

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

**AVALIAÇÃO E DETECÇÃO DE VAZAMENTOS EM TEMPO REAL
ATRAVÉS DE MÉTODO INVERSO**

NARUMI ABE

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na Área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Peter Batista Cheung
COORIENTADOR: Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen

Campo Grande, MS
2010

Agradecimentos

Agradeço ao orientador e amigo, prof. Peter, pelo longo período de casamento e ao prof. Steffen, pela coorientação.

Ao Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica e Prosab pelo empréstimo dos equipamentos.

Ao Resan (UFMS) e a Escola de Engenharia de São Carlos (USP) pela utilização dos laboratórios de simulação.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

ABE, N. (2010). *Avaliação e detecção de vazamentos em tempo real através de método inverso*. Campo Grande, 2010. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

Perdas em sistemas de distribuição de água são problemas no Brasil. Segundo dados do SNIS, as perdas no faturamento estão na ordem dos 37,4%. Tendo em vista o alto índice de perdas nacional, este trabalho tem o objetivo de propor uma ferramenta para calibração de modelos desenvolvidos no Epanet para quantificação e localização de regiões com vazamentos em tempo real. Neste trabalho, foram utilizadas técnicas de algoritmos genéticos para realizar a calibração, encontrando valores ótimos para os parâmetros físicos usados nos cálculos dos vazamentos. O trabalho também se propõe a realizar simulações utilizando expoentes de vazamentos locais, ao invés de um expoente para toda a rede. As calibrações foram efetuadas em 3 setores de Campo Grande, Brasil. Os resultados obtidos mostraram índices de vazamentos na ordem de 33.52% a 79%. Além disso, foi proposto uma nova equação para distribuição de vazamentos ao longo do trecho das tubulações como complemento para o método de estimação por nós. A equação proposta apresentou a vantagem de permitir uma melhor localização da região com maiores índices de perdas. Este trabalho foi parte de um projeto de pesquisa financiado pela FINEP e gerou um software disponibilizado gratuitamente chamado Epanet Calibrator. Discussões são feitas sobre a metodologia e os resultados encontrados.

Palavras-chave: Abastecimento de Água, vazamentos, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

ABE, N. (2010). Leakage assessment and detection in real time by inverse problem., 2010. 62 p. Dissertação (Mestrado) - Federal University of Mato Grosso do Sul, Brazil.

Water loss in water distribution systems are problems in Brasil. According data from SNIS, the country spends 37.4% of their billing on water losses. In view of the high rate of national losses, this work have the objective of propose a tool to calibrate models developed in Epanet for quantify and locate leakage zones in real time. In this work, genetic algorithms techniches were used to perform the calibration, in order to find the optimal values for the physical parameters used in leakage calculations. The work also propose to perform simulations using local leakage exponents, instead of an exponent for the entire network. The calibrations were performed in three areas of Campo Grande, Brazil. The results showed levels of leakage in the order of 33.52% to 79%. Furthermore, we proposed a new equation for the distribution of leaks along the stretch of pipe as a substitute for the method of node located estimation. The proposed equation has the advantage of allowing a better location in the region with higher rates of losses. This wor was part of a research project funded by FINEP and created a free software called Epanet Calibrator. Discussions are made on the methodology and findings.

Keywords: Water distribution, water losses, genetic algorithms.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE SIGLAS	vii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
2 Perdas físicas em sistemas de abastecimento	4
2.1 Parâmetros físicos importantes	5
2.2 Modelagem Computacionais de SDA	8
3 Calibração para estimar parâmetros de vazamentos	11
3.1 Criação de zonas homogêneas	13
4 Metodologia	14
4.1 Desenvolvimento do Calibrador	14
4.2 Estimação das Perdas	17
4.3 Incertezas na modelagem	21
4.4 Estudos de caso	22
4.4.1 Caso 1 - Centro	22
4.4.2 Caso 2 - Bairro Cooptrabalho	24
4.4.3 Caso 3 - Bairro Nova Lima	25
5 Resultados	28

5.1	Centro	29
5.2	Coophatrabalho	33
5.3	Nova Lima	41
6	Conclusão	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTA DE FIGURAS

2.1	Efeito do expoente de vazamento na taxa de vazamentos (GREYVENSTEIN; ZYL, 2007)	6
2.2	Representação do dígrafo utilizado no Epanet	10
4.1	Fluxograma de execução do calibrador	15
4.2	Individualização do expoente α	16
4.3	Diagrama das modificações no back-end	17
4.4	Screenshot da calibração em tempo real	18
4.5	Rede exemplo	19
4.6	Mapa do centro de Campo Grande	22
4.7	Divisão do centro em grupos	23
4.8	Gráfico do padrão de demanda (Centro)	23
4.9	Mapa do setor de fornecimento Coophatrabalho	24
4.10	Divisão do setor Coophatrabalho	25
4.11	Gráfico do padrão de demanda (Coophatrabalho)	26
4.12	Mapa do Setor de fornecimento Nova Lima	26
4.13	Grupos criados para o setor Nova Lima	27
4.14	Gráfico do padrão de demanda (Nova Lima)	27
5.1	Vazamentos quantificados através da calibração global (Centro)	30
5.2	Vazamentos quantificados através da calibração local (Centro)	31
5.3	Ajuste de tendência linear para o setor Centro (Global)	32
5.4	Ajuste de tendência linear para o setor Centro (Local)	32
5.5	Distribuição de vazamentos por trechos (Centro)	32

5.6	Vazamentos quantificados através da calibração global com 61 grupos (Coopha-trabalho)	36
5.7	Vazamentos quantificados através da calibração local com 61 grupos (Coopha-trabalho)	36
5.8	Vazamentos quantificados através da calibração global com 4 grupos (Coopha-trabalho)	36
5.9	Vazamentos quantificados através da calibração local com 4 grupos (Coopha-trabalho)	37
5.10	Ajuste de tendência linear para o setor Coophatrabalho com calibração global - 4 setores	37
5.11	Ajuste de tendência linear para o setor Coophatrabalho com calibração local - 4 setores	38
5.12	Ajuste de tendência linear para o setor Coophatrabalho com calibração global - 61 setores	38
5.13	Ajuste de tendência linear para o setor Coophatrabalho com calibração local - 61 setores	38
5.14	Distribuição de vazamentos por trechos utilizando 4 grupos (Coophatrabalho) .	40
5.15	Distribuição de vazamentos por trechos utilizando 61 grupos (Coophatrabalho)	40
5.16	Vazamentos quantificados através da calibração global (Nova Lima)	41
5.17	Vazamentos quantificados através da calibração local (Nova Lima)	42
5.18	Ajuste de tendência linear para o setor Nova Lima com calibração global	43
5.19	Ajuste de tendência linear para o setor Nova Lima com calibração local	43
5.20	Distribuição de vazamentos por techos (Nova Lima)	44

LISTA DE TABELAS

2.1	Valores de expoentes encontrados em tubulações de diferentes materiais (GREY- VENSTEIN; ZYL, 2007).	6
4.1	Coeficientes do padrão de demanda ao longo de 24h (Centro)	23
4.2	Coeficientes do padrão de demanda ao longo de 24h (Coophatrabalho)	25
4.3	Coeficientes do padrão de demanda ao longo de 24h (Nova Lima)	27
5.1	Covariância e coeficiente de Pearson dos dados obtidos	28
5.2	Erros obtidos na calibração (Centro)	29
5.3	Taxa estimada de vazamentos (Centro)	29
5.4	Parâmetros obtidos na calibração (Centro)	30
5.5	Quantificação de vazamentos e vazões por hora em L/s (Centro)	31
5.6	Trechos com maiores vazamentos em L/s (Centro)	33
5.7	Erros obtidos na calibração (Coophatrabalho)	34
5.8	Taxa estimada de vazamentos (Coophatrabalho)	34
5.9	Quantificação de vazamentos e vazões por hora em L/s (Coophatrabalho)	35
5.10	Parâmetros obtidos na calibração (Coophatrabalho)	37
5.11	Trechos com maiores vazamentos em L/s (Coophatrabalho)	39
5.12	Taxa estimada de vazamentos (Nova Lima)	41
5.13	Quantificação de vazamentos e vazões por hora em L/s (Nova Lima)	42
5.14	Parâmetros obtidos na calibração (Nova Lima)	44
5.15	Trechos com maiores vazamentos em L/s (Nova Lima)	45
6.1	Grupos criados para o setor Centro	51
6.2	Grupos criados para o setor Coophatrabalho	52

