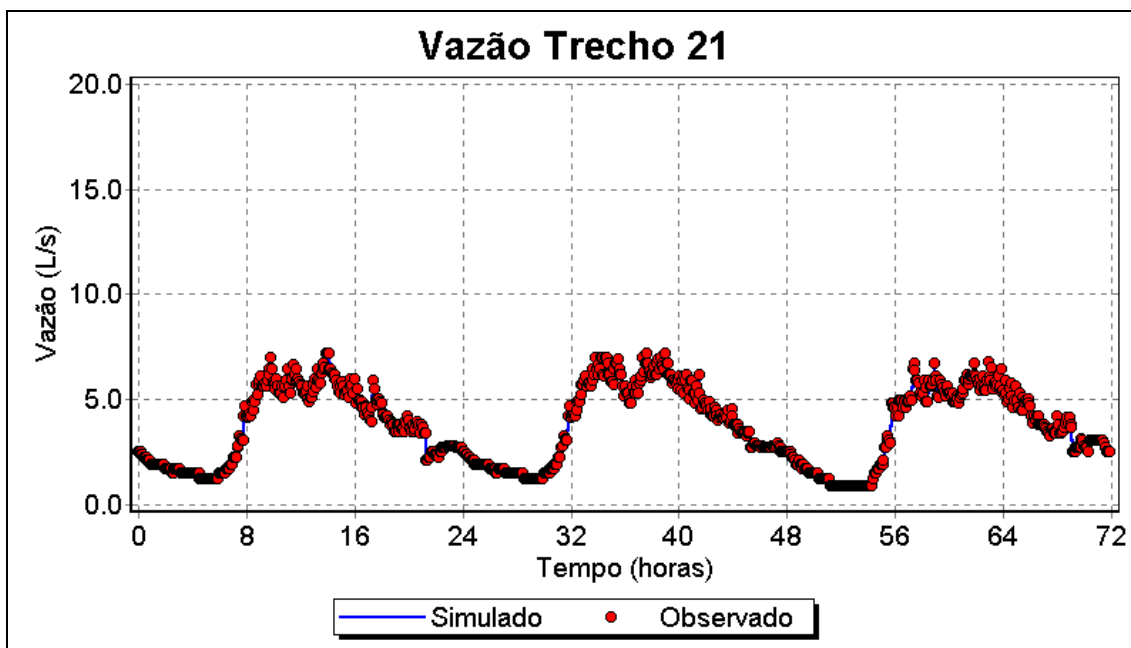


Figura 5.3 – Vazões simuladas e observadas trecho 21.

O quadro 5.2 apresenta os valores médios da vazão total distribuída (demanda e vazamento), da vazão de demanda e da vazão de vazamento.

A vazão de vazamento foi obtida pela diferença entre a vazão total e a vazão de demanda, isto é, simulou-se a rede: 1º com os valores correspondentes dos coeficientes de perdas (a) e 2º sem estes valores de a. Nesta última, simulou-se apenas a demanda da rede.

Para o sub-setor 3, as vazões foram calculadas a partir da diferença entre a vazão no trecho 84 (entrada setor) e as vazões nos trechos 21 (entrada sub-setor 1) e 77 (entrada sub-setor 2), figura 4.9. As porcentagens apresentadas, no quadro 5.2, foram calculadas em relação à vazão total distribuída (trecho 84).

A vazão de vazamento média no setor foi de 13,69 L/s, no período de simulação de 24 horas, o que representa 20,45 % da vazão total distribuída média de 66,94 L/s. O sub-setor 2 foi o que apresentou a maior porcentagem de perdas físicas de água, 10,89 %; isto se pode justificar devido a diferença de cotas dos nós neste sub-setor (44,0 m entre nó 166 e RES), figura 4.12, em relação à entrada d'água no setor.

Quadro 5.2 – Valores médios da vazão (L/s) e relativas porcentagens.

Sub-setor	Q <sub>SIM</sub>	%	D <sub>SIM</sub>	%	Q <sub>VAZ</sub>	%
1	3,67	5,48%	1,08	1,61%	2,59	3,87%
2	8,08	12,07%	0,79	1,18%	7,29	10,89%
3	55,19	82,45%	51,38	76,76%	3,81	5,69%
Trecho 84	66,94	100,00%	53,25	79,55%	13,69	20,45%

onde: Q<sub>SIM</sub> = vazão total distribuída (demanda e vazamento) (L/s);  
D<sub>SIM</sub> = vazão de demanda (L/s); Q<sub>VAZ</sub> = vazão de vazamento (L/s).

As figuras 5.4 a 5.7 apresentam os perfis das vazões simuladas com demanda e vazamento (Q<sub>SIM</sub>) e somente com demanda (D<sub>SIM</sub>), nesta última desconsiderando os coeficientes de perdas, pela equação (4.11) tem-se a vazão de vazamento automaticamente nula.

Os valores negativos nas figuras 5.4 e 5.5 indicam que não há consumo no sub-setor 1 e 2 respectivamente, nestes instantes verifica-se no modelo que o escoamento ocorre em sentido inverso, ou seja, retornando ao reservatório hipotético (RES).

Com a vazão de vazamento média e o somatório dos coeficientes de perdas de cada sub-setor, aplicados na equação (4.11), obtém-se a pressão média que causa os vazamentos em cada sub-setor, indicados no quadro 5.3.

Este valor da pressão média pode auxiliar na identificação de nós passíveis de vazamentos em cada sub-setor numa pesquisa de campo, isto é, buscar-se-ão nós com pressões maiores ou iguais a estas.

Quadro 5.3 – Pressão de vazamento média dos sub-setores

Sub-setor	L (m)	a = C <sub>d</sub> .L	Q <sub>VAZ</sub> (L/s)	P <sub>VAZ</sub> (m)
1	5.387	0,29083	2,59	35,85
2	13.388	0,72278	7,29	43,93
3	9.553	0,51572	3,81	26,39
Σ	28.328	1,52933	13,69	36,14

onde: N = 0,611 e C<sub>d</sub> = 5,3985 x 10<sup>-5</sup>, na equação (4.11).

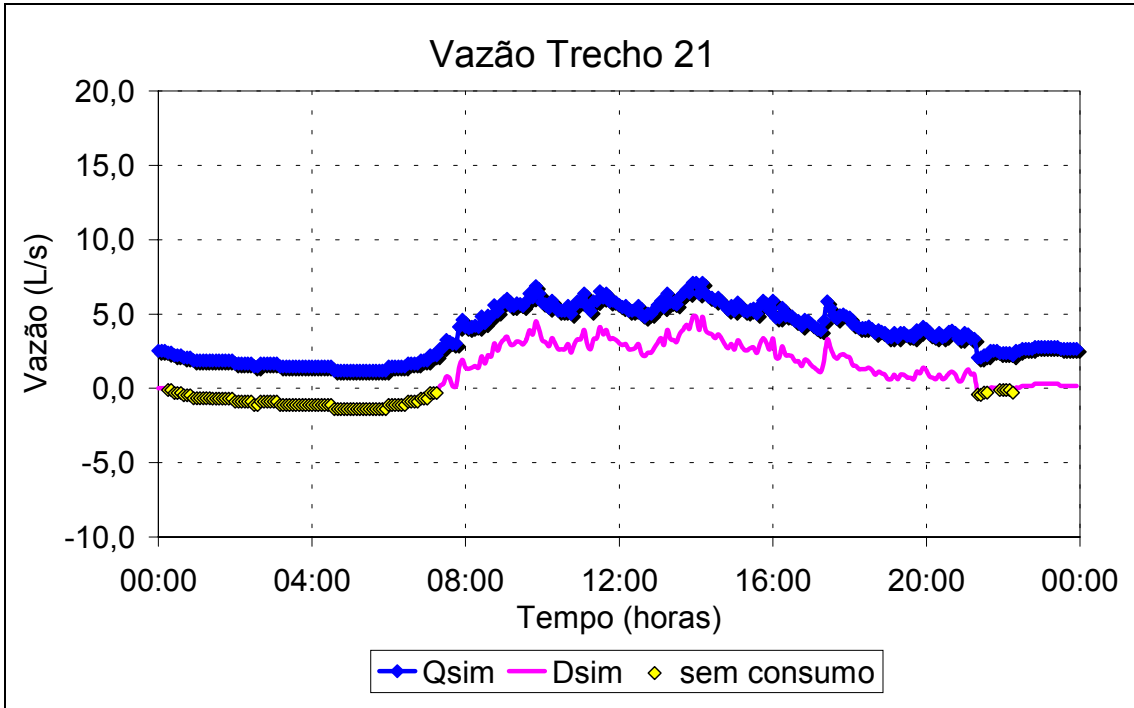


Figura 5.4 – Perfil de vazões no trecho 21, na entrada sub-setor 1.

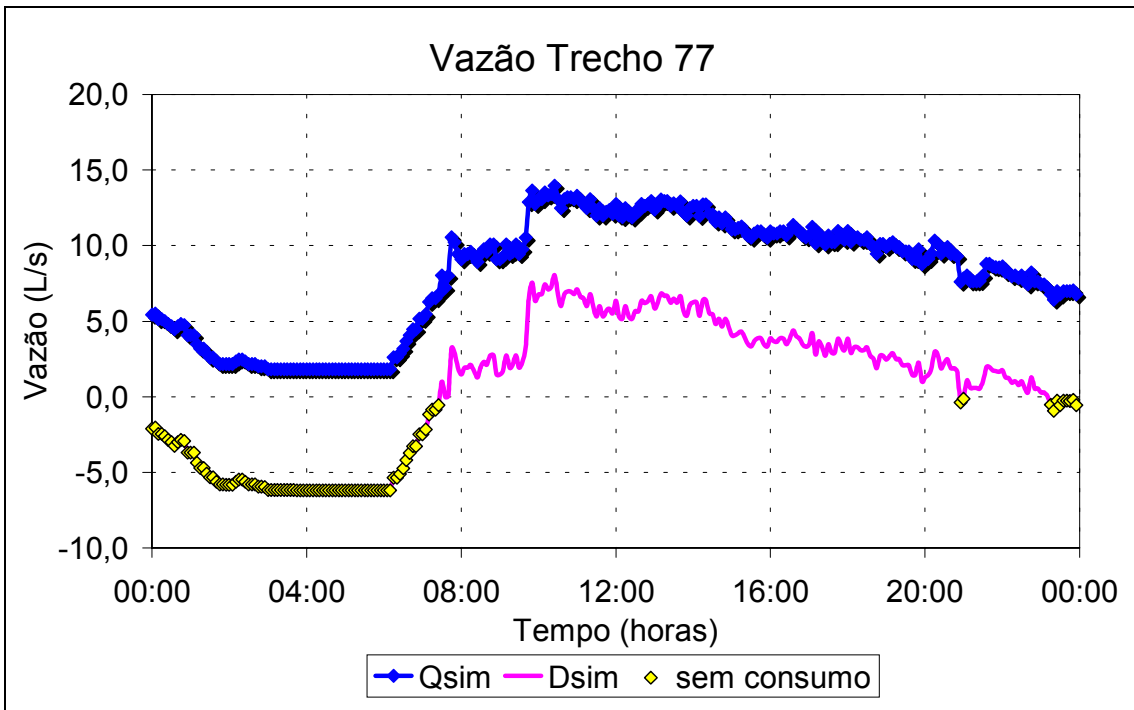


Figura 5.5 – Perfil de vazões no trecho 77, na entrada sub-setor 2.

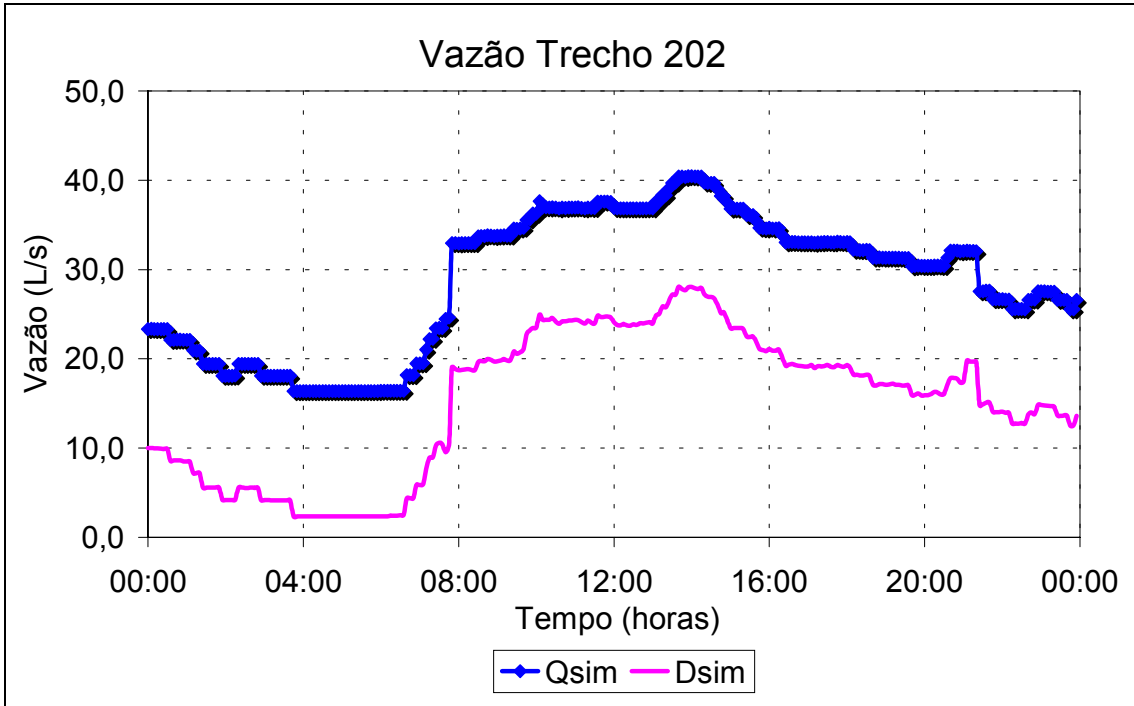


Figura 5.6 – Perfil de vazões no trecho 202.

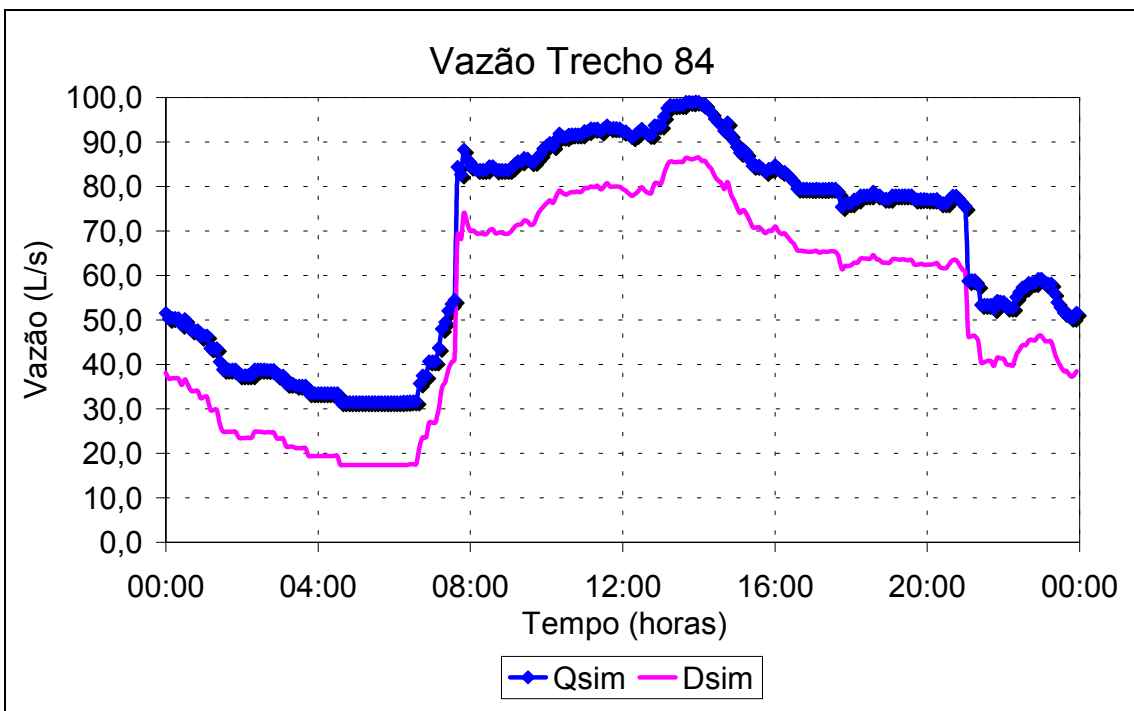


Figura 5.7 – Perfil de vazões no trecho 84, entrada setor.