6.3	Grupos criados para o setor Nova Lima	52
6.4	Vazões referentes ao trecho 563 em L/s (Centro)	53
6.5	Pressões referentes ao nó 304 em mH_2O (Centro)	54
6.6	Pressões referentes ao nó 632 em mH_2O (Centro)	55
6.7	Pressões referentes ao nó 630 em mH_2O (Centro)	56
6.8	Vazões referentes ao trecho 1 em L/s (Coophatrabalho)	57
6.9	Pressões referentes ao nó 36 em mH_2O (Coophatrabalho)	58
6.10	Pressões referentes ao nó 89 em mH_2O (Coophatrabalho)	59
6.11	Vazões referentes ao trecho 5 em L/s (Nova Lima)	60
6.12	Pressões referentes ao nó 808 em mH_2O (Nova Lima)	61
6.13	Pressões referentes ao nó 824 em mH_2O (Nova Lima)	62

LISTA DE SIGLAS

AG - Algoritmos genéticos

MTI - Método do transiente inverso

SDA - Sistema de Distribuição de Água

SDP - Simulação dirigida pela pressão

Capítulo 1

Introdução

Segundo SNIS (2008), a média nacional de perdas no faturamento de água é de 37,4%, menor valor de toda a série histórica de 14 anos do SNIS, iniciada em 1995. Entretanto, este percentual ainda representa um alto valor de perdas. Além do desperdício de recursos naturais, as perdas se refletem no aumento da tarifa para os consumidores e, indiretamente, no maior consumo de energia elétrica pelas companhias de saneamento. Devido a esses problemas, torna-se necessário a criação de mecanismos de quantificação e localização de regiões críticas.

A localização de vazamentos é uma tarefa complexa, devido ao fato de as tubulações estarem enterradas. Mecanismos que auxiliem na localização de vazamentos são fundamentais para o uso mais eficiente de recursos financeiros e humanos. Métodos de localização de vazamentos como correlacionadores de ruído são muito dispendiosos. Estes correlacionadores devem ser espalhados ao longo da rede de distribuição e localizam os vazamentos através da triangulação das medidas acústicas. Outras ações, como geofonamento, exigem mão-de-obra qualificada e em grande quantidade, pois é necessário que se percorram grandes regiões conjuntamente. A localização através de geofonamento é uma tarefa complexa, que demanda tempo e necessita de operadores que conheçam o sistema.

Modelos computacionais de sistemas de abastecimento de água tem sido utilizados nas últimas décadas para predizer dados de fornecimento de água e pressão em pontos da rede. Essas informações são úteis para o gerenciamento da rede de abastecimento, tais como operação de reservatórios e para controle de pressão do sistema. Além disso, os modelos computacionais também podem ser utilizados para simular os vazamentos na rede. Com a determinação da

pressão nos diversos pontos de um sistema de abastecimento, é possível estimar a quantidade de vazamentos e determinar regiões prioritárias para atuação, restringindo os locais onde os operadores devem realizar suas buscas.

Os modelos computacionais somente são efetivos na tarefa de quantificação e localização de vazamentos, se representarem com nível aceitável de fidelidade um sistema de abastecimento real. Para isso, é necessário estimar parâmetros físicos incertos através da calibração dos modelos hidráulicos.

A tarefa de calibração, que outrora exigia longas campanhas de campo para coleta de dados, foi facilitada com o advento dos sistemas de monitoramento e supervisão, e pela redução nos custos de transmissão de dados nos últimos anos. A aquisição dos dados em tempo real possui uma série de vantagens em relação as aquisições pontuais. Entre as vantagens pode-se citar: (i) possibilidade de coletar mais dados por intervalo de tempo e por períodos de tempo maiores; (ii) diminuição nos erros de medição causados por falha humana; (iii) facilita a possibilidade de simultaneidade na aquisição das informações e garante resultados de calibração melhores, pois evita a adição de erros nos dados observados ocasionados pela sazonalidade.

Assim, a quantificação e localização de vazamentos através do uso de modelagem matemática mostra-se como uma ferramenta promissora e necessita de estudos mais aprofundados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal utilizar o processo de calibração para estimar vazamentos espacialmente e quantitativamente em sistemas de abastecimento de água em tempo real.

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Estimar parâmetros do modelo de vazamentos em sistemas reais.
- Estudar a relação existente entre Pressão e Vazão.

- Aprimorar a localização dos possíveis vazamentos por trecho ao invés de nós.

Capítulo 2

Perdas físicas em sistemas de abastecimento

O desenvolvimento de técnicas para detecção de vazamentos iniciou-se na metade do século 20 em oleodutos. As detecções de vazamentos era realizadas comparando dados de pressão e vazão com resultados de simulações computacionais. Diferenças encontradas nas comparações apontariam o rompimento na tubulação ou em válvulas abertas. Atualmente, inúmeras técnicas de detecção e localização de vazamentos são usadas nas indústrias de água, óleo e gás. Podem ser classificados em métodos de observação direta e métodos baseados em inferência (COVAS et al., 2005).

- Observação direta: baseados na inspeção das características internas ou externas das tubulações via observações diretas ou através do uso de aparelhos.
- Métodos baseados em inferência: utilizam alguma técnica de modelagem matemática.

Outros autores (TURNER, 1991; BOSE; OLSON, 1993; CARLSON, 1993) classificam os métodos de detecção de vazamentos em três grupos. São eles:

- Métodos Biológicos: operadores experientes ou cães treinados podem detectar vazamentos por inspeção visual, odor ou percepção de sons característicos.
- Métodos baseados em software: Diversos softwares são utilizados para detectar vazamentos em um trecho de tubulação. A complexidade na utilização e a precisão variam sig-

nificativamente. Exemplos desses métodos são detecção de mudanças na vazão/pressão, balanço massa/volume, sistemas de modelação dinâmica e análise de pressão pontual.

- Métodos baseados em equipamentos: Diferentes equipamentos são utilizados para auxiliar na detecção e localização de vazamentos. Aparelhos típicos incluem sensores acústicos, detectores de gás, detectores de pressão negativa e termografia infravermelha.

Todos os grupos de métodos citados acima possuem vantagens e desvantagens. Um problema comum da maioria desses métodos é a alta taxa de falsos alarmes, isto é, a localização de vazamentos em tubulações sob operações normais. A desvantagem dos métodos biológicos é a alta dependência de pessoal qualificado. É preciso experiência prática dos operadores ou de treinamento intensivo de cães. Isso faz com que a disponibilidade desse método seja muito pequena em grandes setores de abastecimento. Métodos baseados em software são custosos, exigem técnicos especializados e possuem uma elevada taxa de falsos alarmes. O sensor acústico (um dos métodos baseados em equipamentos) é muito utilizado para a detecção de vazamentos. Geralmente, possui um alto percentual de sucesso em tubulações metálicas, entretanto a eficiência desse tipo de sensor em tubulações plásticas é limitada (ZHANG, 1996).

Para a realização do processo de modelagem de vazamentos em sistemas de distribuição de água é necessário, primeiramente, que haja o entendimento de todos os conceitos hidráulicos pertinentes. O entendimento desses conceitos é necessário para estimar parâmetros, levantar dados em campo e simplificar fatores com pouca relevância na modelagem.

2.1 Parâmetros físicos importantes

No passado, a visão convencional supunha que vazamentos eram relativamente insensíveis a pressão, como descrito pela equação dos orifícios (Equação 2.1).

$$q = AC_d(2gh)^{0.5} \quad (2.1)$$

onde q é a taxa de vazão, C_d é o coeficiente de descarga, A é a área do orifício, g é a aceleração da gravidade e h é a diferença de pressão sobre o orifício. No entanto, segundo Zyl e Clayton (2007), a pressão é um dos fatores que mais influencia nos vazamentos em sistemas de abastecimento.

Em um estudo, Greyvenstein e Zyl (2007) demonstraram que o expoente da Equação 2.1 apresentava valores diferentes de 0.5 dependendo do tipo de material e concluíram que podem ser consideravelmente maiores do que a constante. Para aplicar essa equação aos vazamentos em tubulações, ela pode ser escrita de forma mais geral como

$$q = ch^\alpha \quad (2.2)$$

onde c é definido como um coeficiente de vazamento e α um expoente de vazamento (α algumas vezes é referenciado como $N1$). Os limites encontrados para α de acordo com o tipo de material estão ilustradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores de expoentes encontrados em tubulações de diferentes materiais (GREYVENSTEIN; ZYL, 2007).

Material	Limites de α
Cimento amianto com fissura longitudinal	0,78 – 1,04
Ferro corroído	1,09 – 2,30
PVC rígido com fissura longitudinal	1,5 – 1,85
PVC rígido com orifício circular	0,41 – 0,53

A Figura 2.1 ilustra a importância do expoente de vazamento. O eixo das ordenadas representa as variações da razão entre as vazões, e o eixo das abscissas, a razão da pressão. A curva representa o encontro dos eixos para diferentes valores de α . Por exemplo, se a pressão em uma tubulação for reduzida para $H_1/H_0 = 0,3$, a taxa de vazamento será reduzida por 45%, 70% e 95% para expoentes de 0,5, 1,0 e 2,5 respectivamente.

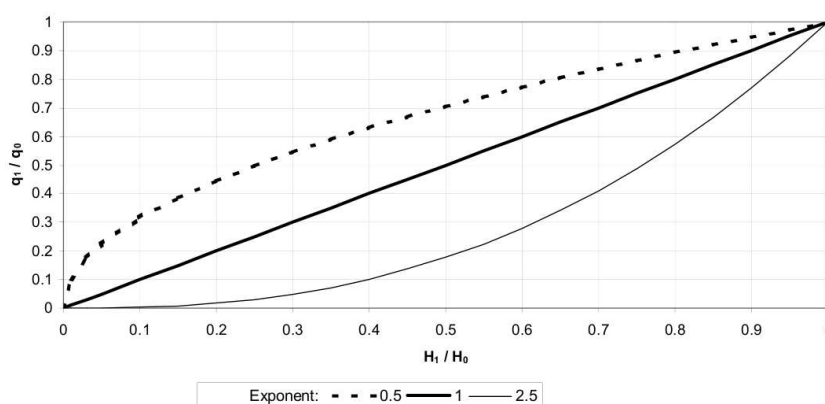


Figura 2.1 - Efeito do expoente de vazamento na taxa de vazamentos (GREYVENSTEIN; ZYL, 2007)

Amoodand e Abo-Ghobar (1994) avaliaram os valores do coeficiente c para tubulações

de diversos materiais em residências e fazendas. Para quantificar os coeficientes, as tubulações foram submetidas a pressões de 100 kPa, sob regime de escoamento turbulento. Os autores encontraram para o coeficiente, valores que variavam entre 0.093 e 7.594 de acordo com o material e o tipo de vazamento.

Tucciarelli et al. (1999) quantificam o valor das perdas através da modelagem reversa, reiterando a importância da pressão, dos coeficientes e expoentes de vazamento. Nesse estudo, Tucciarelli et al. (1999) propõem uma equação aprimorada do cálculo do vazamento através dos nós consistindo em

$$Q_i = (H_i - Z_i)^\alpha \sum_{j=1}^{M_i} \frac{\pi}{2} D_{ij} \theta_{ij} L_{ij} \quad (2.3)$$

onde L_{ij} é o comprimento do trecho; D_{ij} é o diâmetro do trecho; e θ_{ij} é a superfície de vazamento por unidade de superfície do trecho que une os nós i e j . Os valores de Q_i da Equação 2.3 podem ser calculados estimando-se os valores de P , α e θ_{ij} . Esses valores podem ser estimados medindo-se a carga total H^* e taxas de vazão F^* em um conjunto de nós n_h e trechos n_f . As medidas são usadas para a resolução do problema inverso

$$Min.FO_1 = \sum_{j=1}^{n_h} w_h \frac{(H_j - H_j^*)^2}{(\sum_{i=1}^{n_h} H_i^*)^2} + \sum_{j=1}^{n_f} w_f \frac{(F_j - F_j^*)^2}{(\sum_{i=1}^{n_f} F_i^*)^2} \quad (2.4)$$

onde F = vetor de taxas de vazões computadas; as pressões e vazões observadas devem ser inseridas, respectivamente, nos primeiros n_h nós e nos primeiros n_f trechos; e w_h e w_f = dois pesos, correspondente a quantidade de valores observados. As diferenças quadradas são divididas pelo quadrado da soma dos valores para cada conjunto de dados para que a função objetivo FO_1 seja independente de unidades (TUCCIARELLI et al., 1999). De acordo com esses pesquisadores, quando o expoente α possui valor mínimo de 0,5 corresponde a um valor constante de áreas de pequenos vazamentos em torno dos nós. Em um estudo semelhante, Araujo et al. (2006) criaram um modelo de sistema de suporte a decisão, realizando o controle automático de válvulas com o objetivo de minimizar a pressão e consequentemente os vazamentos.

Modelos convencionais de SDA como o Epanet são formulados assumindo que os consumos de água ou demandas definidos nos nós são valores conhecidos e portanto, a carga hidráulica e a vazão podem ser determinadas resolvendo um conjunto de equações quasi-lineares (ROSSMAN, 2000). Entretanto, existem alguns cenários em que a pressão nodal não é suficiente para fornecer a água requerida pelos nós. Nestes cenários, incluem-se situações como

manutenções no sistema, falha nas estações de bombeamento e água insuficiente na fonte de fornecimento. Para este tipo de cenário, foram propostos modelos, que diferentemente dos modelos convencionais, dirigidos pela demanda, são dirigidos pela pressão (WU et al., 2006). Apesar de os modelos de simulação dirigidos pela pressão apresentarem bons resultados em suas simulações, este trabalho focará o estudo em modelos convencionais, pois a situação em que os modelos SDP são utilizados são em casos específicos e de curta duração.

2.2 Modelagem Computacionais de SDA

Existem inúmeros modelos de sistemas de distribuição de água para a realização de simulações hidráulicas. Modelo de variáveis de estado são usados para resolver problemas de hidráulica de rede determinando pressão nodais desconhecidas e vazões nos trechos (tubulações). O modelo de variáveis de estado precisam satisfazer as equações do balanço de massa e energia seguintes (KAPELAN et al., 2005):

$$\sum_{m=1}^{N_i} Q_m - Q_{d,i} = 0 \quad (i = 1, \dots, N_n) \quad (2.5)$$

$$H_{i,u} - H_{i,d} - \Delta H_i = 0 \quad (i = 1, \dots, N_l) \quad (2.6)$$

onde Q_m são vazões desconhecidas em todos os trechos N_i conectados ao i -ésimo nó da rede; $Q_{d,i}$ é a demanda conhecida no i -ésimo nó; $H_{i,u}$ é a pressão desconhecida no nó a montante do i -ésimo trecho; $H_{i,d}$ é a pressão desconhecida no nó a jusante do i -ésimo trecho; ΔH_i é a diferença calculada entre a perda de carga total no i -ésimo trecho e a carga de bombeamento (em função da vazão do trecho Q_i ; N_l é o número de trechos na rede; N_n é o número de nós na rede. Os modelos de variáveis de estado são dirigidos pela demanda nos nós. Existem outros modelos existentes que são dirigidos pela pressão. Este último tipo de modelo é interessante quando um dos objetivos da modelagem é a simulação de vazamentos (GIUSTOLISI et al., 2008).

O Epanet (ROSSMAN, 2000) é um programa computacional que permite realizar simulações quali-quantitativas, estáticas e dinâmicas, de sistemas de distribuição de água. Para que isso ocorra, é necessário representar o sistema através de modelos, que agregam as informações físicas do sistema (topografia, comprimentos e diâmetros de tubulações, coeficientes de rugosidade, consumos nos nós, níveis dos reservatórios). Nas simulações estáticas, todas as

demandas são tratadas como constantes no tempo. Nas análises dinâmicas, consideram-se as variações horárias de demandas e nos níveis de reservatórios e nas condições operacionais e, com isso, é possível obter uma série de soluções. O método usado no Epanet para resolver as equações de continuidade e perdas de carga é conhecido como método Gradiente, proposto por Todini e Pilati (1988). O método consiste em resolver iterativamente uma série de matrizes jacobianas, determinando os valores das pressões e vazões desconhecidas.