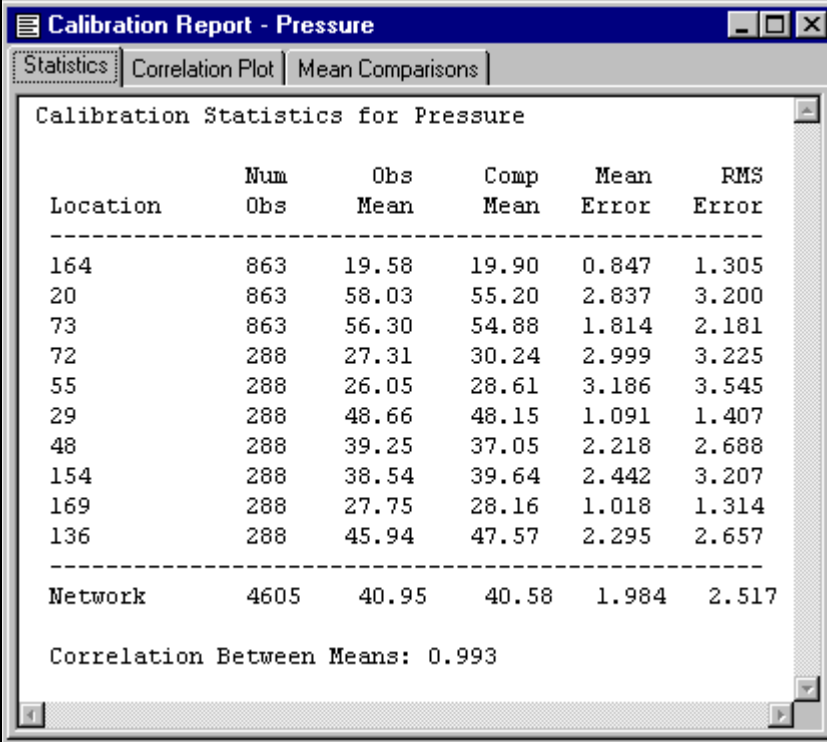
## 5.2 Calibração da Pressão

A calibração das pressões nos 10 nós de teste da rede (figura 4.9) foi importante para garantir a confiabilidade dos valores de pressão simulada pelo modelo EPANET, para todos os 233 nós.

O quadro 5.4 relata as estatísticas de calibração calculadas pelo modelo, que possibilitam análise da convergência dos resultados. Sendo obtido o erro médio absoluto na rede em estudo de 1,984 m, dentro dos limites recomendados pela literatura, ou seja,  $\pm 2,00$  m ou  $\pm 15\%$  da perda de carga máxima, qualquer que seja o maior (WALSKI, CHASE & SAVIC, 2001a).

O trecho 104, figura 4.9, foi o que apresentou a perda de carga máxima = 58,59 m/km, às 10:25 h. Dividindo este valor por 1.000 m/km e multiplicando pelo comprimento deste trecho = 383,0 m, tem-se  $h_L = 22,44$  m. Assim, o erro médio absoluto deve ser menor que 3,37 m ( $15\% \cdot 22,44$  m).

Quadro 5.4 – Estatística de calibração de pressão calculada pelo EPANET.



Location	Num Obs	Obs Mean	Comp Mean	Mean Error	RMS Error
164	863	19.58	19.90	0.847	1.305
20	863	58.03	55.20	2.837	3.200
73	863	56.30	54.88	1.814	2.181
72	288	27.31	30.24	2.999	3.225
55	288	26.05	28.61	3.186	3.545
29	288	48.66	48.15	1.091	1.407
48	288	39.25	37.05	2.218	2.688
154	288	38.54	39.64	2.442	3.207
169	288	27.75	28.16	1.018	1.314
136	288	45.94	47.57	2.295	2.657
Network	4605	40.95	40.58	1.984	2.517

Correlation Between Means: 0.993

As figuras 5.8 a 5.17 mostram os perfis obtidos na calibração das pressões para os 10 nós de teste; a partir dos dados observados na campanha de Agosto/2001, discretizados em intervalos de 5 minutos. A data da coleta dos dados está na legenda de cada figura. Sendo que para os nós 164, 20 e 73 foi realizada simulação em período extenso de 72 horas (3 dias) e nos demais nós em período extenso de 24 horas (1 dia)

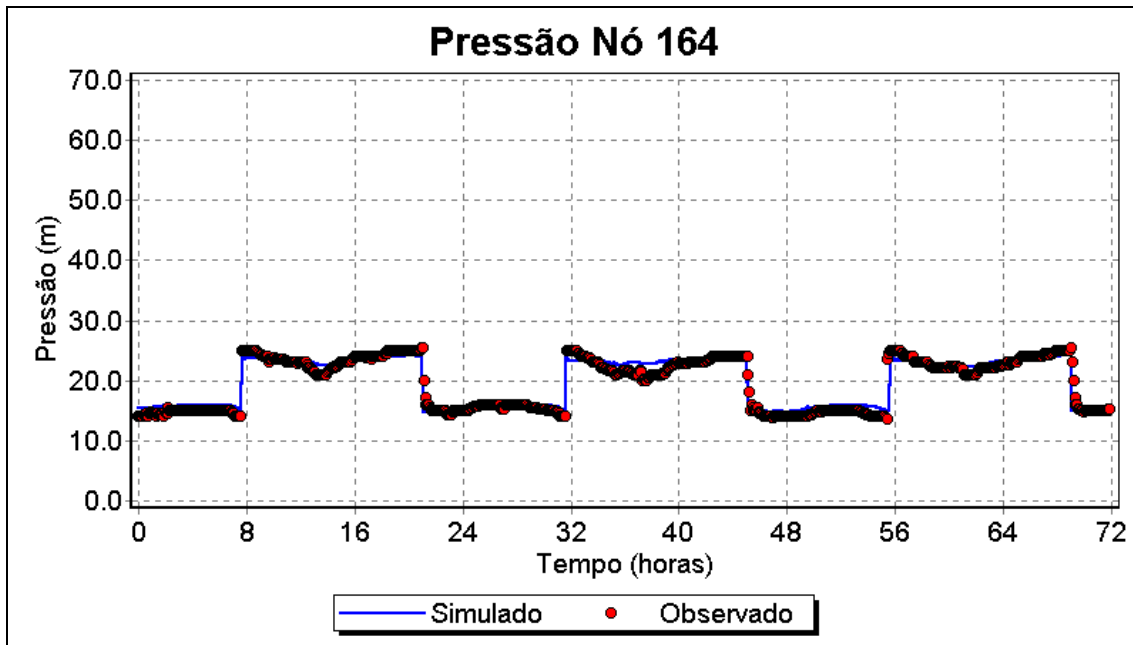


Figura 5.8 – Pressões simuladas e observadas nó 164 (7-8-9/agosto/2001).

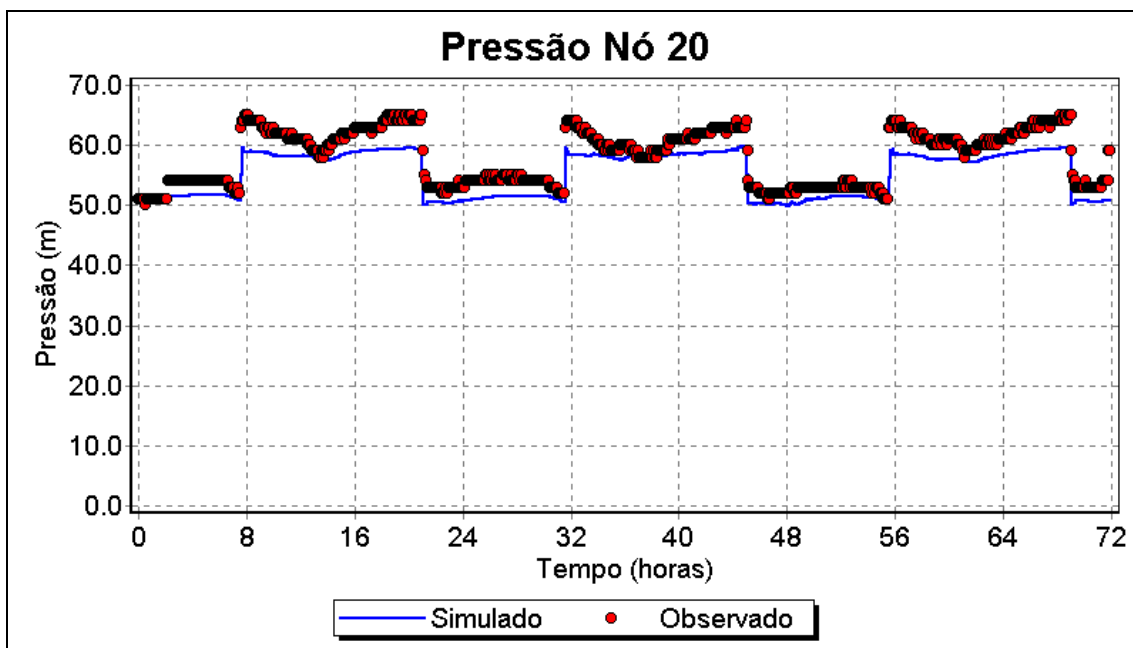


Figura 5.9 – Pressões simuladas e observadas nó 20 (7-8-9/agosto/2001).

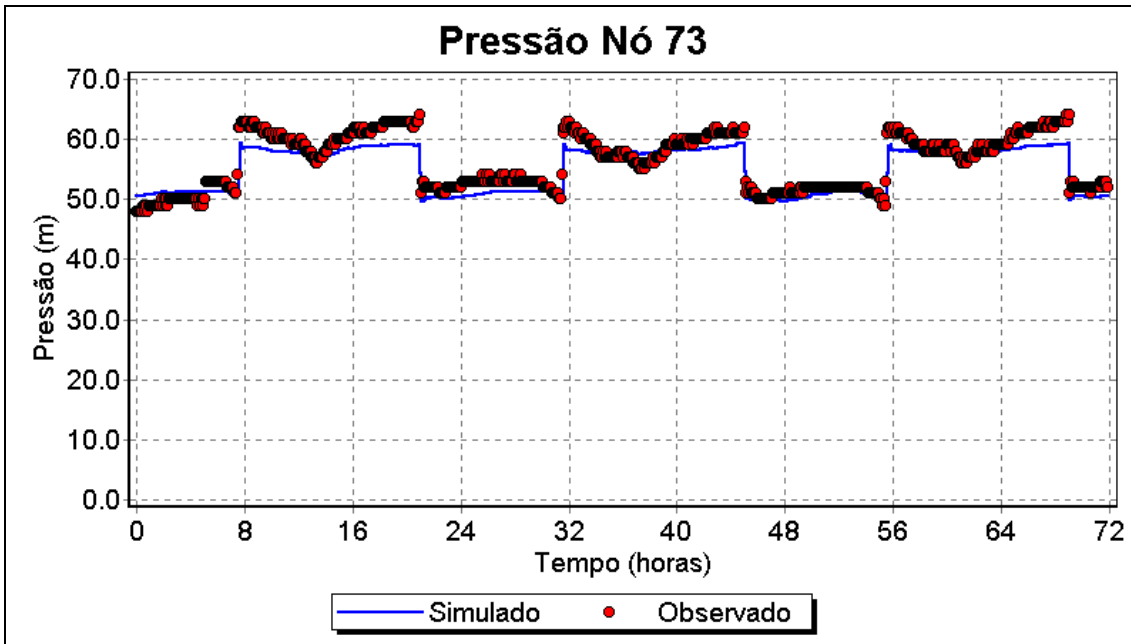


Figura 5.10 – Pressões simuladas e observadas nó 73 (7-8-9/agosto/2001).

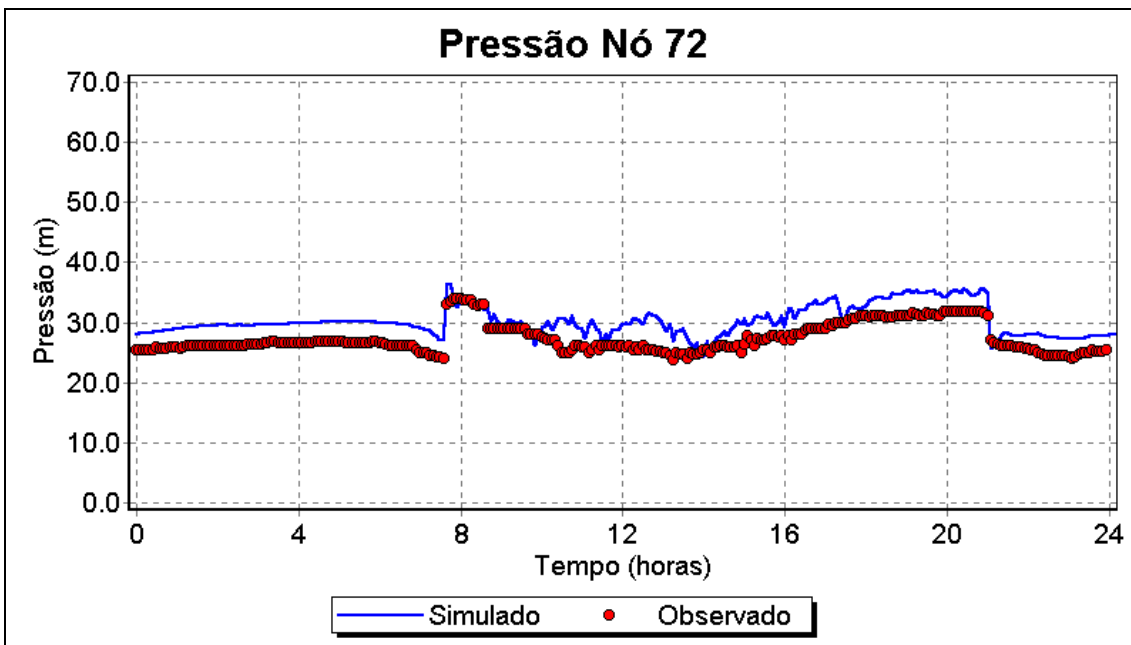


Figura 5.11 – Pressões simuladas e observadas nó 72 (21/agosto/2001).

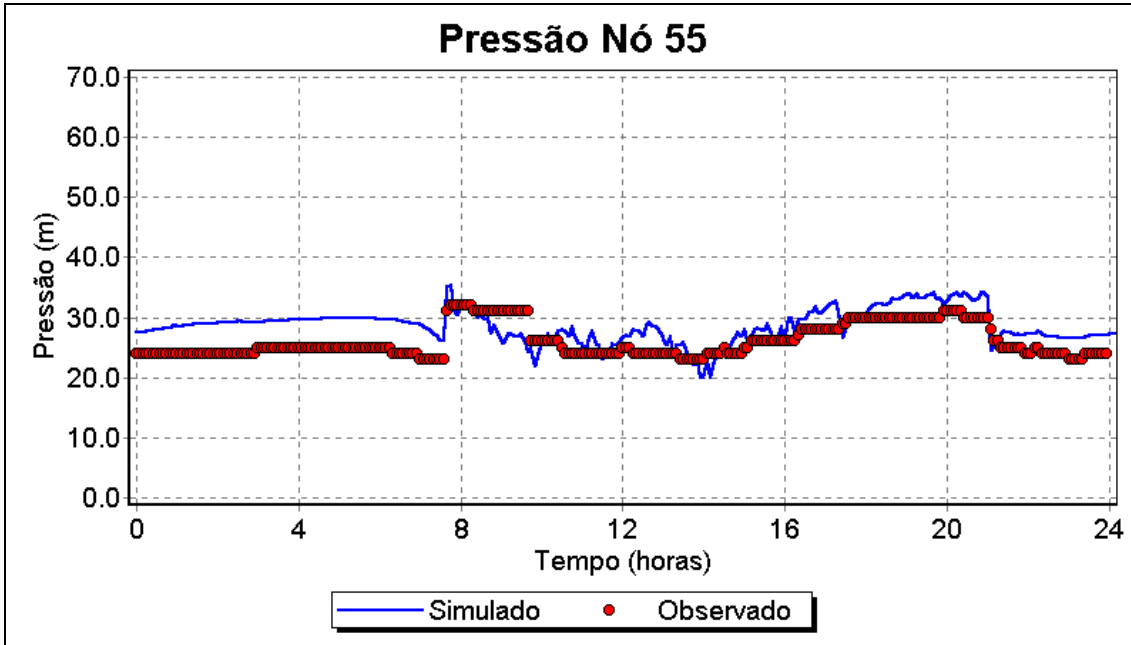


Figura 5.12 – Pressões simuladas e observadas nó 55 (21/agosto/2001).

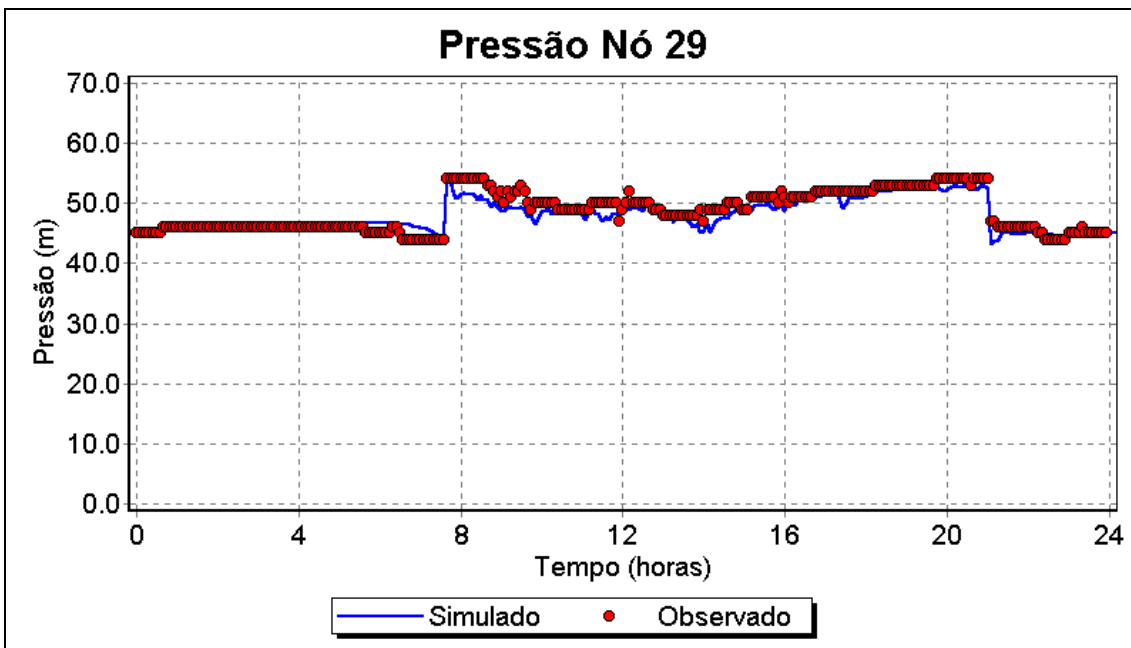


Figura 5.13 – Pressões simuladas e observadas nó 29 (21/agosto/2001).