Embora a formulação matemática do Epanet não considere explicitamente os vazamentos, é possível simulá-los através de um artifício de modelagem, denominados coeficientes emissores que são correspondentes aos aspersores nos sistemas de irrigação. Esse artifício de modelagem assume que em cada nó do sistema existe um consumo efetivo (calculado através do método da área de influência) mais uma vazão incremental, correspondente ao dispositivo emissor. Os emissores são modelados através de uma tubulação fictícia que liga o nó a um reservatório fictício. A carga hidráulica no reservatório fictício passa então a ser a energia disponível no nó. Assim, o nível piezométrico com vazamentos é inferior ao nível sem vazamentos. Internamente, os emissores são regidos pela lei dos orifícios.

O código fonte do simulador Epanet 2 é composto de duas partes desenvolvidas em linguagens de programação distintas: um *front-end* e o *back-end*. O *front-end* consiste na parte visual do Epanet. Foi criado no ambiente de desenvolvimento Delphi utilizando a linguagem Object-Oriented Pascal (OOP). É no *front-end* que o usuário irá modelar a rede, executar as simulações hidráulicas ou de qualidade e receber os resultados. A versão oficial do Epanet está disponível no site da EPA (Environmental Protection Agency) e é distribuída somente em inglês. Entretanto como o código fonte do programa é aberto, ele possui versões traduzidas para diversos idiomas, incluindo o português do Brasil.

O *back-end* chamado de Epanet Toolkit é um pacote de desenvolvimento que contém todas as funções para cálculos hidráulicos utilizados pelo *front-end*. Além de ser utilizado pelo *front-end*, o Epanet Toolkit pode ser utilizado independentemente por programadores para criarem seus próprios programas. O Epanet Toolkit foi desenvolvido em C e é distribuída livremente em forma de um arquivo DLL (Dynamic Link Library). O arquivo DLL pode ser incorporado em aplicações Windows escritos em C/C++, Delphi OOP, Visual Basic ou qualquer outra linguagem capaz de fazer chamadas a funções Windows DLL. Tanto o código do *front-end* quanto do *back-end* são bem documentados. O *front-end* possui um guia do usuário bastante completo. O *back-end* possui um arquivo de ajuda com as funções do toolkit, exemplos de utilização e muitos comentários dentro do código fonte. As funções implementadas no epanet toolkit estão

agrupadas de acordo com o objetivo das mesmas. Funções que manipulam dados de entrada estão descritas nos arquivos input1.c, input2.c e input3.c. As funções de gravação do arquivo estão implementadas no arquivos output.c. As funções hidráulicas e de qualidade estão nos arquivos hydrau.c e quality.c respectivamente.

A estrutura de dados que representa os modelos de rede no Epanet são dígrafos (grafos direcionados). Grafos são representações gráficas das relações existentes entre elementos de dados (Figura 2.2). Ele pode ser descrito num espaço euclidiano de n dimensões como sendo um conjunto V de nós e um conjunto A de ligações contínuas (tubulações).

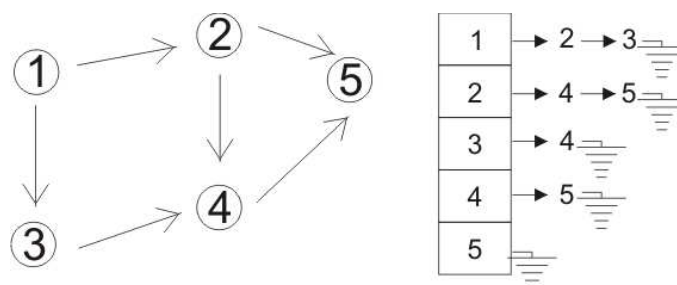


Figura 2.2 - Representação do dígrafo utilizado no Epanet

Cada nó do grafo possui um identificador (ID). Esse identificador armazena em uma tabela, as informações referentes àquele nó. Matematicamente, dois nós adjacentes indicam que as junções são conectadas por uma tubulação. Esta tubulação também possui um identificador e propriedades associadas. A direção do grafo representa o sentido adotado para o cálculo numérico no qual a água irá percorrer entre duas junções.

Os novos conceitos introduzidos no Epanet foram acrescentados à estrutura existente. A estrutura de adjacências A de $G(V,E)$ é um conjunto de n listas $A(v)$, uma para cada nó v pertencente a V . Cada lista $A(v)$ é uma lista de adjacências do nó v e contém os nós w adjacentes a v em G , ou seja $A(v) = w / (v, w) \in E$. Essa estrutura é gravada em um arquivo texto. Para posterior localização dos objetos (nós, junções, tanques etc) no arquivo, padronizou-se a utilização de cabeçalhos e o arquivo é gravado em um arquivo texto com extensão .inp.

O Epanet não possui uma ferramenta de calibração. Entretanto, através do Epanet Toolkit é possível realizar via linha de código, a modificação de diversos parâmetros de entrada dos modelos criados, bem como a possibilidade de efetuar simulações e adquirir os dados também via linha de código e com isso, é possível calibrar os modelos.

Capítulo 3

Calibração para estimar parâmetros de vazamentos

Liggett e Chen (1994) propuseram uma técnica para calibração de sistemas de abastecimento que utiliza uma técnica de cálculo inverso. Este cálculo foi utilizado para calibrar vazamentos ou uso não autorizados. Segundo os autores, a chave para o cálculo eficiente é a solução adjunta do sistema para encontrar dados gradientes e uma matriz jacobiana. Estes dados são usados para encontrar uma matriz Hessiana, que é utilizada no método de Levenberg-Marquardt para o ajuste de parâmetros. Posteriormente, Vitkovsky et al. (2007) melhoraram o método proposto, adicionando a componente do vazamento no método e o uso de transientes. O resultado do transiente do fluido ao passar pelas tubulações gera informações substanciais como a propagação de ondas de pressão, essas informações foram utilizadas para o cálculo dos vazamentos em laboratório. Segundo Vitkovsky et al. (2007), a eficiência dos algoritmos genéticos é superior a implementação proposta anteriormente, devido ao fato de possuírem um espaço de busca muito grande, além disso podem falhar ao convergir ou podem convergir para um mínimo local ao invés do mínimo global pois dependem de um ponto de partida inicial.

Em seguida, Vitkovsky et al. (2000) propuseram uma modificação no método do transiente inverso, inserindo um novo operador no algoritmo genético de otimização, que consistia em adicionar um número aleatório com ordem de magnitude três vezes maior que o coeficiente de vazamento. Segundo os autores, a modificação permitiu a busca mais eficiente em um espaço logaritmico e evitou coeficientes de vazamentos negativos.

Estudos de simulações dirigidos pela pressão para estimação de demandas foram realizados no passado, sem a inclusão de vazamentos. Recentemente, Giustolisi et al. (2008) propuseram uma melhoria no método para a inclusão de vazamentos. Segundo os autores, um erro comum na modelagem tradicional é a modelagem dos vazamentos sem levar em consideração da pressão. No estudo proposto, foram realizadas 1000 simulações e os dados estatísticos mostraram que os resultados são um pouco melhores do que os obtidos através da simulação dirigida pela demanda.

Wu et al. (2006) realizaram o processo de calibração para estimar vazamentos. O trabalho consistiu em minimizar a diferença entre os valores de pressão e vazão simulados pelo modelo e observados em campo, através do ajuste dos fatores do padrão de consumo. A técnica de otimização utilizada pelos autores foi a de algoritmos genéticos.

O procedimento geral para calibração de um modelo de rede, descrito por Soares et al. (2004), pode ser dividido em cinco etapas:

1. Simplificar a rede desconsiderando diâmetros menores que 150 mm salvo algumas exceções (ponta de rede, proximidades de reservatórios, mudança de diâmetro, dentre outros), porém neste trabalho, foram considerados diâmetro de tubulações de até 50 mm;
2. Dividir a rede em setores de rugosidade e/ou vazamentos, de forma que as estimativas para cada setor de rede correspondam a um fator de ajuste global;
3. Obter dados cadastrais (consulta de informações) referentes às características geométricas das tubulações (diâmetros, rugosidades, comprimento e material) e características dos componentes (válvulas e bombas), elevações topográficas, consumos nos nós, dentre outros;
4. Instalar medidores de pressão e vazão (medidas preliminares de campo) na rede de forma a armazenar dados contínuos e obter dados (medidas preliminares de campo) dos reservatórios (níveis e vazão injetada no sistema) durante 24 horas através de telemetria ou medições em campo;
5. Simular a rede (análises através de computador) utilizando os dados de projeto para obter valores das variáveis de estado (pressão e vazão) e compará-las (modelo de calibração) com os dados reais obtidos em campo. Se o ajuste é aceitável, a calibração é finalizada, caso contrário, volta-se à etapa de simulação ajustando novos valores (por algum processo) e assim por diante, até que a convergência seja satisfeita.