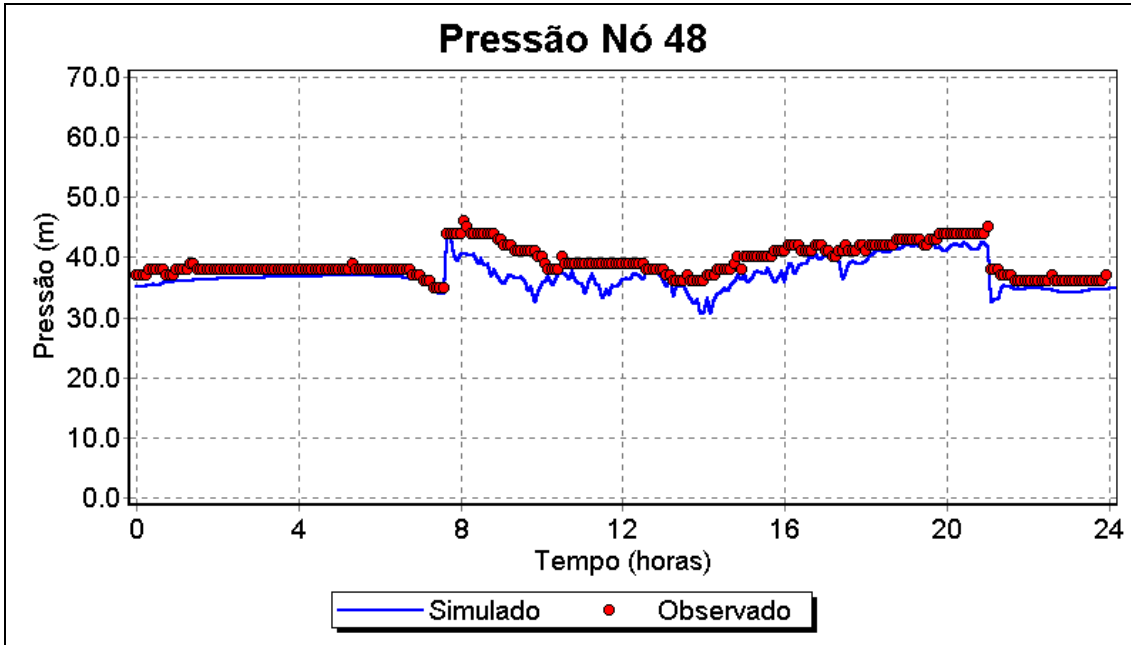


Figura 5.14 – Pressões simuladas e observadas nó 48 (22/agosto/2001).

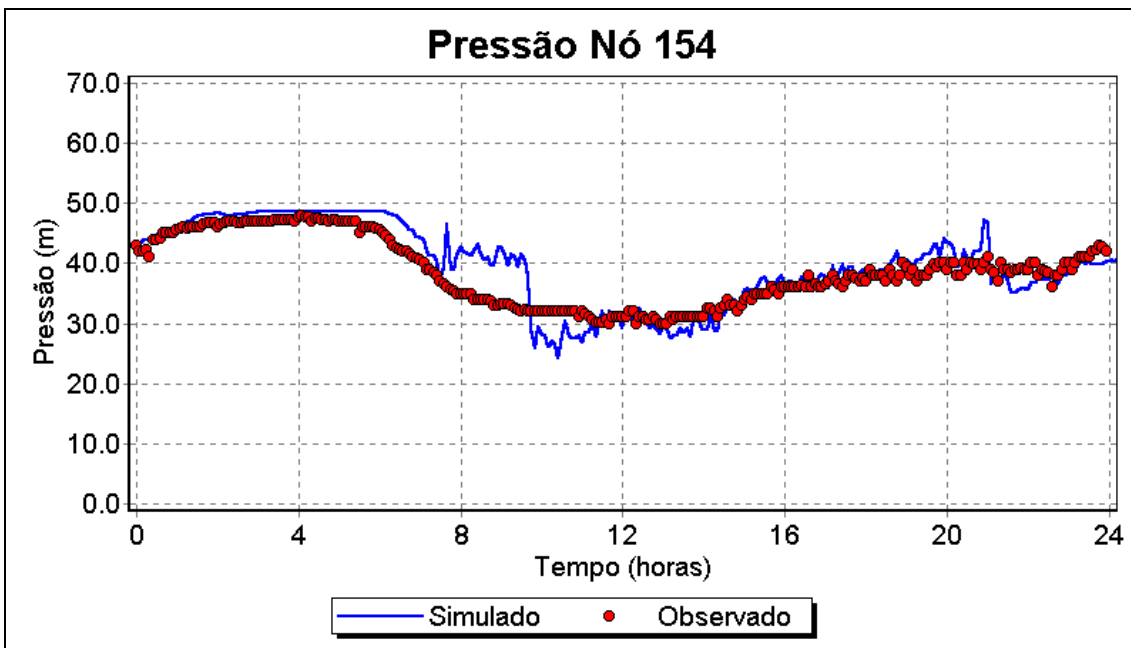


Figura 5.15 – Pressões simuladas e observadas nó 154 (23/agosto/2001).

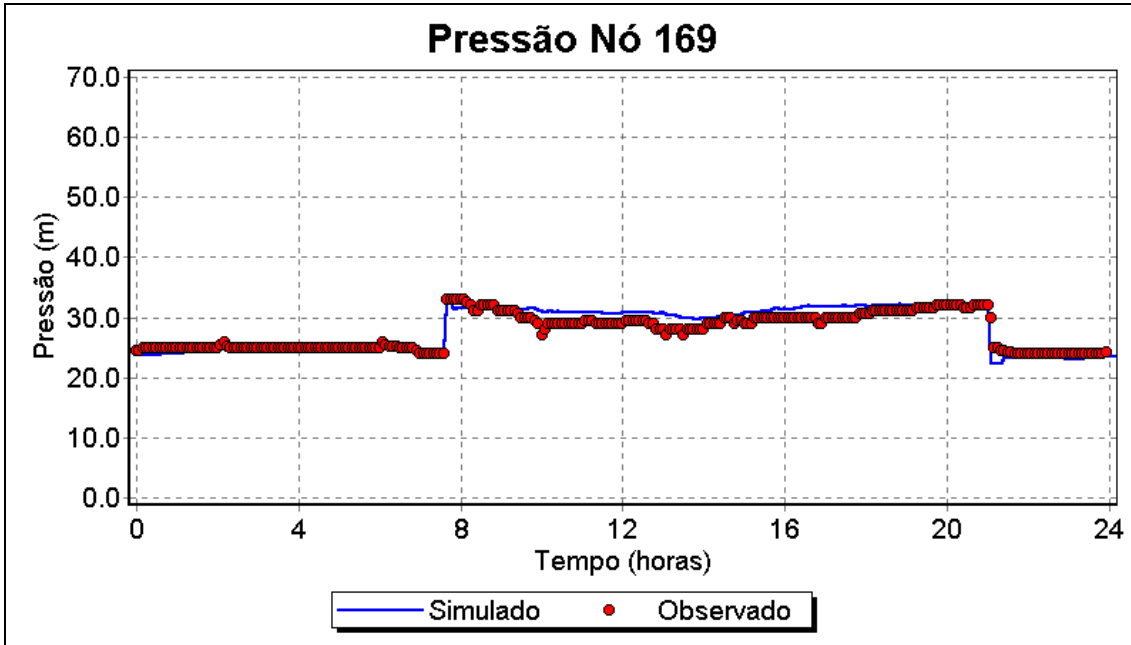


Figura 5.16 – Pressões simuladas e observadas nó 169 (29/agosto/2001).

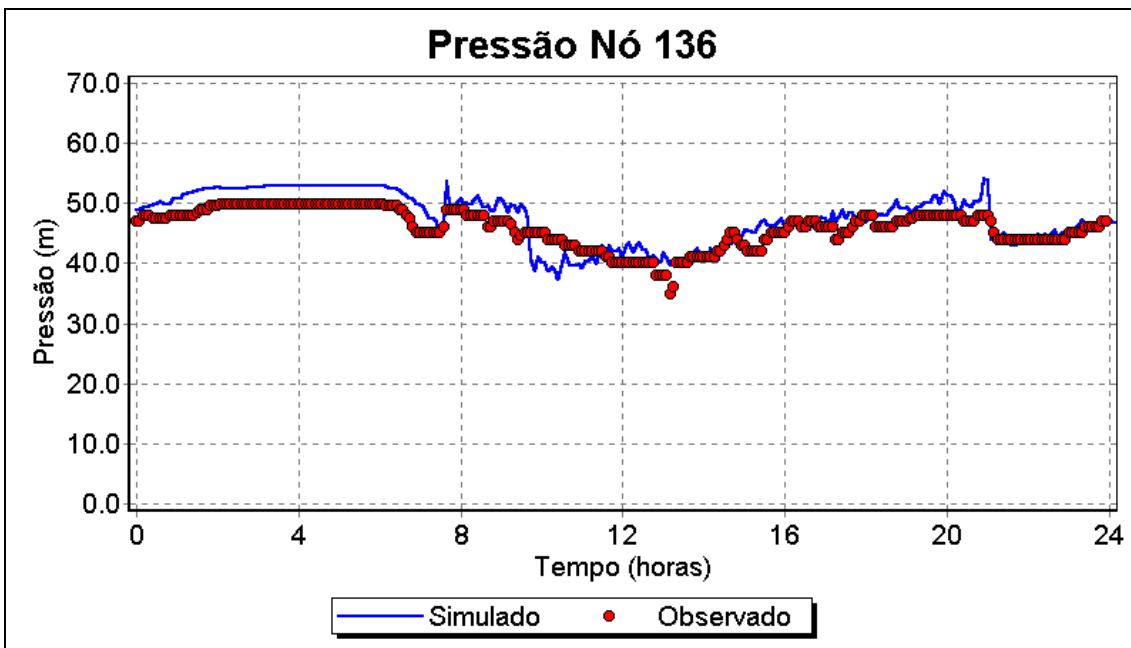


Figura 5.17 – Pressões simuladas e observadas nó 136 (29/agosto/2001).

A calibração de pressões depende basicamente do ajuste do coeficiente de rugosidade de cada trecho entre dois nós de teste, visto que as demandas dos nós já foram definidas na calibração das vazões e, portanto, nesta etapa permaneceram constantes. Conforme o quadro 8.2 Apêndice A, há valores

elevados para o coeficiente de rugosidade, em alguns trechos. Isto se deve principalmente a incertezas e fatores inerentes aos levantamentos e ensaios de campo, dentre eles:

- A disponibilidade de coletores de dados impediu a realização dos testes de pressão simultâneos em todos os 10 nós de teste, embora as condições de operação sejam semelhantes, não são idênticas. Bem como, a precisão dos equipamentos (2,0 a 4,0 % nos registradores gráficos e 0,5 % no coletor de dados Metrolog) e das leituras.
- Para efeito da simulação foi considerado que toda a rede está assentada sobre ao mesmo nível, pois não se dispunha da profundidade de assentamento dos trechos.
- Os comprimentos dos 242 trechos foram obtidos através de medições manuais, em campo, com o uso de trena de polietileno de 100,0 m; porque as plantas baixas da rede só indicavam a existência da tubulação, com o traçado fora de escala.
- Não foram consideradas as perdas localizadas nas tubulações, devido à dificuldade de identificação das mesmas, o que em parte pode justificar os elevados valores de  $\epsilon$ .
- Os vazamentos foram distribuídos na rede através da propriedade do nó: coeficiente de perdas, proporcionalmente ao comprimento dos trechos, isto é, quanto maior o trecho maior o coeficiente de perdas.
- A simulação do comportamento hidráulico numa rede de distribuição real está sujeita a alterações do dia-a-dia no que se refere à demanda (ligações novas, ligações extintas), pressão e vazamentos.

Não há dificuldade na aplicação de uma outra fórmula de perda de carga, quanto à calibração hidráulica no modelo EPANET. Mas calibrando os 3 trechos (202, 77, 21) e aplicando a fórmula de Darcy-Weisbach, como recomenda PORTO (1998), a simulação atingiu erros médios absolutos menores, nos quadros 5.1 e 5.4, do que a de VIEGAS (2003).

Na simulação de VIEGAS (2003) utilizando o mesmo banco de dados, o erro médio absoluto variou entre 1,070 e 4,389 m, para as pressões.

Ressaltando que apenas as demandas nos nós foram calibradas, aplicando o procedimento descrito no item 4.2.3. Após a 2ª iteração, sem o ajuste dos coeficientes de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams, encontrou erro médio absoluto entre cada valor observado e simulado de vazão no trecho 202 de 0,419 L/s.

### **5.3 Minimização dos Vazamentos**

Nos itens 5.3.1 ao 5.3.4 são apresentados os resultados das intervenções descritas na seção 4.3, simuladas na rede N° 5, com os dados de entrada mostrados nos quadros 8.1 a 8.4 no Apêndice A. A fim de verificar a redução teórica dos vazamentos, o valor médio obtido em cada intervenção é comparado com o respectivo valor encontrado na rede calibrada.

#### **5.3.1 Ajuste na VRP Existente**

Com o objetivo de reduzir a vazão de vazamento média no setor foram simuladas diferentes manobras na válvula redutora de pressão existente, através da re-configuração do componente não físico – controles, no modelo EPANET, quadro 8.4 Apêndice A.

A condição atual, ou seja, abertura na unidade controladora em 26,0 m e na válvula piloto de 36,0 m, apresenta pressões negativas no período das 21:05 às 23:55 h, nos nós 21 e 186 (cota = 145,0 m, figura 4.12). Assim, qualquer redução neste horário acarretará em pressões ainda mais negativas.

Mantendo a abertura na unidade controladora em 26,0 m e alterando na válvula piloto de 36,0 m para 32,0 m, há uma redução de 0,70 % na vazão simulada média do setor de 66,94 L/s para 66,47 L/s; e de 3,41 % (0,47 L/s) na vazão de vazamento média do setor de 13,69 L/s para 13,22 L/s.



Este valor de abertura conduz a pressão negativa no período das 13:25 às 15:20 h, no nó 21. Obviamente, devem ser estudadas as possibilidades de interligar os nós críticos com outras redes adjacentes.

Mesmo simulando a válvula operando totalmente aberta (válvula piloto = 39,0 m), no período das 7:40 às 21:00 h, observam-se valores de pressão menores do que 10,0 m.c.a., em alguns nós de cotas maiores do que 138,0 m.

Além disto qualquer ajuste, nestas regras de operação da VRP, vão alterar o funcionamento de outros setores, que também sofram a influência desta válvula, logo é conveniente um estudo integrado, não realizado nesta pesquisa.

### **5.3.2 Substituição de Trechos**

Comparando-se as vazões e as velocidades simuladas no modelo, no horário de maior consumo (13:55 h), com as apresentadas no quadro 4.4; verifica-se que dos 242 trechos: 31 estão operando superdimensionados e 34 subdimensionados; estes trechos estão listados no quadro 5.5. e indicados na figura 5.18.

Simulando a substituição destes 31 trechos superdimensionados (4.164 m) por tubulação em PVC, com  $\varepsilon = 0,0015$  mm; há uma redução de 0,25 % na vazão simulada média de 66,94 L/s para 66,77 L/s, e de 1,22 % (0,17 L/s) a vazão de vazamento média do setor de 13,69 L/s para 13,52 L/s.

Enquanto, a substituição dos 34 trechos subdimensionados (4.013 m), por tubulação em PVC, com  $\varepsilon = 0,0015$  mm; conduz ao aumento de 1,79 % na vazão simulada média do setor 68,14 L/s, e de 8,77 % (1,20 L/s) na vazão de vazamento média do setor 14,89 L/s. Este aumento já era esperado, pois pela equação (4.16), a perda de carga é diretamente proporcional à velocidade e inversamente ao diâmetro. Logo, simulando a substituição dos diâmetros subdimensionados reduzir-se-ão as perdas de carga e de acordo com a

equação (4.17), aumentarão as pressões e conseqüentemente os vazamentos, equação (4.11).

Quadro 5.5 - Trechos super e subdimensionados do setor em estudo.