3.1 Criação de zonas homogêneas

Para que o modelo matemático seja representativo, é necessário que os valores simulados pelo modelo apresentem valores próximos ao real. Sistemas de distribuição de água usualmente apresentam grandes quantidades de tubulações com coeficientes de rugosidade desconhecidos. Esta grande quantidade de tubulações torna inviável a determinação dos coeficientes de rugosidade para todos os trechos. Portanto, o modelo deve ser simplificado, de modo a assumir que conjuntos de tubulações possuam a mesma rugosidade. Essa etapa é conhecido na literatura como parametrização e é importante tanto para estimar valores para trechos desconhecidos, quanto para reduzir a quantidade de cálculos computacionais. Mallick et al. (2002) listam como critérios para a seleção dos trechos em grupos (1) idade e material da tubulação, (2) diâmetro da tubulação, (3) localização relativa, e (4) identificação de trechos críticos em termos de zonas de pressão. A escolha do melhor critério é feito de forma empírica e através da experiência do modelador. Para medir o erro, Mallick et al. (2002) propõem uma formulação de cálculo da medida de incerteza em previsões do modelo (Equação 3.1).

$$Cov(H^A) = \left[\frac{\partial H^A}{\partial C} \right]^T Cov(C) \left[\frac{\partial H^A}{\partial C} \right] \quad (3.1)$$

onde $Cov(C)$ é a matriz de covariância do modelo previsto com carga H^A para uma condição de demanda e C é o coeficiente de rugosidade.

Capítulo 4

Metodologia

A metodologia consistiu na implementação de técnicas de calibração revistos da literatura, baseado na otimização por algoritmos genéticos, com algumas modificações de modo a permitir a melhor localização e quantificação dos vazamentos em tempo real.

No trabalho, utilizou-se séries de dados históricas fornecidas pela companhia de saneamento e obtidas através de campanhas de campo, simulando a chegada dos dados de forma instantânea.

Os detalhes da metodologia adotada são descritos nos tópicos seguintes.

4.1 Desenvolvimento do Calibrador

O desenvolvimento do calibrador consistiu na criação de uma aplicação que estimasse valores para os parâmetros físicos inerentes aos vazamentos e ao modelo hidráulico criados no Epanet. O calibrador desenvolvido foi parte do trabalho de pesquisa que faz parte da rede Prosab, denominado G-Perdas - Ferramentas computacionais para auxiliar o gerenciamento de perdas em sistemas urbanos de abastecimento de água, financiado pela FINEP/CNPq. A aplicação minimiza a diferença entre os valores de pressão e vazão observados em campo com os valores simulados através da técnica de algoritmos genéticos. A minimização é realizada encontrando os valores ótimos dos parâmetros (rugosidades, coeficientes e expoente de vazamento).

O fluxograma (Figura 4.1) representa as etapas de funcionamento do software desenvolvido. Para um melhor entendimento, o processo de execução do fluxograma foi dividido na

linha de execução seqüencial e em mais duas sub-rotinas.

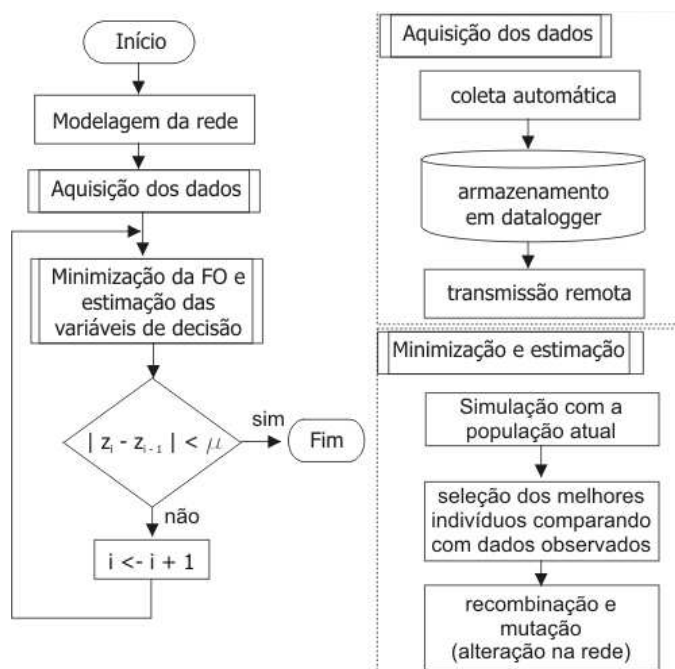


Figura 4.1 - Fluxograma de execução do calibrador

O processo inicia-se com a modelagem da rede do setor de abastecimento. Em seguida, é preciso adquirir os dados medidos em campo (variáveis de estado) que serão utilizados para calibrar o modelo. A próxima etapa é um processo iterativo. Esse processo possui duas condições de parada. A primeira, quando a minimização da função objetivo estiver dentro do *threshold* mínimo definido, significando que a calibração convergiu para um nível satisfatório e a segunda, quando ela atingir o número máximo de gerações pré-definidas. O processo é interrompido quando a primeira das duas condições for atingida.

A primeira sub-rotina "Aquisição de dados" foi realizada através de campanhas de campo e com o uso de equipamentos de medição do Laboratório Resan. Sensores de pressão estão instalados em um setor piloto e estão medindo os dados continuamente. Esses dados são armazenados em um datalogger e enviados através da rede GPRS/GSM para um servidor remoto. Os dados devem ser tratados e transformados em dados de entrada para o modelo.

A segunda sub-rotina "Minimização e estimação" resume uma técnica de algoritmo genético. A sub-rotina inicialmente altera o arquivo do sistema de abastecimento de água, criando n variações do modelo (n é o tamanho da população inicial) definindo valores aleatórios dentro de intervalos válidos para cada variável de decisão. As variáveis de decisão utilizadas no projeto são rugosidades da tubulação, coeficientes emissores e expoentes emissores. A sub-rotina

executa as simulações de cada modelo pelo período de 24 horas. Os modelos em que as simulações dos valores de estado forem mais próximos dos medidos em campo serão guardadas para a próxima geração e o processo irá se repetir até que a condição de parada seja satisfeita. O software foi desenvolvido na linguagem C++ e utilizou-se a biblioteca de algoritmo genético GALib desenvolvido por Wall (1996).

A avaliação dos melhores candidatos é feita através da função objetivo (Equação 2.4). As variáveis de decisão referentes a vazão (coeficientes emissores e expoentes) foram restritos a intervalos entre zero, significando ausência de vazamentos, e aos valores máximos encontrados na literatura (AMOODAND; ABO-GHOBAR, 1994; GREYVENSTEIN; ZYL, 2007).

Além da aplicação de otimização, foi necessária também a modificação do *front-end* e do *back-end* do Epanet. A alteração no *front-end* foi para permitir que o usuário inserisse os dados observados em campo e definisse os grupos de calibração. A modificação no *back-end* foi para que seja possível a estimação dos expoentes de vazamentos α de forma local. Essa etapa foi necessária pois o Epanet original assume um valor único para o expoente em todo o modelo. A Figura 4.2 representa o modo de funcionamento do Epanet original.