Superdimensionado					Subdimensionado				
Trecho	L (m)	D (mm)	Q (L/s)	v (m/s)	Trecho	L (m)	D (mm)	Q (L/s)	v (m/s)
1	286	75	0,61	0,14	11	138	50	2,71	1,38
6	7	75	0,11	0,02	14	102	50	1,38	0,70
7	153	75	0,1	0,02	20	488	50	2,33	1,19
111	83	75	1,31	0,3	32	188	50	1,46	0,74
113	188	75	1,12	0,25	33	17	50	1,54	0,78
171	62	75	0,61	0,14	34	154	50	1,47	0,75
243	226	75	1,15	0,26	82	127	50	2,11	1,07
69	67	100	0,05	0,01	104	383	50	3,07	1,56
79	74	100	1,34	0,17	109	176	50	2,35	1,20
80	71	100	0,92	0,12	168	20	50	1,79	0,91
94	72	100	0,93	0,12	169	85	50	1,57	0,80
95	74	100	0,7	0,09	179	71	50	1,73	0,88
101	286	100	0,24	0,03	185	85	50	1,65	0,84
156	57	100	0,03	0	196	90	50	1,64	0,83
217	99	100	0,77	0,1	197	88	50	1,40	0,72
239	121	100	-0,19	0,02	218	60	50	2,03	1,03
240	74	100	-0,4	0,05	219	65	50	1,90	0,97
241	12	100	-0,25	0,03	220	102	50	1,76	0,90
242	207	100	0,14	0,02	221	62	50	1,67	0,85
66	73	100	2,25	0,29	128	113	75	5,90	1,34
177	246	200	12,92	0,41	130	270	75	5,76	1,30
178	182	200	12,43	0,4	142	12	75	4,27	0,97
76	17	250	25,4	0,52	147	103	75	3,82	0,87
2	21	300	39,7	0,56	149	67	75	3,48	0,79
9	347	300	37,99	0,54	150	120	75	3,43	0,78
10	112	300	37,82	0,54	21	260	100	7,10	0,90
18	136	300	35,04	0,5	29	67	100	6,30	0,80
43	129	300	38,06	0,54	31	77	100	6,08	0,77
202	344	300	40,44	0,57	77	94	100	12,47	1,59
4	333	300	0,7	0,01	78	15	100	6,51	0,83
8	5	300	1,64	0,02	182	90	100	8,50	1,08
$\Sigma = 4.164$					191	13	100	8,25	1,05
onde: L = comprimento do trecho (m); D = diâmetro (mm); Q = vazão (L/s); v = velocidade (m/s).					195	90	100	7,93	1,01
					245	121	100	6,08	0,77
					$\Sigma = 4.013$				

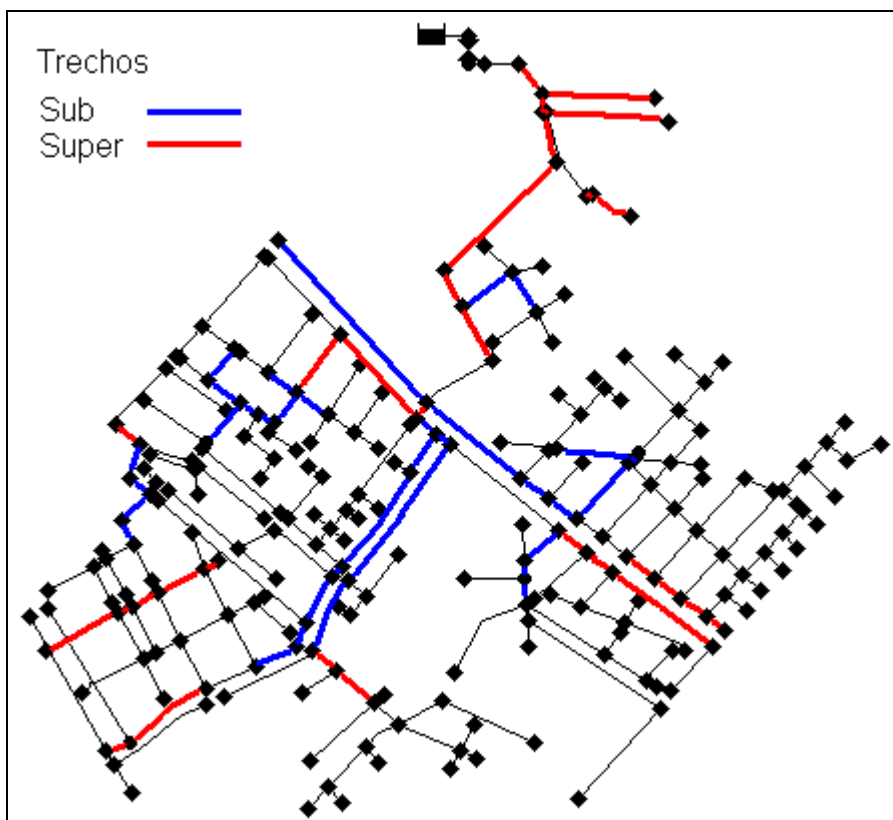


Figura 5.18 – Trechos super e subdimensionados do setor em estudo.

Não foi avaliada a utilização de rede dupla, pelo passeio, pois não se dispunha do número de economias discreto de cada lado das ruas, apenas o seu somatório. Nem a substituição de trechos isolados.

### 5.3.3 Setorização da Rede

Durante as simulações verificou-se que os nós com cotas menores do que 108,0 m, figura 4.12, praticamente durante todo o período da simulação apresentam pressões superiores a 50,0 m.c.a., não atendendo a recomendação da norma.

A norma brasileira NBR 12218 (1994) - Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público, estabelece que a pressão estática máxima nas tubulações deve ser de 50,0 m.c.a., a fim de reduzir as perdas por

vazamentos nas juntas das tubulações; e dinâmica mínima de 10,0 m.c.a., para permitir o abastecimento de um prédio de até três pavimentos sem a instalação de conjunto elevatório (bombas) e/ou reservatório inferior. Valores fora dessa faixa podem ser aceitos desde que justificados técnica e economicamente.

Várias propostas de setorização da rede podem ser estabelecidas, visando obviamente minimizar as pressões, e conseqüentemente os vazamentos.

As figuras 5.19 a 5.21 apresentam uma proposta de setorização em cada um dos 3 sub-setores e no quadro 5.6 as respectivas extensões em metros. Esta setorização proposta visou as mínimas interferências na rede existente, no que se refere às obras de cortes e interligações, de modo que, no caso de uma possível execução, o transtorno a população fosse reduzido.

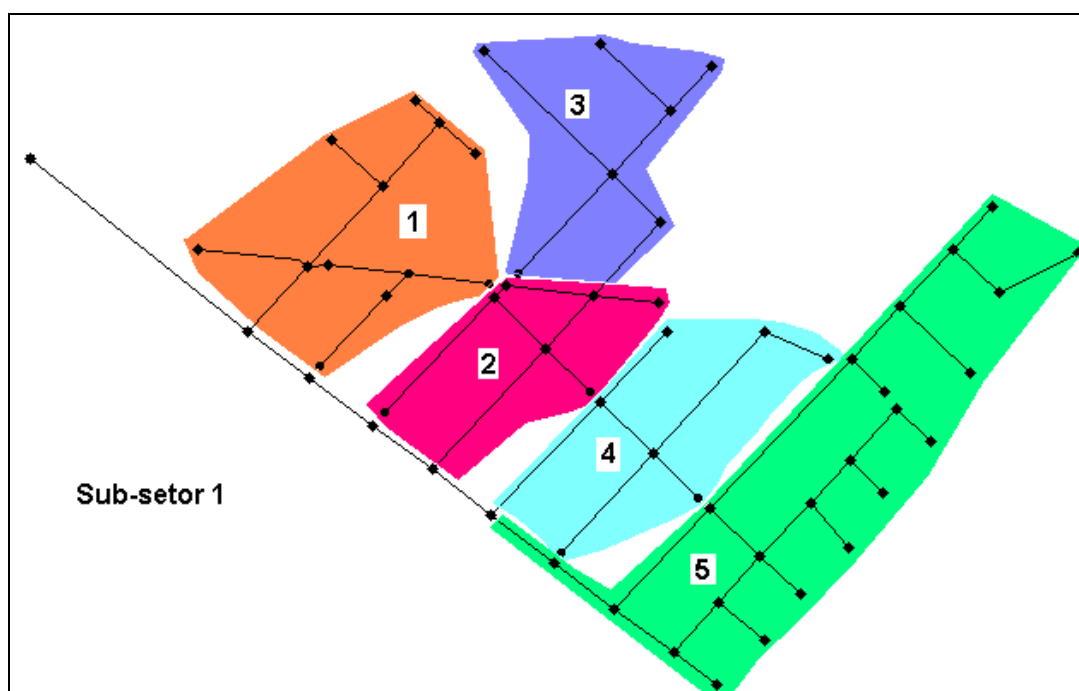


Figura 5.19 - Setorização proposta para o sub-setor 1.

Entretanto, esta setorização proposta conduziu ao aumento de 0,17 % na vazão simulada média do setor de 66,94 L/s para 67,05 L/s, e a 0,84 % (0,11 L/s) na vazão de vazamento média do setor de 13,69 L/s para 13,80 L/s.

Como a setorização proposta não atingiu a minimização dos vazamentos, nestes novos 19 sub-setores, avaliou-se a substituição dos trechos que operam

super e subdimensionados no horário de maior consumo (13:55 h); estes trechos estão indicados na figura 5.22 e listados no quadro 5.7.

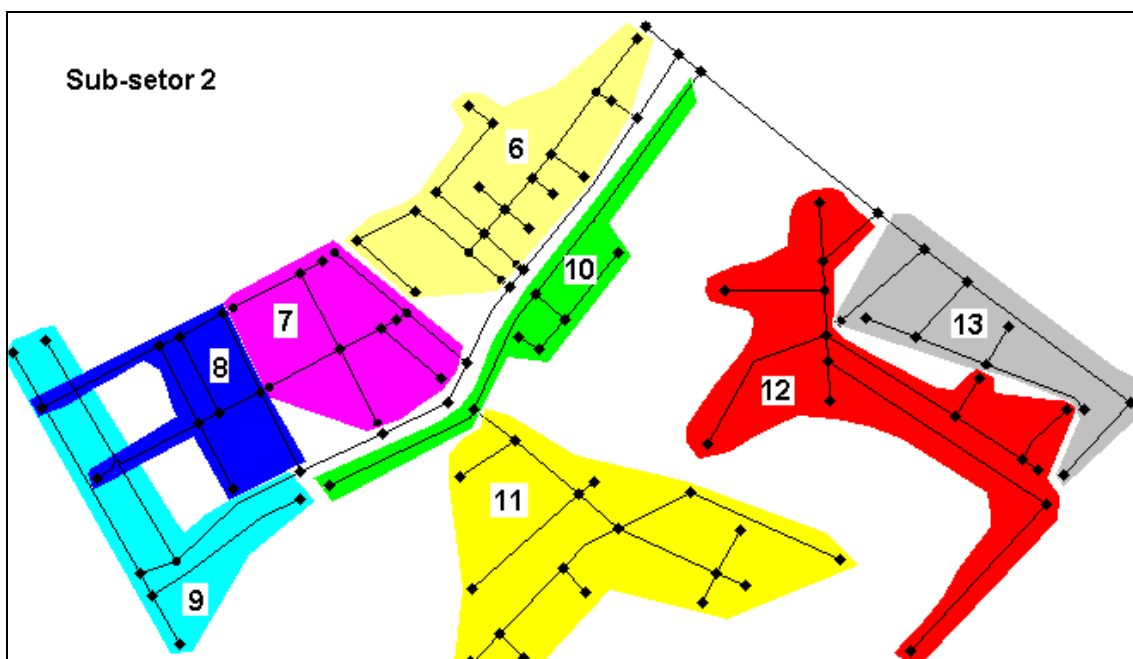


Figura 5.20 – Setorização proposta para o sub-setor 2.

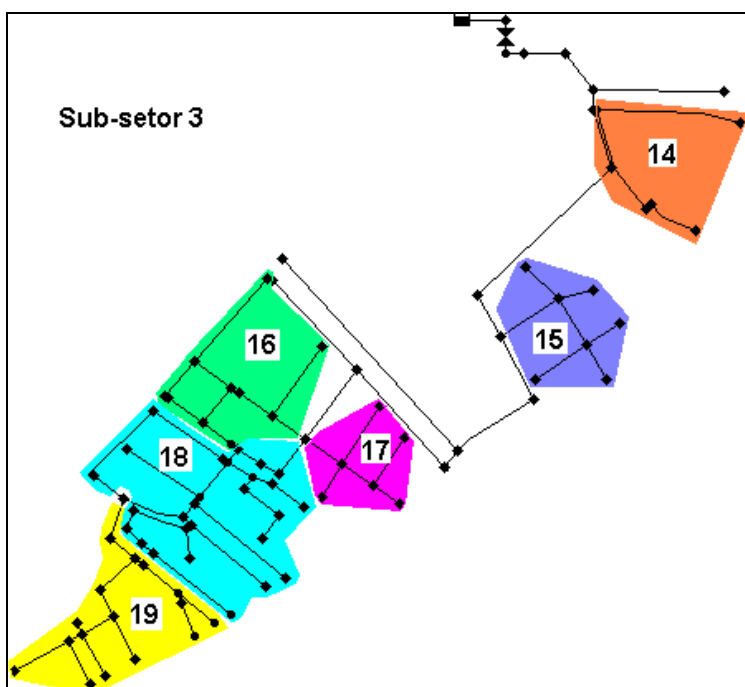


Figura 5.21 – Setorização proposta para o sub-setor 3.

Quadro 5.6 – Extensão média dos 19 sub-setores.

Sub-setor	Extensão (m)	Sub-setor	Extensão (m)
1	810	11	1.931
2	758	12	2.385
3	708	13	1.351
4	756	14	657
5	1.864	15	837
6	1.412	16	1.095
7	1.012	17	630
8	1.141	18	2.434
9	1.358	19	1.219
10	1.046	$\Sigma = 23.405 \text{ m}$	

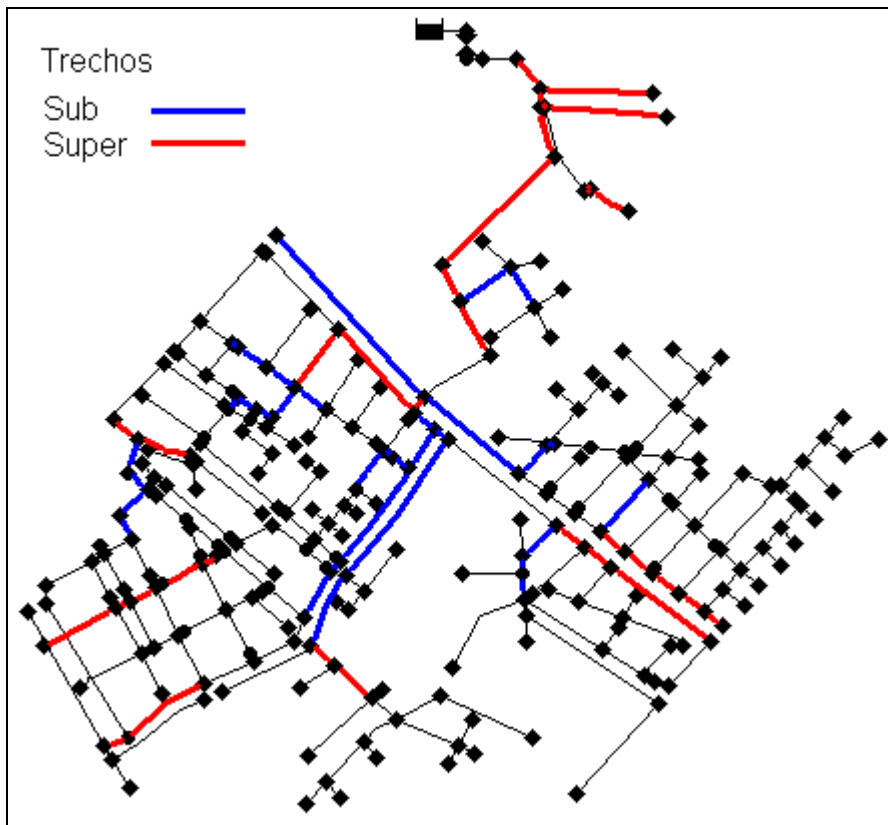


Figura 5.22 - Trechos super e subdimensionados, após setorização.

No caso, da substituição dos 33 trechos superdimensionados (4.354 m), por tubulação em PVC,  $\varepsilon = 0,0015 \text{ mm}$ ; houve uma redução de 0,09 % na vazão simulada média do setor – 66,88 L/s, e de 0,43 % (0,06 L/s) na vazão de vazamento média do setor – 13,63 L/s.

Quadro 5.7 - Trechos super e subdimensionados, após setorização.

Superdimensionado					Subdimensionado				
Trecho	L (m)	D (mm)	Q (L/s)	v (m/s)	Trecho	L (m)	D (mm)	Q (L/s)	v (m/s)
1	286	75	0,61	0,14	11	138	50	2,71	1,38
6	7	75	0,11	0,02	14	102	50	1,38	0,70
7	153	75	0,10	0,02	20	488	50	2,33	1,19
111	83	75	1,32	0,30	22	112	50	2,11	1,08
113	188	75	1,13	0,26	61	176	50	1,66	0,85
171	62	75	0,65	0,15	82	127	50	2,12	1,08
243	226	75	1,20	0,27	104	383	50	3,08	1,57
63	75	100	2,79	0,36	109	176	50	2,35	1,20
66	73	100	1,67	0,21	129	50	50	1,63	0,83
79	74	100	1,57	0,20	168	20	50	1,80	0,92
216	115	100	3,05	0,39	169	85	50	1,58	0,80
69	67	100	0,05	0,01	179	71	50	3,32	1,69
80	71	100	1,08	0,14	181	97	50	2,13	1,08
94	72	100	0,94	0,12	185	85	50	1,65	0,84
95	74	100	0,70	0,09	218	60	50	2,45	1,25
101	286	100	0,24	0,03	219	65	50	2,32	1,18
156	57	100	0,04	0,00	220	102	50	1,75	0,89
217	99	100	-0,17	0,02	221	62	50	1,66	0,85
239	121	100	0,00	0,00	228	80	50	-1,43	0,73
240	74	100	-0,32	0,04	203	10	50	1,60	0,82
241	12	100	-0,19	0,02	234	10	50	1,57	0,80
242	207	100	0,14	0,02	257	10	50	1,61	0,82
177	246	200	13,52	0,43	128	113	75	5,55	1,26
178	182	200	13,03	0,41	130	270	75	3,84	0,87
76	17	250	25,67	0,52	142	12	75	3,61	0,82
2	21	300	39,94	0,57	147	103	75	3,61	0,82
9	347	300	38,23	0,54	21	260	100	7,06	0,90
10	112	300	38,06	0,54	77	94	100	12,14	1,55
18	136	300	35,28	0,50	78	15	100	6,53	0,83
43	129	300	38,30	0,54	182	90	100	7,50	0,96
202	344	300	40,68	0,58	191	13	100	7,35	0,94
8	5	300	1,64	0,02	195	90	100	7,26	0,92
4	333	300	0,70	0,01	183	51	100	7,06	0,90

$\Sigma = 4.354$

$\Sigma = 3.620$

onde: L = comprimento do trecho (m); D = diâmetro (mm); Q = vazão (L/s); v = velocidade (m/s).