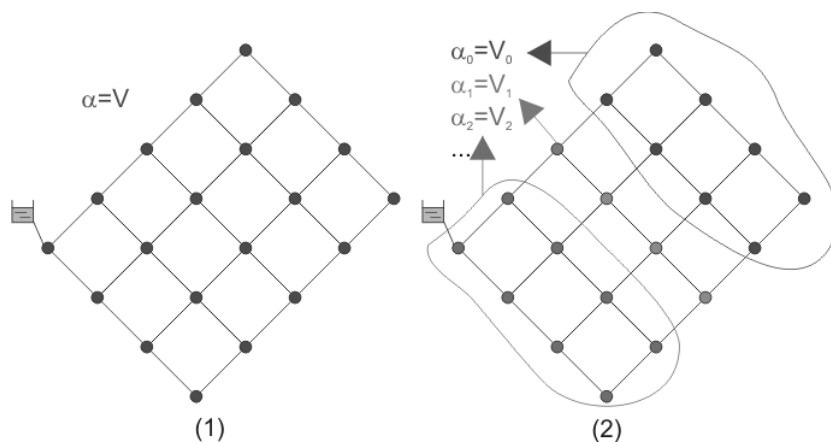


Figura 4.2 - Individualização do expoente α

Para que o modelo matemático represente mais fielmente um sistema de abastecimento real, é necessário que esse expoente seja estimado e inserido individualmente. A modificação no *back-end* permitiu que o software de calibração desenvolvido alterasse os valores dos expoentes através da especificação de setores ou atribuindo valores nó a nó. Essas modificações, representadas na Figura 4.3, consistiram no desenvolvimento de cinco atividades: (i) adição de uma nova propriedade para o nó (o expoente emissor); (ii) criação de um método para atribuição do valor do expoente em cada nó; (iii) criação do método para consulta do valor do expoente; (iv)

alterações na escrita do arquivo de rede; (v) revisão e teste de todas as equações que envolviam cálculos hidráulicos.

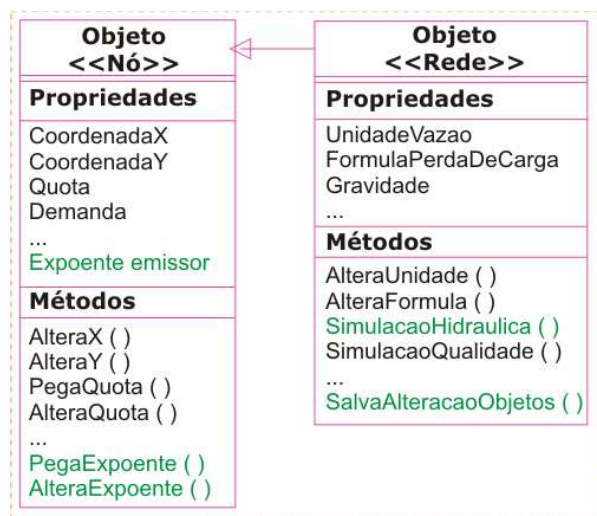


Figura 4.3 - Diagrama das modificações no back-end

As perdas em tempo real são quantificadas via software. O software lê as informações de vazão e pressão armazenadas em um banco de dados. A origem dos dados é transparente e independente para o software de calibração. Os dados podem chegar em intervalos de tempo regulares. A média dos valores é calculada e a informação é tratada para o formato de entrada utilizado no Epanet Calibrator. Neste estudo, foram utilizadas séries de dados históricas, simulando o recebimento das informações em tempo real.

O programa é previamente configurado de modo que se identifique quais são os dados de entrada (vazão ou pressão) e o número do índice do objeto correspondente na rede do Epanet. O software possui a opção de auto-ajustar os coeficientes do padrão de demanda, em tempo real, a medida que a vazão for recebida no banco de dados. Deve-se definir se a calibração deve ser efetuada a partir do último dia completo (0 às 23:59) ou as últimas 24h partindo do momento de utilização (Figura 4.4).

4.2 Estimação das Perdas

Após a finalização da calibração das redes modeladas, é possível realizar simulações para quantificar as perdas estimadas em cada nó dos sistemas em estudo (Equação 4.1).

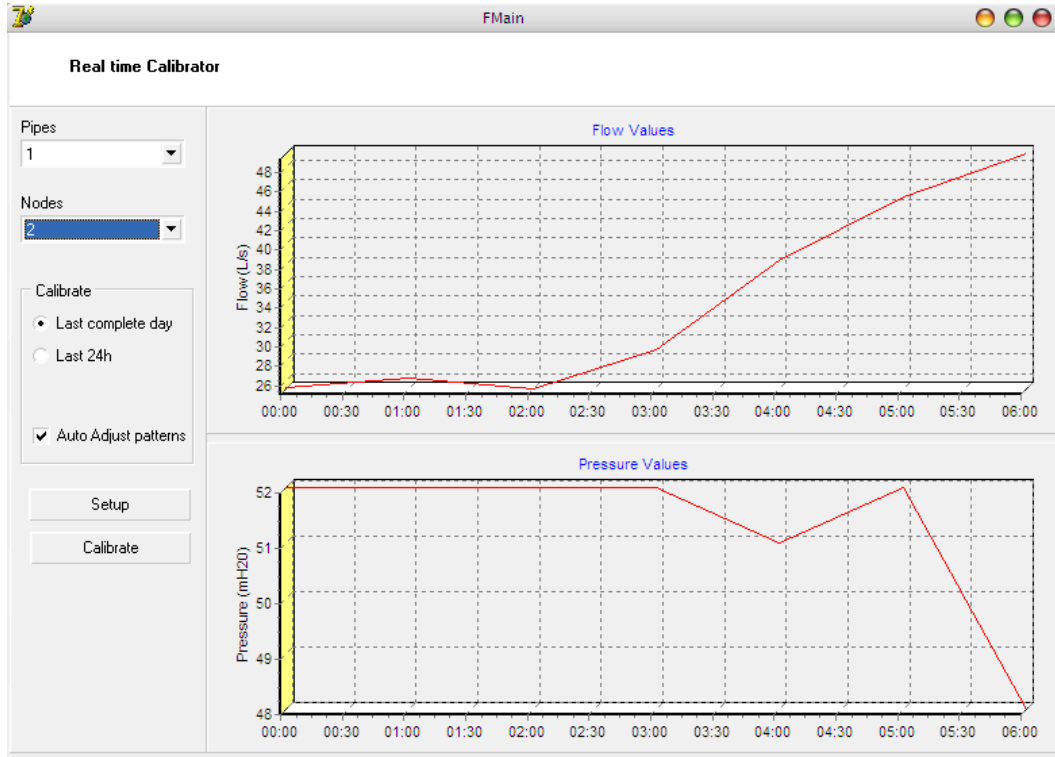


Figura 4.4 - Screenshot da calibração em tempo real

$$q_i = \sum_{j=1}^{24} (Q_{i,j} - B_i D_{i,j}) \quad (4.1)$$

onde q_i é a quantidade total de vazamentos do i -ésimo nó, n é a quantidade de nós da rede, $Q_{i,j}$ é a demanda atual do nó i , no j -ésimo período simulado, B_i é a demanda base referente ao nó i , e $D_{i,j}$, o padrão de demanda referente ao nó i .

Com a quantificação das perdas totais por nó, é possível calcular o percentual de vazamento total no sistema, dividindo-se a somatória dos vazamentos, pelo total de água demandada (Equação 4.2).

$$r = 100 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{24} \left(\frac{Q_{i,j} - B_i D_{i,j}}{Q_{i,j}} \right) \quad (4.2)$$

Apesar de quantificado o vazamento nos nós, para a localização mais precisa dos vazamentos, é interessante que se determine o vazamento em cada trecho da rede de distribuição. O Epanet não oferece um mecanismo pronto para essa quantificação, entretanto, uma vez que os vazamentos sejam estimados nos nós, eles podem ser distribuídos nos trechos.

Sabe-se que em dinâmica dos fluidos, a equação da continuidade é análoga a 1ª lei de

Kirchhoff em circuitos elétricos. Assim, a equação da continuidade é uma afirmação que, em qualquer processo, a taxa em que a massa entra no sistema é igual a taxa em que a massa deixa o sistema (Equação 4.3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (4.3)$$

onde ρ é a densidade do fluido, e u é a velocidade do fluido. Como a água é um líquido incompressível, a densidade é constante e equação pode ser simplificada para uma equação de volume:

$$\nabla u = 0 \quad (4.4)$$

Assim, é possível equacionar um balanço de massa, de modo que as quantidades de vazão serão iguais nos nós e nos trechos, conforme Equação 4.5. Onde M é a quantidade total de nós na rede, N é a quantidade total de trechos na rede, n e p são vetores que representam os valores de vazão dos vazamentos nos nós e trechos respectivamente.

$$\sum_{i=1}^M n_i - \sum_{j=1}^N p_j = 0 \quad (4.5)$$

Desse modo, baseado na Equação 4.5 é possível quantificar em cada trecho, qual o valor do vazamento esperado. Por exemplo, a Figura 4.5 representa uma pequena rede ou seção de rede. A rede possui 5 nós , interligadas por 4 trechos.