Já a substituição dos 33 trechos subdimensionados (3.620 m), por tubulação em PVC,  $\varepsilon = 0,0015$  mm; aumentou em 1,71 % na vazão distribuída

média do setor – 68,08 L/s, e em 8,37 % (1,15 L/s) na vazão de vazamento média do setor – 14,84 L/s. Porcentagens semelhantes ao item 5.4.2, pois foram simuladas a substituição de praticamente os mesmos trechos.

Não foram estabelecidas outras propostas de setorização. Se a setorização acompanhasse as curvas de nível, é provável, que houvesse uma maior redução nos vazamentos. No entanto, seriam necessárias inúmeras intervenções na rede para delimitar os sub-setores.

### 5.3.4 Instalação de Nova VRP

Como os resultados dos itens 5.3.1 a 5.3.3 não foram satisfatórios, a opção de instalar nova VRP parece ser uma solução viável, desde que bem localizada e operada.

Aproveitando a configuração existente do setor, ou seja, subdividido em 3 sub-setores (figura 4.2); simulou-se a instalação de 2 novas válvulas, VRP1 e VRP2, na entrada dos sub-setores 1 e 2, respectivamente.

As aberturas das VRP's são inseridas como componentes não físico – controles, conforme o quadro 5.8, sendo que os valores mínimos garantem perda de carga máxima e pressões positivas em todos os nós; os valores máximos equivalem à válvula totalmente aberta, ou seja, perda de carga nula.

Quadro 5.8 - Regras de operação das válvulas.

Válvula	Unidade controladora	Válvula piloto	
	mínimo	mínimo	máximo
VRP existente	35,0 m	35,0 m	39,0 m
VRP1	42,0 m	51,0 m	63,0 m
VRP2	33,0 m	33,0 m	63,0 m

Utilizando os valores mínimos de aberturas nas 3 válvulas reduziu-se em 3,16 % a vazão simulada média do setor de 66,94 L/s para 64,82 L/s, em 15,65 % (2,14 L/s) a vazão de vazamento média do setor de 13,69 L/s para 11,55 L/s.



Com a válvula piloto operando totalmente aberta, valores máximos, reduziu em 0,22 % a vazão simulada média do setor 66,79 L/s, e em 1,29 % (0,18 L/s) a vazão de vazamento média do setor 13,51 L/s.

Simulou-se também a operação destas 3 válvulas com as aberturas mínimas do quadro 5.8, após a setorização proposta no item 5.3.3, com os trechos superdimensionados substituídos. Isto resultou em uma redução de 2,86 % na vazão simulada média do setor 65,02 L/s, de 14,58 % (2,00 L/s) na vazão de vazamento média do setor 11,69 L/s.

A maior redução obtida, na vazão de vazamento, foi de 15,65 % (2,14 L/s) operando as 3 válvulas com as aberturas mínimas do quadro 5.8, no entanto, alguns nós ainda permaneceram fora dos limites recomendados pela NBR 12218 (1994), isto pode ser justificado grosseiramente pela diferença de cotas entre estes nós e a entrada d'água no setor (figura 4.12).

É importante salientar que as demandas base ( $D_B$ ) e os coeficientes de perdas (a) permaneceram constantes durante todas as simulações, provavelmente se fossem executadas *in loco* algumas das intervenções propostas nos itens 5.3.1 a 5.3.4, estas conduziriam a uma redução real maior, na vazão de vazamento, do que a simulada pelo modelo calibrado.

Obviamente, deve ser avaliado o custo operacional da instalação de nova VRP, que tecnicamente pode melhorar o desempenho e teoricamente, de acordo com as simulações no modelo EPANET, minimiza parte dos vazamentos.

#### **5.4 Resumo: Redes Simuladas**

Nesta seção são apresentados os resultados das outras 4 redes simuladas. Partiu-se da rede calibrada N° 5, substituindo-se os valores do quadro 4.2, ou seja, os coeficientes de descarga e o expoente do emissor correspondente a cada rede, além de configurar o componente não físico – controles, isto é a manobra na VRP existente no horário de menor consumo (21:05 – 7:35 h), acionada pela unidade controladora.

Não foram calibradas estas 4 redes, pois não haviam registros de dados observados nos nós e trechos de teste, no período da determinação dos parâmetros da relação pressão versus vazamento; apenas pares de vazão e pressão nos nós representativos (quadro 8.5, Apêndice B).

No quadro 5.9 são apresentadas as vazões de vazamento médias do setor em L/s e em porcentagem relativa a vazão total distribuída simulada no trecho 84, para cada uma das 5 redes simuladas.

Quanto maior a abertura da VRP, maior o valor do expoente do emissor (N) e menor o do coeficiente de descarga ( $C_d$ ), segundo os quadros 8.7 e 8.9 no Apêndice B.

Quadro 5.9 – Resumo das 5 redes simuladas.

Rede	N	$C_d (x 10^{-5})$	$Q_{VAZ} (L/s)$	%
1	0,811	2,9250	16,26	24,29
2	0,726	3,8052	14,99	22,39
3	0,699	4,9782	16,57	24,75
4	0,673	6,1806	17,49	26,12
5	0,611	5,3985	13,69	20,45
<i>Média</i>			15,80	23,60

De acordo com a equação (4.11), tem-se que a vazão de vazamento é proporcional ao coeficiente de perdas  $a$ , multiplicado pela pressão  $P$ , elevada na potência  $N$ , expoente do emissor. Com isso era esperado, devido à pequena diferença entre os valores do expoente  $N$ , que a rede N° 4 apresentasse o maior valor para a vazão de vazamento, quadro 5.9, pois apresenta o maior valor de  $C_d$ .

Assim, justifica-se a necessidade de estimar estes parâmetros especificamente para cada rede de distribuição em estudo e abertura (7/8, 3/4, 5/8, 1/2) da VRP. Contudo, as perdas físicas neste setor variaram em torno de 23,6 % (15,8 L/s).

Após o cálculo das vazões de vazamento médias nestas outras 4 redes, o próximo passo foi minimizá-las, e para tanto simulou-se a instalação de 2 novas VRP's, na entrada dos sub-setores 1 e 2, respectivamente, VRP1 e VRP2; quadro 5.10, operando com as aberturas mínimas do quadro 5.8. As

intervenções descritas nos itens 4.3.1 a 4.3.3 não foram repetidas nesta seção, pois quando aplicadas na rede N° 5 resultaram em uma redução desprezível dos vazamentos, itens 5.3.1 a 5.3.3.

A máxima redução simulada foi de 24,11 % (3,92 L/s) na rede N° 1, para as condições de contorno:  $N = 0,811$ ;  $C_d = 2,9250 \times 10^{-5}$ ; aberturas na VRP existente/VRP1/VRP2: unidade controladora de 35/42/33 e na válvula piloto de 35/51/33, respectivamente. Certamente, a redução seria maior, se tivesse sido possível a calibração da rede.

Quadro 5.10 – Vazão de vazamento depois da instalação de novas VRP's.

<b>Rede</b>	<b>Q<sub>vaz</sub> (L/s)</b>	<b>Redução (L/s)</b>
1	12,34	3,92
2	12,04	2,95
3	14,04	2,53
4	15,65	1,84
5	11,55	2,14
<i>Média</i>	<i>13,12</i>	<i>2,68</i>

Segundo LIEMBERGER (2002), os profissionais ligados ao gerenciamento de perdas devem estar cientes de que sempre existirão perdas físicas (reais) – até mesmo nos melhores e bem gerenciados sistemas. Uma questão a ser esclarecida é a dimensão dessas perdas irrecuperáveis.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve como objetivo estudar as possibilidades de minimização das perdas físicas (vazamentos) no setor de distribuição de água localizado no bairro Nossa Senhora de Lourdes e suas imediações na cidade de Santa Maria – RS.

A redução e controle de perdas físicas em sistema de abastecimento de água são a atividade mais importante quando se pretende melhorar a eficiência deste sistema. Um dos instrumentos disponíveis para este fim é a modelagem matemática de redes de distribuição.

Assim, o modelo EPANET foi calibrado até níveis aceitáveis, a partir dos levantamentos e ensaios de campo da campanha de Agosto/2001, realizados por VIEGAS (2003). O modelo foi configurado para simular a vazão de demanda e de vazamento (perda física) implicitamente com os cálculos, sendo realizados concomitantemente, onde a vazão de vazamento é dependente da pressão e a demanda dos coeficientes de variabilidade.

Após cada simulação do comportamento hidráulico, o modelo EPANET gera um relatório contendo os erros de calibração, permitindo a comparação entre os resultados simulados e as observações de campo. Sendo o erro médio absoluto obtido para as vazões de 0,159 L/s e 1,984 m para as pressões; calibrando as demandas dos nós e coeficientes de rugosidade da fórmula da Darcy-Weisbach nos trechos entre dois nós de teste.

A aplicação do modelo EPANET foi bastante satisfatória. Após a calibração, foi possível criar um termo de comparação e simular intervenções na rede em estudo como: o ajuste na VRP existente, a substituição de trechos, a setorização da rede e a instalação de nova VRP. Com a finalidade de melhorar o desempenho operacional do sistema reduzindo a vazão de vazamento média no setor de 13,69 L/s, que representa 20,45 % da vazão total distribuída média de 66,94 L/s.

No quadro 6.1, apresenta-se um comparativo das vazões de vazamentos nas intervenções simuladas na rede calibrada N° 5 ( $N = 0,611$  e  $C_d = 5,3985 \times 10^{-5}$ ). Sendo que a instalação de 2 novas VRP's na entrada dos sub-setores 1 e

2, operando com as aberturas mínimas, a intervenção que apresentou a maior redução da vazão de vazamento (2,14 L/s).

Quadro 6.1 – Comparativo das intervenções simuladas.

<b>Intervenção</b>	<b>Q<sub>VAZ</sub> (L/s)</b>
Ajuste na VRP existente	13,22
Substituição de trechos superdimensionados	13,52
Substituição de trechos subdimensionados	14,89
Setorização da rede (19 sub-setores)	13,81
Subst. de trechos super. após setorização	13,63
Subst. de trechos sub. após setorização	14,84
Instalação de 2 VRP's c/ aberturas mínimas	11,55
Instalação de 2 VRP's c/ aberturas máximas na válvula piloto	13,51
Inst. de 2 VPR's após subst. de trechos super. na setorização	11,69
<b>Rede Calibrada Nº 5</b>	<b>13,69</b>

Também foram simuladas outras 4 redes, numeradas de 1 a 4, no modelo EPANET com diferentes pares de parâmetros da relação pressão versus vazamento, a fim de verificar a variação nas pressões e conseqüentemente nos vazamentos, devido ao fechamento gradativo da VRP. O que justifica a necessidade de estimar estes parâmetros "N" e "C<sub>d</sub>" especificamente para cada rede de distribuição em estudo e abertura da VRP.

A correta operação de uma válvula redutora de pressão aliada à distribuição apenas do volume de água necessário a cada setor; além de reduzir desperdícios, poderá suprir deficiências de abastecimento em outros setores. Além disto, mantendo as pressões entre 10,0 e 50,0 m.c.a. como recomenda a norma NBR 12218 (1994), provavelmente a vida útil das tubulações e acessórios da rede serão maiores, logo menores o número de manutenções, reduzindo diretamente os custos da empresa e garantindo a satisfação do usuário. Entretanto, no setor em estudo, apesar de todas as intervenções simuladas nas 5 redes, alguns nós permaneceram fora dos limites de pressão da norma.

O estudo proposto não pode ser validado, através da execução *in loco* das intervenções propostas nos itens 5.3.1 a 5.3.4, devido às diferenças nas características da rede quando comparada com os levantamentos de campo realizados em Agosto/2001.

Recomenda-se, portanto, atualização cadastral e estudo integrado com os setores contíguos, verificando possíveis interligações nas partes altas (cota  $\geq$  136,0 m) e baixas (cota  $\leq$  94,0 m). Bem como, a modelagem de toda a rede distribuição de água da cidade de Santa Maria – RS, a fim de ampliar a aplicação do modelo EPANET, dando continuidade ao estudo das possibilidades de minimização das perdas físicas de água.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, J. M.; ALVARRUIZ, F.; GUERRERO, D.; et al. Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 126, n. 4, p. 251-260, July/Aug., 2000.
- ARIMA, G. A. & CYBIS, L. F. A. Aplicação de Modelagem Hidráulica em Sistema de Abastecimento de Água – Caso Naviraí – MS. In: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, RJ. 1999. **Anais...**
- BHAVE, P. R. Calibrating Water Distribution Network Models. **Journal of Environmental Engineering Division**, v. 114, p. 120-136, Feb. 1988.
- BOULOS, P. F. & WOOD, D. J. Explicit Calculation of Pipe – Network Parameters. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 116, n. 11, p. 1329-1344, 1990.
- CESARIO, A. L. & DAVIS, J. O. Calibrating Water System Models. **Journal of the American Water Works Association**, v. 76, n. 7, p. 66-69, July 1984.
- CHEUNG, P. B., SOARES, A. K. , SOUZA, R. S. – Investigação e Implementação de um Método Analítico de Calibração de Redes Hidráulicas. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, RS. 2000. **Anais...**
- CHEUNG, P. B., SOUZA, R. S. – Influência do Zoneamento de uma Rede Hidráulica na Acurácia de um Modelo de Calibração. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. 2001. **Anais...**

CORSAN. **Relatório SOC 020-Economias/Categorias/Volume Medido.**  
Diretoria Operacional. Porto Alegre, RS. 2002.

DIAS, M. C. B. F.; VIEIRA, J. M. P.; VALENTE, J. C. T.; COELHO, S. T.  
Calibração de Modelos de Simulação de Quantidade e Qualidade de  
Água em Redes de Distribuição: O Caso da Zona Oeste da Cidade de  
Bragança. In: 9º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Loures,,  
Portugal. 2000. [http://www.apesb.pt/comunicacoes/com\\_6.htm](http://www.apesb.pt/comunicacoes/com_6.htm).

GERMANOPOULOS, G. & JOWITT, P. W. Leakage reduction by excessive  
pressure minimization in a water supply network. **Proc. Inst. of Civ.  
Engr.**, part 2, n. 87, p. 195-214, June 1989.

GRATÃO, U. & PORTO, R. M. Análise de Desempenho de Válvulas Redutoras  
de Pressão em uma Rede de Distribuição de Água. In: V Simpósio de  
Recursos Hídricos. Natal, RN. 2000. **Anais...**

GRECO, M. & GIUDICE, G. New Approach to Water Distribution Network  
Calibration **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 8, p. 849-854,  
Aug. 1999.

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

Lei nº 9.433 de 08/01/1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos.

LIEMBERGER, R. Do You Know How Misleading the Use of Wrong  
Performance Indicators can be? In: Seminário Internacional sobre  
Programas de Redução e Controle de Perdas em Sistemas de  
Abastecimento de Água. Recife, PE. 2002. **Anais...**



NBR 12218 – Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. 1994.

ORMSBEE, L. E. & LINGIREDDY, S. Calibrating hydraulic network models. **Journal of the American Water Works Association**, v. 89, n. 2, p. 42-50, Feb. 1997.

PIZZO, H. S. & LUVIZZOTO Jr, E. Calibração de Modelos de Distribuição de Água através do Algoritmo de Nelder-Mead. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. 2001. **Anais...**

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 1ª ed. São Paulo: EESC/USP, 1998. Cap. 2.

REIS, L. F. R.; PORTO, R. M. & CHAUDHRY, F.H. Optimal location of control valves in pipe networks by genetic algorithm. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 123, n. 6, p. 317-326, Nov./Dec., 1997.

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

RIGHETTO, A. M. & CARRIJO, I. B. Dimensionamento Ótimo de Rede de Distribuição de Água – Análise da Variação Aleatória da Demanda. In: 8º Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, PR. 1989. **Anais...**

ROSSMAN, L. A. EPANET User's Manual. **U. S. Environmental Protection Agency**. 200 p. 2000.

SABESP. Relatório interno de consultoria técnica para determinação da relação entre perdas físicas e variação da pressão na rede, através de intervenções monitoradas em área piloto da RMSP. 1998.

SEDU/PR. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2001. PMSS- Programa de Modernização do Setor Saneamento. Brasília, 2002.

SILVA, F. G. B.; GRATÃO, U.; PORTO, R. M.; CHAUDHRY, F. H. Avaliação de Parâmetros do Modelo Pressão-Vazamento para Sub-Setor da Cidade de São Carlos, SP. In: IX SILUBESA - Simpósio Luso-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro, BA. 2000. **Anais...**

SILVA, R. T.; CONEJO, J. G. L.; MIRANDA, E. C.; ALVES, R. F. F. **Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água.** Brasília. 1998. (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de água, Documentos Técnicos de Apoio – A2).

SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R. & SOARES, A. K. Calibração de rede de distribuição de água considerando as perdas por vazamentos explicitamente no modelo com o uso de algoritmos genéticos – Aplicação para rede da cidade de São Carlos, SP. In: Seminário sobre Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água, João Pessoa, PB. 2002. **Anais...**

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

SOUZA, R. S.; CHAUDHRY, F. H. & POLIZER, M. Controle Operacional Otimizado de Válvulas Redutoras de Pressão em Redes de Distribuição

de Água. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste, Campo Grande, MS. 2002. **Anais...**

TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In: **Abastecimento de Água**. 1ª ed. São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. Cap. 10.

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.

VAIRAVAMOORTHY, K. & LUMBERS, J. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, n. 11, p. 1146-1154, Nov. 1998.

VIEGAS, J. V. Redução de Pressão – uma alternativa técnica para melhorar a eficiência operacional. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB. 2001. **Anais...**

\_\_\_\_\_. **Metodologias para Determinar Perdas Físicas de Água em Redes de Distribuição**. 2003. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

WALSKI, T. M. Technique for Calibrating Network Models. **Journal Of Water Resources Planning and Management**, v. 109, n. 4, p. 360-372, 1983.

\_\_\_\_\_. Water Distribution Valve Topology for Reliability Analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 42, p. 21-27, 1993.

WALSKI, T. M.; CHASE, D. V. & SAVIC, D. A. Calibration Hydraulic Network Models. In: **Water Distribution Modeling**. 1<sup>st</sup> ed. Waterbury: Haestad Press, 2001a. Cap. 6.

\_\_\_\_\_. Leakage Control. In: **Water Distribution Modeling**. 1<sup>st</sup> ed. Waterbury: Haestad Press, 2001b. Cap. 9.

YOSHIMOTO, P. M.; TARDELLI FILHO, J. & SARZEDAS, G. L. **Controle de Pressão na Rede**. Brasília, 1999 (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de água, Documentos Técnicos de Apoio – D1).

## 8. APÊNDICE

### *A – Dados de Entrada do Setor de Distribuição em Estudo*

Os dados de entrada, a seguir, referem-se a rede calibrada N° 5, com o valor final de "N" e "C<sub>d</sub>", ou seja, N = 0,611 e C<sub>d</sub> = 5,3985 x 10<sup>-5</sup>; para o período de simulação de 24 horas. O que difere esta rede N° 5 das demais são: os coeficientes de perdas, o expoente do emissor, além das regras de operação da VRP, no horário das 21:05 – 7:35 h.

Quadro 8.1 – Propriedades dos nós.

Nó	Cota	DemandaBase	PadrãoTemporal	Coef.Perdas
2	140	0,42699	Sub-Setor3	0,01544
3	139	0,00000	Sub-Setor3	0,00113
4	139	0,00000	Sub-Setor3	0,00027
5	135	0,47116	Sub-Setor3	0,01798
6	116	0,61840	Sub-Setor3	0,00858
7	117	0,00000	Sub-Setor3	0,00038
8	115	0,01472	Sub-Setor3	0,00826
9	126	0,00000	Sub-Setor3	0,00696
10	122	0,00000	Sub-Setor3	0,01873
11	111	0,00000	Sub-Setor3	0,00605
12	117	0,44171	Sub-Setor3	0,00745
13	128	0,38282	Sub-Setor3	0,00702
14	110	0,13251	Sub-Setor3	0,00567
15	107	0,25030	Sub-Setor3	0,00507
16	106	0,19141	Sub-Setor3	0,00551
17	102	0,14724	Sub-Setor3	0,00680
18	104	0,33865	Sub-Setor3	0,00767
19	102	0,00000	Sub-Setor3	0,00734
20	103,7	0,02945	Sub-Setor3	0,00729
21	145	1,91408	Sub-Setor3	0,02634
22	98	0,01423	Sub-Setor1	0,01404
23	100	0,01423	Sub-Setor1	0,00605
24	97	0,01219	Sub-Setor1	0,00610
25	100	0,01016	Sub-Setor1	0,00524
26	98	0,00406	Sub-Setor1	0,00329
27	105	0,01016	Sub-Setor1	0,00432
28	98	0,00406	Sub-Setor1	0,00216
29	108	0,00203	Sub-Setor1	0,00205
30	109	0,32518	Sub-Setor1	0,00831

<b>Nó</b>	<b>Cota</b>	<b>DemandaBase</b>	<b>PadrãoTemporal</b>	<b>Coef.Perdas</b>
31	109	0,00000	Sub-Setor1	0,00092
32	109	0,02032	Sub-Setor1	0,00000
33	116	0,00406	Sub-Setor1	0,00815
34	105	0,03049	Sub-Setor1	0,00880
35	109	0,00610	Sub-Setor1	0,00475
36	116	0,00203	Sub-Setor1	0,00432
37	115	0,00203	Sub-Setor1	0,00270
38	116	0,02236	Sub-Setor1	0,00394
39	116	0,01219	Sub-Setor1	0,01381
40	118	0,01016	Sub-Setor1	0,00448
41	111	0,05894	Sub-Setor1	0,01015
42	113	0,06300	Sub-Setor1	0,01322
43	116	0,04674	Sub-Setor1	0,01285
44	120	0,02845	Sub-Setor1	0,01204
45	126	0,02845	Sub-Setor1	0,01183
46	132	0,00610	Sub-Setor1	0,00389
47	136	0,01016	Sub-Setor1	0,00254
48	118	0,02642	Sub-Setor1	0,00615
49	126	0,06300	Sub-Setor1	0,00853
50	132	0,00610	Sub-Setor1	0,00124
51	134	0,02236	Sub-Setor1	0,01053
52	139	0,01219	Sub-Setor1	0,00367
53	132	0,00406	Sub-Setor1	0,00383
54	139	0,02236	Sub-Setor1	0,00713
55	125	0,00406	Sub-Setor1	0,00389
56	131	0,02845	Sub-Setor1	0,00713
57	125	0,00813	Sub-Setor1	0,00270
58	140	0,00813	Sub-Setor1	0,00383
59	143	0,01219	Sub-Setor1	0,00340
60	134	0,00813	Sub-Setor1	0,00270
61	139	0,00203	Sub-Setor1	0,00189
62	129	0,00406	Sub-Setor1	0,00378
63	135	0,00610	Sub-Setor1	0,00324
64	103	0,00813	Sub-Setor1	0,00362
65	105	0,02642	Sub-Setor1	0,00297
66	107	0,00610	Sub-Setor1	0,00416
67	110	0,02032	Sub-Setor1	0,00389
68	118	0,00610	Sub-Setor1	0,00405
69	122	0,01626	Sub-Setor1	0,00394
70	125	0,01219	Sub-Setor1	0,00399
71	127	0,00813	Sub-Setor1	0,00383
72	125	0,00610	Sub-Setor1	0,00362
73	104	0,00000	Sub-Setor3	0,00092
74	103	0,00000	Sub-Setor2	0,00507
75	99	0,00000	Sub-Setor2	0,00081
76	105	0,04607	Sub-Setor2	0,01738
77	108	0,00825	Sub-Setor2	0,00389
78	115	0,00206	Sub-Setor2	0,00399
79	122	0,00619	Sub-Setor2	0,01544
80	114	0,00000	Sub-Setor2	0,01020

<b>Nó</b>	<b>Cota</b>	<b>DemandaBase</b>	<b>PadrãoTemporal</b>	<b>Coef.Perdas</b>
81	103	0,00550	Sub-Setor2	0,00794
82	101	0,03507	Sub-Setor2	0,00497
83	102	0,01169	Sub-Setor2	0,00966
84	105	0,00413	Sub-Setor2	0,00540
85	107	0,00688	Sub-Setor2	0,00648
86	111	0,00825	Sub-Setor2	0,00534
87	116	0,00550	Sub-Setor2	0,00821
88	102	0,03438	Sub-Setor2	0,00459
89	104	0,01100	Sub-Setor2	0,01679
90	109	0,00481	Sub-Setor2	0,00513
91	108	0,00138	Sub-Setor2	0,00259
92	114	0,00550	Sub-Setor2	0,00615
93	111	0,00275	Sub-Setor2	0,00216
94	101	0,00000	Sub-Setor2	0,00108
95	114	0,03025	Sub-Setor2	0,02375
96	108	0,00619	Sub-Setor2	0,02575
97	91	0,01856	Sub-Setor2	0,01819
98	100	0,05088	Sub-Setor2	0,02068
99	95	0,00138	Sub-Setor2	0,00362
100	94	0,01788	Sub-Setor2	0,00767
101	95	0,00688	Sub-Setor2	0,00567
102	97	0,00206	Sub-Setor2	0,00346
103	93	0,01031	Sub-Setor2	0,00950
104	88	0,18633	Sub-Setor2	0,00588
105	90	0,00275	Sub-Setor2	0,00448
106	87	0,01650	Sub-Setor2	0,00610
107	91	0,00344	Sub-Setor2	0,01015
108	89	0,00000	Sub-Setor2	0,00302
109	88	0,00756	Sub-Setor2	0,01652
110	95	0,00206	Sub-Setor2	0,00891
111	95	0,01031	Sub-Setor2	0,00572
112	90	0,00894	Sub-Setor2	0,00723
113	88	0,00000	Sub-Setor2	0,00205
114	93	0,00275	Sub-Setor2	0,00470
115	97	0,00000	Sub-Setor2	0,00173
116	102	0,01444	Sub-Setor2	0,00891
117	101	0,00000	Sub-Setor2	0,00486
118	102	0,00000	Sub-Setor2	0,00162
119	103	0,00000	Sub-Setor2	0,00238
120	95	0,00825	Sub-Setor2	0,00621
121	104	0,01719	Sub-Setor2	0,00972
122	102	0,00481	Sub-Setor2	0,00610
123	102	0,01650	Sub-Setor2	0,01458
124	110	0,10520	Sub-Setor2	0,00480
125	111	0,00481	Sub-Setor2	0,00362
126	118	0,00481	Sub-Setor2	0,00184
127	105	0,00825	Sub-Setor2	0,00329
128	111	0,00206	Sub-Setor2	0,00281
129	105	0,00756	Sub-Setor2	0,00308
130	109	0,00413	Sub-Setor2	0,00329

<b>Nó</b>	<b>Cota</b>	<b>DemandaBase</b>	<b>PadrãoTemporal</b>	<b>Coef.Perdas</b>
131	104	0,00275	Sub-Setor2	0,00389
132	109	0,01169	Sub-Setor2	0,00837
133	120	0,00344	Sub-Setor2	0,00405
134	116	0,01994	Sub-Setor2	0,00831
135	118	0,01238	Sub-Setor2	0,00351
136	102	0,00000	Sub-Setor2	0,00065
137	115	0,00275	Sub-Setor2	0,00885
138	109	0,00688	Sub-Setor2	0,00556
139	120	0,02475	Sub-Setor2	0,01144
140	104	0,00756	Sub-Setor2	0,00664
141	96	0,00275	Sub-Setor2	0,00556
142	118	0,02407	Sub-Setor2	0,02348
143	92	0,00206	Sub-Setor2	0,00362
144	91	0,00550	Sub-Setor2	0,00648
145	97	0,03025	Sub-Setor2	0,01350
146	101	0,00000	Sub-Setor2	0,00292
147	102	0,00756	Sub-Setor2	0,00335
148	95	0,00825	Sub-Setor2	0,00605
149	102	0,03300	Sub-Setor2	0,00632
150	105	0,00206	Sub-Setor2	0,00308
151	109	0,01100	Sub-Setor2	0,00653
152	89	0,00688	Sub-Setor2	0,01862
153	96	0,00825	Sub-Setor2	0,00686
154	106	0,01581	Sub-Setor2	0,01295
155	96	0,00000	Sub-Setor2	0,00416
156	105	0,03782	Sub-Setor2	0,01036
157	95	0,00000	Sub-Setor2	0,00065
158	89	0,03644	Sub-Setor2	0,00534
159	102	0,00825	Sub-Setor2	0,00702
160	105	0,01031	Sub-Setor2	0,01117
161	95	0,00963	Sub-Setor2	0,00961
162	87	0,00275	Sub-Setor2	0,00335
163	88	0,00275	Sub-Setor2	0,00000
164	139,5	0,00000	Sub-Setor3	0,01857
165	86	0,00000	Sub-Setor2	0,00081
166	81	0,01306	Sub-Setor2	0,00518
167	87	0,00550	Sub-Setor2	0,01522
168	119	0,23558	Sub-Setor3	0,01328
169	130	0,39754	Sub-Setor3	0,00983
170	136	0,29447	Sub-Setor3	0,00383
171	125	0,61840	Sub-Setor3	0,01020
172	142	0,41226	Sub-Setor3	0,00524
173	130	0,19141	Sub-Setor3	0,00459
174	116	0,29447	Sub-Setor3	0,00864
175	125	0,10307	Sub-Setor3	0,00378
176	129	0,27975	Sub-Setor3	0,00799
177	115	0,16196	Sub-Setor3	0,00507
178	127	0,10307	Sub-Setor3	0,00394
179	140	0,10307	Sub-Setor3	0,00486
180	139	0,00000	Sub-Setor3	0,00059



<b>Nó</b>	<b>Cota</b>	<b>DemandaBase</b>	<b>PadrãoTemporal</b>	<b>Coef.Perdas</b>
181	120	0,01472	Sub-Setor3	0,00767
182	142	0,11779	Sub-Setor3	0,01139
183	141	0,11779	Sub-Setor3	0,00486
184	143	0,08834	Sub-Setor3	0,00475
185	142	0,11779	Sub-Setor3	0,00572
186	145	0,79508	Sub-Setor3	0,01312
187	140	0,07362	Sub-Setor3	0,00486
188	141	0,07362	Sub-Setor3	0,00070
189	142	0,01472	Sub-Setor3	0,00275
190	139	0,08834	Sub-Setor3	0,00367
191	140	0,04417	Sub-Setor3	0,00324
192	142	0,22086	Sub-Setor3	0,01085
193	138	0,19141	Sub-Setor3	0,00950
194	142	0,00000	Sub-Setor3	0,01306
195	135	0,11779	Sub-Setor3	0,00000
196	129	0,58895	Sub-Setor3	0,01101
197	135	0,00000	Sub-Setor3	0,00146
198	122	0,33865	Sub-Setor3	0,01344
199	131	0,00000	Sub-Setor3	0,00146
200	131	0,00000	Sub-Setor3	0,00162
201	120	0,54478	Sub-Setor3	0,01323
202	131	0,60367	Sub-Setor3	0,00621
203	129	0,10307	Sub-Setor3	0,00534
204	130	0,00000	Sub-Setor3	0,00027
205	131	0,02945	Sub-Setor3	0,00443
206	129	0,01472	Sub-Setor3	0,00140
207	121	0,02945	Sub-Setor3	0,00178
208	126	0,08834	Sub-Setor3	0,00324
209	120	0,08834	Sub-Setor3	0,00351
210	125	0,04417	Sub-Setor3	0,00551
211	118	0,13251	Sub-Setor3	0,00335
212	109	0,39754	Sub-Setor3	0,00518
213	116	0,01472	Sub-Setor3	0,00405
214	118	0,07362	Sub-Setor3	0,00211
215	107	0,13251	Sub-Setor3	0,00632
216	110	0,00000	Sub-Setor3	0,00059
217	105	0,17668	Sub-Setor3	0,00632
218	116	0,19141	Sub-Setor3	0,00691
219	113	0,09282	Sub-Setor2	0,01528
220	110	0,02063	Sub-Setor2	0,02127
221	120	0,00481	Sub-Setor2	0,00432
222	109	0,00756	Sub-Setor2	0,00270
223	132	1,00000	VRP	0,00130
224	141	0,02945	Sub-Setor3	0,00599
225	125	0,01016	Sub-Setor1	0,00308
226	102	0,00069	Sub-Setor2	0,00000
227	101	0,03025	Sub-Setor2	0,00756
228	132	0,00406	Sub-Setor1	0,00270
229	132	0,00813	Sub-Setor1	0,00739
230	145	1,00000	VRP	0,03099

Nó	Cota	DemandaBase	PadrãoTemporal	Coef.Perdas
231	101	0,00825	Sub-Setor2	0,00211
232	130	0,00000		0,00027
233	126	0,08834	Sub-Setor3	0,00194
234	130	0,00000		0,00000
RES	125	-	RES	-

Quadro 8.2 – Propriedades dos trechos.

Trecho	Nó início	Nó fim	Comprimento	Diâmetro	Coef. Rugosidade
1	164	2	286	75	0,025
2	164	3	21	300	0,025
3	56	228	50	50	0,0015
4	4	5	333	300	0,025
5	4	6	159	50	0,025
6	6	7	7	75	0,0015
7	7	8	153	75	0,0015
8	3	4	5	300	0,025
9	9	10	347	300	0,025
10	10	11	112	300	0,025
11	11	12	138	50	0,025
12	12	13	130	50	0,025
13	12	14	105	50	0,025
14	12	16	102	50	0,025
15	16	15	94	50	0,025
16	16	18	142	50	0,025
17	16	17	126	50	0,025
18	11	19	136	300	0,025
19	19	20	135	250	0,0015
20	20	21	488	50	0,0015
21	20	22	260	100	3,413
22	22	23	112	50	7,234
23	23	24	113	50	0,025
24	23	25	97	50	2,549
25	25	26	61	50	0,025
26	25	27	80	50	0,025
27	27	28	40	50	0,025
28	27	29	38	50	0,025
29	22	64	67	100	5,993
30	64	65	55	50	0,025
31	64	66	77	100	6,242
32	66	41	188	50	0,025
33	41	31	17	50	0,025
34	31	30	154	50	0,025
35	33	32	151	50	0,025
36	33	34	163	50	0,025
37	38	33	73	50	0,025
38	33	36	80	50	0,025
39	36	35	88	50	0,025

Trecho	Nó início	Nó fim	Comprimento	Diâmetro	Coef. Rugosidade
40	36	37	50	50	0,025
41	39	38	103	50	0,025
42	39	40	83	50	0,025
43	3	9	129	300	0,025
44	42	41	69	50	0,025
45	42	43	72	50	0,025
46	43	44	72	50	0,025
47	44	45	72	50	0,025
48	45	46	72	50	0,025
49	46	47	47	50	0,025
50	43	48	114	50	0,025
51	44	49	158	50	0,025
52	49	50	23	50	0,025
53	45	51	195	50	10
54	51	52	68	50	0,025
55	51	53	71	50	3,583
56	53	54	132	50	0,025
57	53	55	72	50	1,182
58	55	56	132	50	0,025
59	55	57	50	50	0,025
60	66	67	72	100	4,371
61	67	42	176	50	0,025
62	42	39	69	50	0,025
63	67	68	75	100	4,223
64	68	43	166	50	0,025
65	69	44	151	50	0,025
66	68	69	73	100	10
67	70	45	147	50	7,855
68	234	223	24	350	1,499
69	71	72	67	100	0,025
70	46	62	70	50	0,025
71	62	63	60	50	0,025
72	62	60	50	50	0,025
73	60	61	35	50	0,025
74	60	58	71	50	0,025
75	58	59	63	50	0,025
76	20	73	17	250	1,914
77	73	74	94	100	6,285
78	74	75	15	100	0,025
79	69	70	74	100	7,801
80	70	71	71	100	2,554
81	75	76	322	100	0,025
82	76	81	127	50	0,025
83	81	82	92	50	0,025
84	RES	232	5	350	0,025
85	88	97	337	50	0,0015
86	88	94	20	50	0,025
87	94	95	440	50	0,0015
88	95	96	477	50	0,0015
89	88	89	311	50	0,0015

Trecho	Nó início	Nó fim	Comprimento	Diâmetro	Coef. Rugosidade
90	89	90	95	50	0,025
91	89	91	48	50	0,0015
92	91	92	114	50	0,025
93	91	93	40	50	0,0015
94	76	77	72	100	0,025
95	77	78	74	100	0,025
96	78	85	120	50	0,025
97	85	84	100	50	0,025
98	85	86	99	50	0,025
99	86	221	80	50	0,025
100	86	87	152	50	0,025
101	78	79	286	100	0,025
102	79	80	189	50	0,0015
103	77	83	179	50	0,025
104	75	98	383	50	0,0015
105	98	99	67	50	0,025
106	99	100	142	50	0,025
107	99	101	105	50	0,025
108	101	102	64	50	0,025
109	98	103	176	50	0,0015
110	103	104	109	50	0,0015
111	103	105	83	75	0,0015
112	105	106	113	50	0,0015
113	105	107	188	75	0,0015
114	107	108	56	50	0,0015
115	107	109	306	50	0,0015
116	107	110	165	50	0,0015
117	110	111	106	50	0,0015
118	111	115	32	50	0,0015
119	111	112	134	50	0,0015
120	112	113	38	50	0,0015
121	112	114	87	50	0,0015
122	110	120	115	50	0,0015
123	120	121	180	50	0,0015
124	110	116	165	50	0,0015
125	116	117	90	50	0,0015
126	116	118	30	50	0,0015
127	116	119	44	50	0,0015
128	74	122	113	75	0,0015
129	122	222	50	50	0,025
130	122	123	270	75	0,0015
131	123	124	89	50	0,0015
132	124	125	67	50	0,025
133	125	126	34	50	0,025
134	125	127	61	50	0,025
135	125	128	52	50	0,025
136	128	129	57	50	0,025
137	128	130	61	50	0,025
138	130	131	72	50	0,025
139	124	133	75	50	0,0015

140	133	134	154	50	0,025
141	134	135	65	50	0,0015
142	123	136	12	75	1,542
143	136	137	164	50	0,0015
144	137	138	103	50	0,025
145	138	139	212	50	0,0015
146	138	140	123	50	0,0015
147	136	141	103	75	0,0015
148	141	142	435	50	0,0015
149	141	143	67	75	0,0015
150	143	144	120	75	5,113
151	144	145	132	50	0,025
152	145	146	54	50	0,025
153	146	147	62	50	0,025
154	146	148	112	50	0,025
155	145	149	117	50	0,025
156	149	150	57	100	0,025
157	149	151	121	50	0,025
158	168	194	242	50	0,0015
159	144	152	119	75	2,476
160	152	153	127	50	0,025
161	153	154	119	50	0,025
162	153	155	77	50	0,025
163	155	156	118	50	0,0015
164	155	157	12	50	0,0015
165	157	159	118	50	0,0015
166	157	161	178	50	0,025
167	157	158	99	50	0,0015
168	81	226	20	50	0,025
169	226	88	85	50	0,025
170	163	219	283	50	0,025
171	163	162	62	75	0,0015
172	162	220	394	50	0,0015
173	162	165	15	50	0,0015
174	165	166	96	50	0,0015
175	165	167	282	50	0,0015
176	223	230	574	300	2,672
177	73	168	246	200	10
178	168	169	182	200	10
179	169	170	71	50	0,025
180	170	171	189	50	0,025
181	170	172	97	50	0,025
182	169	179	90	100	0,025
183	179	180	11	50	0,0015
184	180	181	142	50	0,0015
185	169	173	85	50	0,025
186	173	174	160	50	0,025
187	173	178	73	50	0,025
188	173	175	70	50	0,025
189	175	176	148	50	0,025
190	175	177	94	50	0,025

Trecho	Nó início	Nó fim	Comprimento	Diâmetro	Coef. Rugosidade
191	179	188	13	100	0,025
192	188	189	51	50	0,0015
193	189	190	68	50	0,0015
194	190	191	60	50	0,0015
195	188	182	90	100	0,025
196	182	183	90	50	0,0015
197	183	184	88	50	0,025
198	183	224	111	50	0,0015
199	184	185	106	50	0,025
200	185	186	243	50	0,0015
201	185	187	90	50	0,0015
202	230	164	344	300	0,138
206	195	196	204	50	0,025
207	195	197	27	100	0,025
208	197	198	249	50	0,0015
209	197	199	27	100	0,025
210	199	200	30	50	0,0015
211	200	201	245	50	0,0015
212	200	204	5	50	0,0015
213	204	205	82	50	0,0015
214	205	206	26	50	0,0015
215	206	207	33	50	0,0015
216	199	202	115	100	0,025
217	202	203	99	100	0,025
218	202	208	60	50	0,0015
219	208	209	65	50	0,0015
220	209	210	102	50	0,025
221	210	211	62	50	0,025
222	211	213	75	50	0,025
223	213	214	39	50	0,025
224	213	215	117	50	0,0015
225	213	216	11	50	0,025
226	216	217	117	50	0,0015
227	216	218	128	50	0,025
228	130	132	155	50	0,025
229	31	39	84	50	0,025
230	211	212	96	50	0,025
231	71	229	66	50	0,025
232	229	225	57	50	0,025
233	46	229	71	50	0,025
235	226	227	140	50	0,0015
237	94	231	39	50	0,025
238	153	145	118	50	0,025
239	154	149	121	100	0,025
240	156	154	74	100	0,025
241	159	156	12	100	0,025
242	159	160	207	100	0,025
243	152	163	226	75	0,0015
245	182	195	121	100	0,025
246	193	192	201	50	0,0015

Trecho	Nó início	Nó fim	Comprimento	Diâmetro	Coef. Rugosidade
247	203	193	176	50	0,0015
248	204	233	36	50	0,0015
VRP	232	234	-	350	-

Quadro 8.3 – Padrões temporais

Hora	Sub-Sector 1	Sub-Sector 2	Sub-Sector 3	RES	VRP
00:00	0,01761	-1,59396	0,84254	1,368	14,0321
00:05	0,01761	-1,54358	0,83905	1,368	13,3965
00:10	0,01761	-1,85983	0,86415	1,368	13,4547
00:15	-0,11050	-1,85983	0,87392	1,368	13,4547
00:20	-0,11050	-1,97346	0,88228	1,368	13,4547
00:25	-0,27511	-2,15033	0,90878	1,368	12,7284
00:30	-0,27511	-2,26396	0,91854	1,368	13,3788
00:35	-0,27511	-2,45483	0,84643	1,368	13,3788
00:40	-0,41246	-2,27152	0,84225	1,368	12,6979
00:45	-0,41246	-2,15789	0,83318	1,368	12,6979
00:50	-0,41246	-2,20827	0,83737	1,376	12,6979
00:55	-0,60448	-2,78927	0,89803	1,376	11,9715
01:00	-0,60448	-2,78927	0,89803	1,376	12,1026
01:05	-0,60448	-2,78927	0,89803	1,376	12,1026
01:10	-0,60448	-3,29947	0,85451	1,376	11,2854
01:15	-0,60448	-3,55024	0,87613	1,376	11,2854
01:20	-0,60448	-3,55024	0,87613	1,376	11,2854
01:25	-0,61342	-3,83431	0,79174	1,376	10,5137
01:30	-0,61342	-4,02826	0,80778	1,376	9,6512
01:35	-0,61342	-4,02826	0,80778	1,376	9,6512
01:40	-0,61342	-4,24795	0,82660	1,376	9,6512
01:45	-0,61342	-4,37865	0,83915	1,376	9,6512
01:50	-0,61342	-4,37865	0,83915	1,376	9,6512
01:55	-0,61342	-4,38621	0,74442	1,384	9,6512
02:00	-0,79650	-4,38621	0,75837	1,384	9,6512
02:05	-0,79650	-4,38621	0,75837	1,384	9,6512
02:10	-0,79650	-4,25551	0,74651	1,384	9,6512
02:15	-0,79650	-4,14188	0,73745	1,384	9,6512
02:20	-0,79650	-4,14188	0,83218	1,384	9,6512
02:25	-0,79650	-4,24795	0,84125	1,384	9,6512
02:30	-0,99789	-4,37865	0,86844	1,384	9,6512
02:35	-0,99789	-4,37865	0,86844	1,384	9,6006
02:40	-0,79650	-4,37865	0,85310	1,384	9,6006
02:45	-0,79650	-4,49760	0,86356	1,384	9,6006
02:50	-0,79650	-4,49760	0,86356	1,384	9,6006
02:55	-0,79650	-4,50516	0,76883	1,384	9,6006
03:00	-0,79650	-4,66160	0,78277	1,384	9,6006
03:05	-0,79650	-4,66160	0,78277	1,384	9,6006
03:10	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,6927
03:15	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,6927
03:20	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,6927

Hora	Sub-Sector 1	Sub-Sector 2	Sub-Sector 3	RES	VRP
03:25	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,5039
03:30	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,5039
03:35	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,5039
03:40	-0,99789	-4,66160	0,79742	1,384	8,5039
03:45	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
03:50	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
03:55	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:00	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:05	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:10	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:15	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:20	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:25	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:30	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	8,5039
04:35	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
04:40	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
04:45	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
04:50	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
04:55	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:00	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:05	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:10	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:15	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:20	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:25	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:30	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:35	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:40	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:45	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:50	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
05:55	-1,25411	-4,66916	0,69289	1,384	7,5052
06:00	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	7,5052
06:05	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	7,5052
06:10	-1,00684	-4,66916	0,67406	1,384	7,5052
06:15	-1,00684	-4,04337	0,61967	1,384	7,5052
06:20	-1,00684	-4,04337	0,61967	1,384	7,5052
06:25	-1,00684	-3,84942	0,60293	1,376	7,5579
06:30	-0,80544	-3,58046	0,56389	1,376	7,5579
06:35	-0,80544	-3,17213	0,52972	1,376	7,5579
06:40	-0,79650	-2,81194	0,62448	1,368	8,6927
06:45	-0,79650	-2,47749	0,59799	1,368	9,6006
06:50	-0,61342	-2,47749	0,58334	1,368	9,6006
06:55	-0,61342	-1,88250	0,63066	1,368	10,5086
07:00	-0,61342	-1,88250	0,63066	1,368	10,5086
07:05	-0,28406	-1,62418	0,58603	1,368	10,5137
07:10	-0,28406	-0,88757	0,63556	1,368	11,2854
07:15	-0,27511	-0,64408	0,70348	1,368	12,8289
07:20	0,14572	-0,64408	0,67350	1,368	13,5552
07:25	0,26474	-0,42103	0,73306	1,352	14,2361
07:30	0,70374	0,75749	0,61452	1,352	14,9625



Hora	Sub-Sector 1	Sub-Sector 2	Sub-Sector 3	RES	VRP
07:35	0,60305	-0,00067	0,67867	1,352	15,4216
07:40	0,11766	0,03974	0,65405	1,352	29,8332
07:45	0,11766	2,44434	0,48321	1,352	28,9192
07:50	1,25118	2,20225	1,02686	1,352	27,5119
07:55	1,71746	1,43962	1,04777	1,352	26,4224
08:00	1,25118	1,12001	1,10286	1,352	25,6507
08:05	1,16895	1,43962	1,08543	1,352	25,6507
08:10	1,25118	1,43962	1,07985	1,352	25,2875
08:15	1,32447	1,59299	1,06242	1,352	25,2875
08:20	1,25118	1,27982	1,09101	1,352	25,2875
08:25	1,92780	0,96021	1,06660	1,352	25,2875
08:30	1,49802	1,44718	1,11846	1,352	25,2875
08:35	1,99171	1,74747	1,06268	1,352	25,2875
08:40	1,92780	1,60054	1,07732	1,352	24,8441
08:45	2,70469	2,06176	0,99155	1,352	24,8441
08:50	2,26597	2,06176	1,02084	1,352	24,8441
08:55	2,70469	1,12001	1,05780	1,352	24,8441
09:00	2,94244	1,12001	1,04176	1,352	24,8441
09:05	3,11600	1,27982	1,01875	1,352	25,0974
09:10	2,64078	2,06176	0,99643	1,352	25,5059
09:15	2,64078	1,44718	1,04036	1,352	25,8237
09:20	2,81448	1,60054	1,01665	1,352	25,8237
09:25	2,76860	2,06931	1,04411	1,352	25,7888
09:30	2,64078	1,44718	1,09571	1,352	25,7381
09:35	2,95139	1,75503	1,05387	1,352	25,3242
09:40	3,49961	2,50478	0,96461	1,352	25,3242
09:45	3,23459	4,89621	0,87910	1,344	25,3242
09:50	4,02937	5,71285	0,77660	1,344	25,6873
09:55	3,50856	4,78791	0,92070	1,344	26,0051
10:00	2,88733	5,12486	0,94092	1,344	26,3471
10:05	2,77755	5,13241	1,05130	1,344	25,9628
10:10	2,53085	5,61098	0,98530	1,344	25,9628
10:15	3,01516	5,37813	0,96857	1,344	26,6891
10:20	2,65867	5,49511	0,98530	1,344	27,3489
10:25	2,34791	6,07891	0,96996	1,344	26,9941
10:30	2,34791	5,12486	1,02993	1,344	26,9941
10:35	2,34791	4,52399	1,06828	1,344	27,2749
10:40	2,65867	5,13241	1,00762	1,344	27,2749
10:45	2,13771	5,26115	1,03481	1,344	27,2749
10:50	2,65867	5,26115	0,99925	1,344	27,2749
10:55	2,96033	5,13241	0,98809	1,344	27,2749
11:00	2,96033	5,37813	0,97205	1,344	27,6380
11:05	3,50856	5,00900	0,96020	1,344	27,6380
11:10	2,65867	4,91888	1,02156	1,344	27,9558
11:15	2,34791	4,52399	1,06898	1,344	27,9558
11:20	2,96033	5,13241	0,98809	1,344	27,9558
11:25	3,01516	4,52399	1,02366	1,344	27,6380
11:30	3,67303	4,01436	1,01389	1,344	27,9558
11:35	3,24354	4,53155	1,06037	1,344	27,9558
11:40	3,51750	4,02192	1,07571	1,344	27,6380