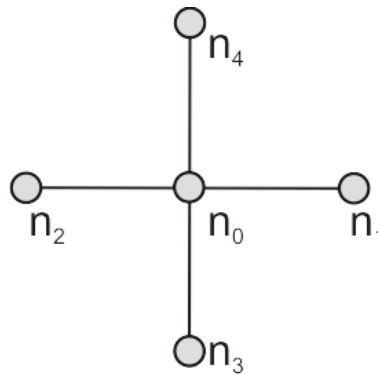


Figura 4.5 - Rede exemplo

O cálculo do vazamento entre o trecho entre n_0 e n_4 ($p_{0,4}$) não pode ser descrito pela soma dos valores entre os nós que compõem o trecho, pois o nó n_0 possui, além do nó n_4 ,

3 nós adjacentes (n_2 , n_1 e n_3). Assim, o cálculo do valor de n_0 deve levar em consideração a proporcionalidade dos nós adjacentes. Desse modo, o vazamento no trecho $p_{0,4}$ pode ser descrito por (Equação 4.6):

$$p_{0,4} = \frac{n_0 + n_4}{(n_0 + n_4) + (n_0 + n_2) + (n_0 + n_3) + (n_0 + n_1)} n_0 \quad (4.6)$$

Baseado na semelhança entre dinâmica dos fluídos e eletricidade, o teorema da superposição pode ser aplicado por analogia, assim em qualquer ramo de um circuito bilateral linear é igual a soma algébrica das vazões produzidas por cada fonte atuando separadamente na rede. A Equação pode ser generalizada na forma:

$$\sum_{i=1}^{n-1} p_{c,i} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{n_c + n_i}{(n-1)n_c + \sum n_i} n_c \quad (4.7)$$

Assim, o teorema pode ser utilizado em análise de circuitos para converter um circuito original em um Equivalente de Thevenin aplicado para redes lineares, útil para reduzir circuitos maiores em um circuito equivalente com apenas dois elementos a partir de um determinado ponto, onde se deseja, por exemplo, conhecer alguma grandeza física como tensão, corrente ou potência (vazão de vazamentos para este estudo). Assim, é possível calcular distribuidamente, para cada trecho pertencente ao nó pivot n_c . O cálculo deve ser realizado de modo iterativo, de modo que cada nó deve ser percorrido e o valor proporcional de cada nó deve ser atualizado, adicionando-se o valor do vazamento a somatória do trecho já calculado. O nó base será eleito n_c e os nós cujos trechos sejam ligados a n_c serão os nós vizinhos. O cálculo pode ser melhor visualizado pelo algoritmo seguinte:

```
para i:=1 até total de nós
  selecionar nós vizinhos de nó[i]
  n <- quantidade de vizinhos
  para j:=1 até n
    trecho[i,j] += (n[i]+n[j])/(n*n[i]+vazamento_total)*n[i]
```

4.3 Incertezas na modelagem

Embora o objetivo do presente trabalho não seja o de avaliar as incertezas de modelos hidráulicos, é necessário que se comente sobre as mesmas, pois elas estão presentes na metodologia e refletem diretamente no resultado da pesquisa.

Além dos erros presentes na medição de pressão e vazão e das simplificações realizadas para a modelagem, existem inúmeras incertezas inerentes a sistemas de abastecimento de água. As tubulações dos setores possuem rugosidades diversas que sofrem alterações ao longo do tempo. Para simplificação da calibração, cria-se grupos de trechos com mesma rugosidade. Entretanto, é preciso conhecer previamente o sistema para afirmar que os trechos podem pertencer ao mesmo grupo. A mesma afirmação pode ser feita a respeito dos vazamentos. Os grupos com vazamentos semelhantes devem ser conhecidos antes do processo de calibração. Não é necessário conhecer a gravidade dos vazamentos, no entanto, é necessário que se insira as regiões prováveis, classificadas por quantidade, assim como em pesquisas estatísticas deve-se conhecer as amostras que representem bem uma população.

Para a modelagem dos setores, estimou-se os valores das demandas nos nós utilizando valores médios para o número de habitantes por residência e o volume diário consumido. Este processo não leva em consideração os fatores sazonais que influenciam no consumo de água, ou o crescimento populacional, ou a variação de preço, que é o principal fator de mudança no consumo da água. Uma outra forma de estimar os consumos utilizado no trabalho, foi através do uso de dados micromedidos, que estão sujeitos a erros de leitura para vazões muito baixas.

Além disso, o consumo não é constante ao longo do dia. Para um modelo mais realístico, utiliza-se padrões de demanda, que são fatores adimensionais que são multiplicados ao consumo médio para a obtenção do valor instantâneo durante uma hora específica. Este valor é calculado através da equação

$$f(t) = \frac{Q(t)}{\sum_{i=1}^t Q(t)} \quad (4.8)$$

onde, $f(t)$ é o valor do fator no instante t e $Q(t)$ é a vazão no instante t . Entretanto, sabe-se que o valor na vazão durante a madrugada, deve-se a um consumo de água desprezível e principalmente devido aos vazamentos. Assim, o fator de demanda calculado através da vazão acrescenta um erro na simulação, pois como a área sob a curva do padrão de demanda deve ser igual a 1, o aumento no fator da madrugada faz com que a curva real se achate.

4.4 Estudos de caso

A metodologia foi aplicada em 3 setores de abastecimento em Campo Grande – MS. As cotas topográficas dos setores foram levantadas com a utilização dos softwares Geomorena e Google Earth. Para a modelagem inicial, foram levantadas as plantas hidráulicas de cada setor, e mediu-se os valores de pressão e vazão ao longo do dia para a realização da calibração. As vazões medidas foram utilizadas para os cálculos dos padrões de consumo dos setores. As demandas das economias foram estimadas e atribuídas ao nó mais próximo. Os detalhes de cada setor são descritas nas subseções seguintes.

4.4.1 Caso 1 - Centro

O primeiro setor possui 36 km de rede, distribuídos em 366 trechos e vazão média de $3304\text{m}^3/\text{dia}$, localiza-se no centro da cidade (Figura 4.6).

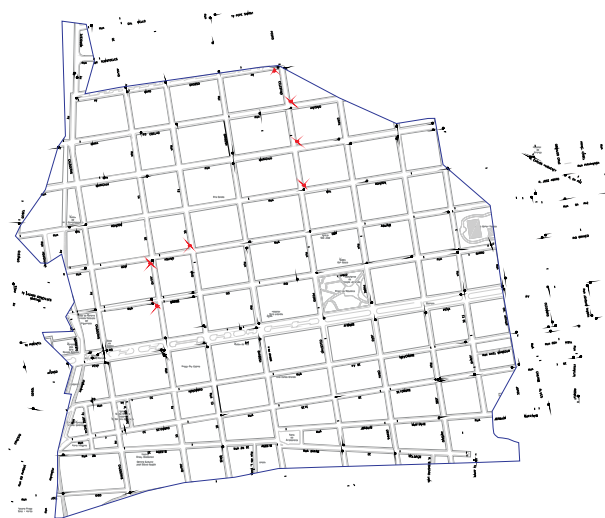


Figura 4.6 - Mapa do centro de Campo Grande

As tubulações do setor são compostas de ferro fundido, cimento amianto e PVC. Para a calibração, utilizou-se a vazão na saída do reservatório e 3 pontos de pressão fornecidos pela companhia de saneamento. O setor foi dividido em 4 grupos, divididos pelo tipo de material (Figura 4.7).

A partir dos dados de vazão obtidos, calculou-se o padrão de demanda do setor. A Tabela 4.4.1 lista os coeficientes obtidos para cada hora do dia, durante o período de 24 horas.