Hora	Sub-Sektor 1	Sub-Sektor 2	Sub-Sektor 3	RES	VRP
11:45	2,96928	4,28051	1,09523	1,336	27,6380
11:50	3,02410	4,40281	1,08338	1,336	27,6380
11:55	2,89628	4,15709	1,10779	1,336	27,6380
12:00	2,71363	4,80302	1,02505	1,336	27,6380
12:05	2,59476	4,01436	1,08502	1,336	27,6380
12:10	2,65867	3,89206	1,08920	1,336	27,2749
12:15	2,34791	4,52399	1,06828	1,336	27,0025
12:20	2,34791	4,01436	1,10245	1,336	27,2749
12:25	2,40288	3,89206	1,10594	1,336	27,6380
12:30	2,65867	4,27296	1,06410	1,336	27,9558
12:35	2,07380	4,27296	1,10315	1,336	27,6380
12:40	1,94569	4,79546	1,07805	1,336	27,2749
12:45	2,13771	4,67960	1,07247	1,336	27,2749
12:50	2,13771	4,80302	1,06480	1,336	28,3190
12:55	2,40288	5,01655	1,03272	1,336	28,3190
13:00	2,72258	4,42100	1,05015	1,336	28,3190
13:05	3,02410	4,68715	1,06525	1,336	28,9545
13:10	2,60370	5,14752	1,06455	1,336	29,9078
13:15	3,51750	5,03166	1,06361	1,336	29,9078
13:20	2,96928	5,03166	1,09987	1,336	29,8708
13:25	2,90523	4,70226	1,18241	1,336	29,5160
13:30	2,79544	4,90404	1,22490	1,336	29,1983
13:35	3,31625	4,70982	1,20258	1,336	29,1983
13:40	3,52645	5,04677	1,21439	1,336	29,1983
13:45	3,80042	4,30318	1,24646	1,336	29,1983
13:50	3,59036	4,05214	1,27645	1,336	29,1983
13:55	4,30277	4,56177	1,19696	1,336	29,1983
14:00	4,30277	4,71737	1,18650	1,336	29,1983
14:05	3,52645	4,71737	1,23600	1,336	28,9175
14:10	4,30277	4,04458	1,23043	1,336	28,9545
14:15	3,52645	4,83324	1,22764	1,336	28,3190
14:20	3,30730	4,82568	1,19422	1,336	28,3190
14:25	3,25248	4,17976	1,24024	1,336	27,6380
14:30	3,03305	4,12826	1,25907	1,336	27,2749
14:35	3,25248	3,64438	1,27580	1,336	27,0025
14:40	2,96928	3,90717	1,22774	1,336	26,6393
14:45	2,66762	3,50053	1,22050	1,336	27,9558
14:50	2,41183	3,89962	1,20935	1,336	26,6393
14:55	2,65867	3,49298	1,16706	1,336	26,2762
15:00	2,33897	3,07990	1,16451	1,336	25,9584
15:05	2,88733	3,07990	1,12686	1,336	25,2775
15:10	2,64972	3,16358	1,13732	1,336	25,6322
15:15	2,33897	3,27301	1,15057	1,336	25,2237
15:20	2,27491	2,94473	1,17776	1,336	24,4973
15:25	2,40288	2,64751	1,13617	1,336	24,1712
15:30	2,46693	2,51989	1,14035	1,336	24,1712
15:35	2,12877	2,78269	1,14593	1,336	24,1712
15:40	2,64972	2,92962	1,04785	1,336	24,1712
15:45	3,00621	2,92206	0,96810	1,336	24,1923
15:50	2,70469	2,63996	1,00785	1,336	24,5767

Hora	Sub-Sector 1	Sub-Sector 2	Sub-Sector 3	RES	VRP
15:55	2,33002	2,50478	1,04132	1,336	24,5767
16:00	3,00621	2,92962	0,96810	1,336	24,9610
16:05	1,85466	2,77513	1,05666	1,336	24,5525
16:10	1,85466	2,76758	1,05666	1,336	24,2347
16:15	2,52190	2,92206	1,00018	1,336	24,2347
16:20	1,98277	2,91451	0,98109	1,336	24,2347
16:25	1,98277	2,62485	0,94457	1,336	24,2347
16:30	1,92780	2,91451	0,92854	1,336	23,8261
16:35	1,63537	3,31891	0,92017	1,336	23,0998
16:40	1,63537	3,04212	0,93900	1,336	23,0998
16:45	1,32447	2,91451	0,96968	1,336	23,0998
16:50	1,70851	2,62485	0,96270	1,336	23,0998
16:55	1,63537	2,48967	0,97665	1,336	23,0998
17:00	1,40670	2,62485	0,98362	1,336	23,0998
17:05	1,24223	3,17730	0,95713	1,336	23,0998
17:10	1,08671	2,10458	1,04289	1,336	23,0998
17:15	1,00434	2,76002	1,00315	1,336	23,0998
17:20	1,63537	2,48967	0,97665	1,336	23,0998
17:25	2,94244	2,04665	0,91877	1,336	23,0998
17:30	2,51295	2,62485	0,90762	1,336	23,0998
17:35	1,98277	2,19470	0,97386	1,336	23,0998
17:40	1,78165	2,19470	0,98711	1,336	22,6458
17:45	1,98277	2,90695	0,92365	1,336	21,0570
17:50	2,05591	2,48967	0,94736	1,336	21,4709
17:55	1,91885	2,32875	0,96758	1,336	21,4762
18:00	1,84571	2,90695	0,93272	1,336	21,4762
18:05	1,40670	2,19470	1,01361	1,336	21,9197
18:10	1,32447	2,48212	0,93823	1,336	22,3283
18:15	1,16000	2,48212	0,94939	1,336	22,8013
18:20	1,16000	2,32875	0,95985	1,336	22,8013
18:25	1,16000	2,32875	0,95985	1,336	22,8013
18:30	1,24223	2,48212	0,94381	1,336	22,8013
18:35	1,08671	2,04665	0,98635	1,336	23,2447
18:40	0,82169	1,87285	0,95560	1,352	23,2447
18:45	0,99539	1,42451	0,97583	1,352	23,2447
18:50	0,91301	2,03909	0,93817	1,352	22,8362
18:55	0,82169	2,03909	0,94375	1,352	22,8362
19:00	0,54715	1,86530	0,97583	1,352	22,8362
19:05	0,54715	2,03909	0,96397	1,344	23,2447
19:10	0,82169	2,17959	0,93399	1,344	23,2447
19:15	0,54715	1,87285	0,97583	1,344	23,2447
19:20	0,82169	1,87285	0,95560	1,344	23,2447
19:25	0,82169	1,57788	0,97652	1,344	23,2447
19:30	0,63876	1,57788	0,98907	1,344	23,2447
19:35	0,63876	1,57788	0,98907	1,344	23,2447
19:40	0,53820	1,09735	0,96619	1,344	23,2447
19:45	0,99539	1,09735	0,93412	1,344	23,2447
19:50	0,90407	1,71725	0,89577	1,344	23,2447
19:55	1,23329	0,76487	0,94109	1,344	23,2447
20:00	1,07777	0,96217	0,93760	1,344	23,2447

Hora	Sub-Sector 1	Sub-Sector 2	Sub-Sector 3	RES	VRP
20:05	0,73023	1,09735	0,95295	1,344	23,2447
20:10	0,63876	1,41695	0,93691	1,344	23,2447
20:15	0,53820	2,25571	0,88461	1,344	23,2447
20:20	0,82169	2,03154	0,87973	1,344	22,8013
20:25	0,53820	1,41695	0,94318	1,344	22,8013
20:30	0,63876	1,71725	0,91459	1,344	22,8013
20:35	0,91301	1,86530	0,95002	1,344	22,8013
20:40	0,99539	1,42451	1,03586	1,344	22,8013
20:45	0,83064	1,42451	1,04771	1,344	22,8013
20:50	0,44645	1,26471	1,08746	1,344	22,3927
20:55	0,44645	-0,29247	1,20182	1,344	21,9842
21:00	0,83064	-0,10803	1,15998	1,352	21,5756
21:05	1,12386	0,81037	1,21855	1,352	13,2358
21:10	0,83114	0,44039	1,26736	1,352	13,3590
21:15	0,83114	0,44039	1,26736	1,352	13,3590
21:20	-0,38562	0,44039	1,35801	1,352	12,8143
21:25	-0,40351	0,41017	1,02555	1,352	12,8143
21:30	-0,25722	0,78015	0,98650	1,352	12,8143
21:35	-0,25722	1,49017	0,93490	1,352	12,8143
21:40	0,02655	1,49017	0,91328	1,352	12,8143
21:45	0,02655	1,31638	0,85643	1,352	12,8143
21:50	0,02655	1,27775	0,85922	1,352	13,7308
21:55	-0,10156	1,25312	0,87038	1,352	13,6590
22:00	-0,10156	1,31638	0,86619	1,352	13,6010
22:05	-0,10156	0,95815	0,89130	1,352	13,0109
22:10	-0,10156	0,91953	0,89409	1,352	13,0109
22:15	-0,26617	0,69535	0,84459	1,352	13,5135
22:20	0,02655	0,77260	0,81810	1,352	14,6938
22:25	0,02655	0,59460	0,83204	1,352	15,2385
22:30	0,15466	0,77260	0,80973	1,352	15,7833
22:35	0,15466	0,40261	0,83692	1,352	15,7833
22:40	0,15466	0,21930	0,92895	1,352	15,7833
22:45	0,15466	0,96570	0,87386	1,352	15,7833
22:50	0,28263	0,41017	0,90524	1,352	15,7833
22:55	0,28263	0,41772	0,97534	1,352	15,7833
23:00	0,28263	0,22686	0,98999	1,352	15,7833
23:05	0,28263	0,21930	0,98929	1,352	15,2385
23:10	0,28263	0,02199	1,00463	1,352	15,2385
23:15	0,28263	-0,39081	1,03740	1,352	15,2385
23:20	0,28263	-0,70286	1,06111	1,360	14,1912
23:25	0,27368	-0,19574	0,94987	1,360	13,6010
23:30	0,15466	-0,40592	0,97497	1,360	13,0109
23:35	0,15466	-0,19574	0,95893	1,360	12,4208
23:40	0,15466	-0,19574	0,95893	1,360	12,4208
23:45	0,15466	-0,20330	0,88085	1,360	12,4208
23:50	0,15466	-0,15824	0,87737	1,368	12,4208
23:55	0,15466	-0,40592	0,97497	1,368	12,4208

Quadro 8.4 – Regras de operação da VRP.

<i>RULE 1</i>	
<i>IF SYSTEM TIME = 00:00</i>	
<i>THEN VALVE VRP SETTING IS</i>	26
<i>RULE 2</i>	
<i>IF SYSTEM TIME = 07:35</i>	
<i>THEN VALVE VRP SETTING IS</i>	26
<i>RULE 3</i>	
<i>IF SYSTEM TIME = 07:40</i>	
<i>THEN VALVE VRP SETTING IS</i>	36
<i>RULE 4</i>	
<i>IF SYSTEM TIME = 21:00</i>	
<i>THEN VALVE VRP SETTING IS</i>	36
<i>RULE 5</i>	
<i>IF SYSTEM TIME = 21:05</i>	
<i>THEN VALVE VRP SETTING IS</i>	26
<i>RULE 6</i>	
<i>IF SYSTEM TIME = 24:00</i>	
<i>THEN VALVE VRP SETTING IS</i>	26

**B – Dados Observados e Cálculos "N" e "C<sub>d</sub>"**

Quadro 8.5 – Dados de vazão e pressão observados.

Dia	Manobra VRP	Vazão (L/s)	Pressão (m.c.a.)							
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
03/04/02	40,0	29,74	31,0					37,0	59,0	
	35,0	27,19	25,0					33,0	52,0	
	30,0	25,53	20,0					29,0	48,0	
	25,0	24,29	15,0					24,0	43,0	
	20,0	22,27	9,0					21,0	37,0	
04/04/02	40,0	27,26	31,0		15,0	9,5		55,0	55,0	
	35,0	24,77	25,0		13,0	8,0		49,0	49,0	
	30,0	23,46	19,0		12,0	7,0		45,0	45,0	
	25,0	20,79	14,0		10,0	6,0		39,0	40,0	
	20,0	19,01	9,0		9,0	5,0		33,0	36,0	
06/04/02	40,0	30,00	30,0					23,0	54,0	58,0
	35,0	27,88	25,0					21,5	50,0	53,0
	30,0	24,98	20,0					20,0	45,0	47,0
	25,0	22,68	14,0					19,0	39,0	42,0
	20,0	21,08	9,0					18,0	33,0	38,0
09/04/02	40,0	22,08	29,0					52,0	59,0	22,0
	35,0	19,83	24,0					47,0	54,0	18,0
	30,0	18,59	19,0					43,0	49,0	13,0
	20,0	14,68	10,0					35,0	40,0	4,0
10/04/02	40,0	26,62		26,0	37,5			54,0	58,0	24,0
	35,0	24,49		23,0	34,0			49,0	54,0	18,0
	30,0	22,60		19,0	31,0			45,0	49,0	12,0
	25,0	20,00		15,0	27,0			39,0	42,0	7,0
	20,0	17,63		10,5	22,5			32,0	32,0	2,0
11/04/02	40,0	27,80		38,0	50,0				62,0	
	35,0	23,54		31,0	43,5				55,0	
	30,0	21,23		28,5	38,0				46,0	
	25,0	20,40		25,0	35,0				43,0	
	20,0	18,45		23,0	32,5				39,0	

Fonte: VIEGAS (2003), Quadro 4.5 Dados de Vazão e Pressão coletados.

Quadro 8.6 – Cálculo "N" – expoente do emissor.

<b>Dia</b>	<b>Manobra</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>N4</b>	<b>N5</b>	<b>N6</b>	<b>N7</b>	<b>Média</b>
03/04/02	35	0,417				0,784	0,710		<b>0,637</b>
	30	0,348				0,627	0,740		<b>0,572</b>
	25	0,279				0,468	0,640		<b>0,462</b>
	20	0,234				0,511	0,620		<b>0,455</b>
04/04/02	35	0,445		0,669	0,557	0,829	0,829		<b>0,666</b>
	30	0,307		0,673	0,492	0,748	0,748		<b>0,593</b>
	25	0,341		0,668	0,590	0,788	0,851		<b>0,648</b>
	20	0,291		0,706	0,562	0,706	0,851		<b>0,623</b>
06/04/02	35	0,402			1,087	0,952	0,813		<b>0,813</b>
	30	0,452			1,310	1,004	0,871		<b>0,909</b>
	25	0,367			1,464	0,860	0,867		<b>0,889</b>
	20	0,293			1,440	0,717	0,834		<b>0,821</b>
09/04/02	35	0,568				1,063	1,214	0,536	<b>0,845</b>
	30	0,407				0,905	0,926	0,327	<b>0,641</b>
	20	0,383				1,031	1,050	0,239	<b>0,676</b>
10/04/02	35		0,680	0,851		0,858	1,167	0,290	<b>0,769</b>
	30		0,522	0,860		0,898	0,971	0,236	<b>0,697</b>
	25		0,520	0,870		0,879	0,886	0,232	<b>0,677</b>
	20		0,454	0,807		0,788	0,693	0,166	<b>0,581</b>
11/04/02	35		0,817	1,194			1,388		<b>1,133</b>
	30		0,937	0,982			0,903		<b>0,941</b>
	25		0,739	0,868			0,846		<b>0,818</b>
	20		0,817	0,952			0,884		<b>0,884</b>

Quadro 8.7 – N médio dos nós representativos, em cada dia.

<b>Manobra</b>	<b>03/04/02</b>	<b>04/04/02</b>	<b>06/04/02</b>	<b>09/04/02</b>	<b>10/04/02</b>	<b>11/04/02</b>	<b>Média</b>
35	0,637	0,666	0,813	0,845	0,769	1,133	<b>0,811</b>
30	0,572	0,593	0,909	0,641	0,697	0,941	<b>0,726</b>
25	0,462	0,648	0,889	-	0,677	0,818	<b>0,699</b>
20	0,455	0,623	0,821	0,676	0,581	0,884	<b>0,673</b>

Quadro 8.8 - Cálculo "C<sub>d</sub>" – coeficiente de descarga (x 10<sup>-5</sup>).

<b>Dia</b>	<b>Cd1</b>	<b>Cd2</b>	<b>Cd3</b>	<b>Cd4</b>	<b>Cd5</b>	<b>Cd6</b>	<b>Cd7</b>	<b>Média</b>
03/04/02	4,2662				3,0380	2,2619		<b>3,1887</b>
	6,4471				4,0387	2,5217		<b>4,3358</b>
	8,8800				5,7976	3,2632		<b>5,9803</b>
	0,12798				6,3999	3,8811		<b>7,6930</b>
04/04/02	3,9580		5,5269	7,0118	1,9894	1,9894		<b>4,0951</b>
	6,2608		6,4058	8,5495	2,3958	2,3958		<b>5,2016</b>
	8,6955		7,7913	0,10912	2,5683	2,2806		<b>6,4495</b>
	0,11830		8,2252	0,12514	3,2884	2,3804		<b>7,6477</b>
06/04/02	3,9188			4,8169	1,9989	2,0225		<b>3,1893</b>
	6,2640			4,2009	1,9501	2,1961		<b>3,6528</b>
	9,3405			3,3951	2,5200	2,3378		<b>4,3983</b>
	0,12901			3,1040	3,5542	2,5849		<b>5,5360</b>
09/04/02	3,1842				1,4351	1,1262	3,7802	<b>2,3814</b>
	4,8277				1,6855	1,4595	6,0054	<b>3,4945</b>
	8,4483				1,4072	1,1858	0,13075	<b>6,0292</b>
10/04/02		3,5613	2,5886		1,8890	1,4911	4,4728	<b>2,8006</b>
		5,1394	2,8371		1,9732	1,6809	7,8908	<b>3,9043</b>
		6,7189	3,0185		2,1641	2,0043	0,12109	<b>5,2029</b>
		9,1326	3,5714		2,7821	3,3200	0,19008	<b>7,5628</b>
11/04/02		3,0674	1,6079			1,0089		<b>1,8947</b>
		2,8120	2,0189			1,8954		<b>2,2421</b>
		3,9230	2,4916			2,1650		<b>2,8599</b>
		3,6165	2,1658			2,0621		<b>2,6148</b>

Quadro 8.9 – C<sub>d</sub> médio (x 10<sup>-5</sup>) dos nós representativos, em cada dia.

<b>Manobra</b>	<b>03/04/02</b>	<b>04/04/02</b>	<b>06/04/02</b>	<b>09/04/02</b>	<b>10/04/02</b>	<b>11/04/02</b>	<b>Média</b>
35	3,1887	4,0951	3,1893	2,3814	2,8006	1,8947	<b>2,9250</b>
30	4,3358	5,2016	3,6528	3,4945	3,9043	2,2421	<b>3,8052</b>
25	5,9803	6,4495	4,3983	-	5,2029	2,8599	<b>4,9782</b>
20	7,6930	7,6477	5,5360	6,0292	7,5628	2,6148	<b>6,1806</b>