A Figura 4.8 ilustra o padrão adotado. Verifica-se visualmente que o comportamento

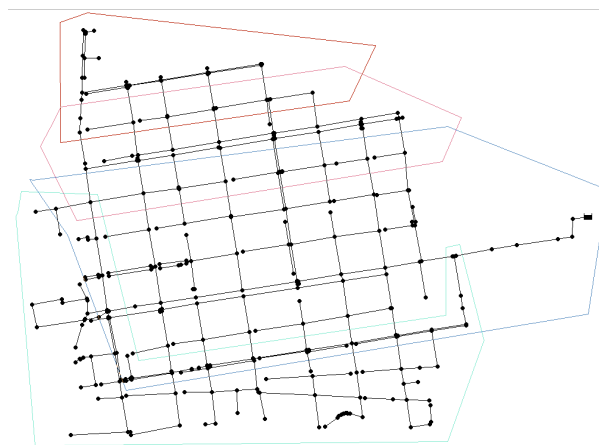


Figura 4.7 - Divisão do centro em grupos

Tabela 4.1 - Coeficientes do padrão de demanda ao longo de 24h (Centro)

Padrão de demanda					
0.70	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
0.70	1.10	1.30	1.20	1.10	1.20
1.20	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50
1.50	1.30	1.00	0.80	0.70	0.70

no consumo de água na região central é distinto dos bairros. Existem 3 picos de consumo, refletindo a rotina de trabalho durante o horário comercial. Os picos ocorrem no horário de chegada ao trabalho pela manhã, no intervalo do almoço e no fim do expediente.

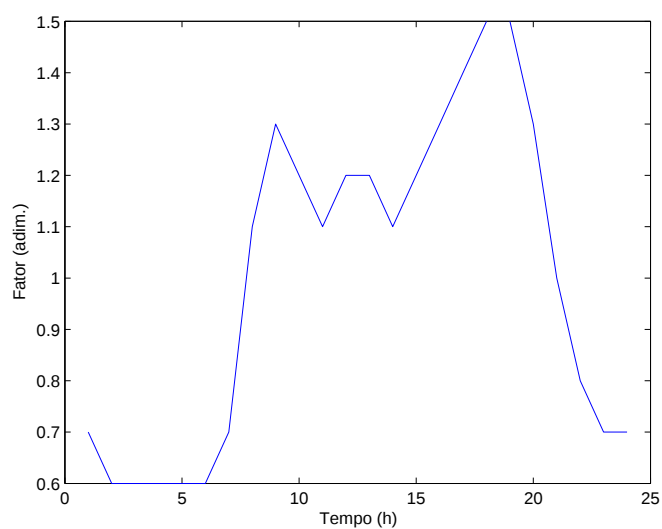


Figura 4.8 - Gráfico do padrão de demanda (Centro)

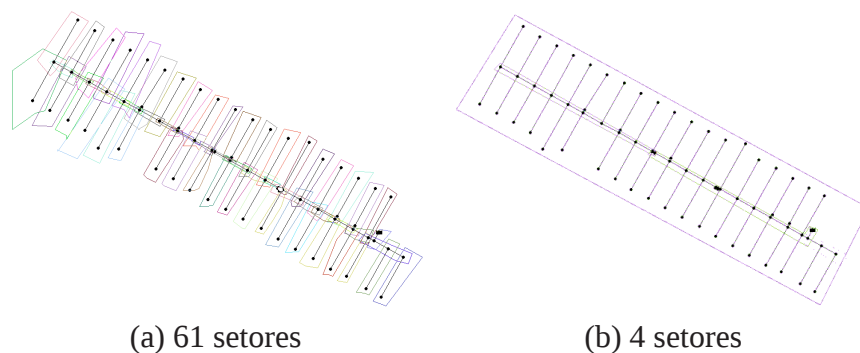


Figura 4.10 - Divisão do setor Coophatrabalho

O padrão de demanda para o setor foi calculado baseado nos dados de vazão obtidos. Como a simulação é apenas de 24 horas, o cálculo foi realizado utilizando a média dos dias úteis da semana, pois os dados do fim de semana mostravam valores atípicos. A Tabela 4.4.2 mostra os valores do padrão de demanda calculados para o setor.

Tabela 4.2 - Coeficientes do padrão de demanda ao longo de 24h (Coophatrabalho)

Padrão de demanda					
0.30335	0.30517	0.30274	0.28451	0.29241	0.60305
1.01036	1.30277	1.67238	1.68819	1.60551	1.45961
1.27298	1.20793	1.14897	1.25170	1.26569	1.87056
1.57572	1.37450	0.79090	0.61764	0.45715	0.33618

O padrão de consumo do setor Coophatrabalho é um padrão típico de um bairro predominantemente residencial, classificados como classe média e classe média baixa (Figura 4.11). Existe um pico no consumo de água no fim da manhã, demonstrando que os moradores trabalham em regiões próximas ou possuem veículos e podem almoçar em casa.

4.4.3 Caso 3 - Bairro Nova Lima

O terceiro setor estudado é um grande bairro com 59 km de comprimento de rede (597 trechos) e $3700m^3$ de vazão diária (Figura 4.12). Os dados de calibração foram fornecidos pela companhia de saneamento.

O setor possui tubulações com diâmetros de 50, 75, 150 e 200mm e foi dividido em 13 grupos. Os grupos foram divididos de acordo com o diâmetro das tubulações. A Figura 4.13 mostra os grupos de tubulações criados para o setor Nova Lima. Foram utilizados 2 pontos de pressão e 1 de vazão para a realização da calibração. A vazão foi medida na saída do reservatório

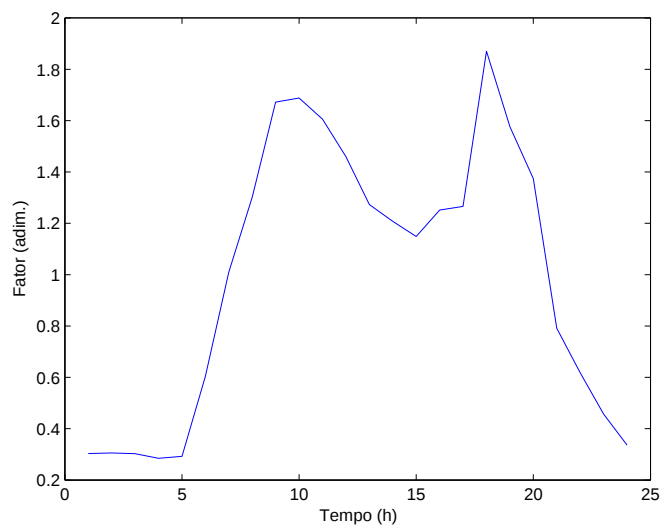


Figura 4.11 - Gráfico do padrão de demanda (Coophatrabalho)



Figura 4.12 - Mapa do Setor de fornecimento Nova Lima

e os pontos de monitoramento de pressão foram determinados pela companhia de saneamento.

O padrão de demanda do setor Nova Lima foi calculado do mesmo modo que nos setores anteriores. Os padrões calculados estão listados na Tabela 4.4.3.

Devido ao grande tamanho do Bairro Nova Lima, o gráfico do padrão de consumo deste setor apresenta características mistas de um setor comercial e residencial.

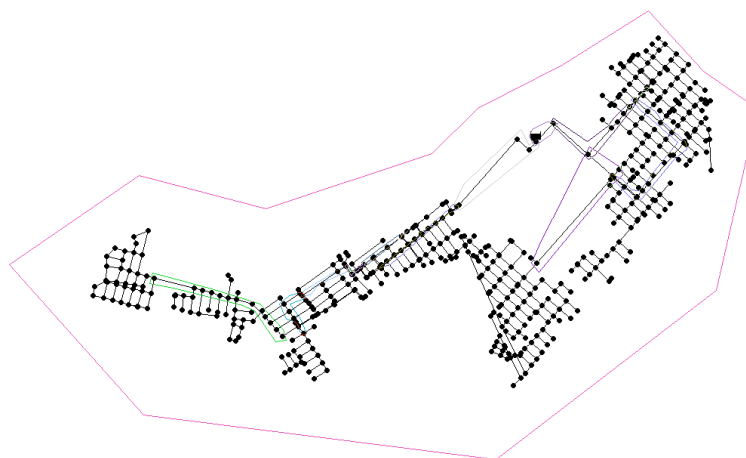


Figura 4.13 - Grupos criados para o setor Nova Lima

Tabela 4.3 - Coeficientes do padrão de demanda ao longo de 24h (Nova Lima)

Padrão de demanda					
0.65	0.61	0.61	0.60	0.54	0.68
0.90	1.05	1.15	1.23	1.22	1.59
1.18	1.10	1.12	1.06	1.11	1.64
1.68	1.21	1.00	0.91	0.82	0.76

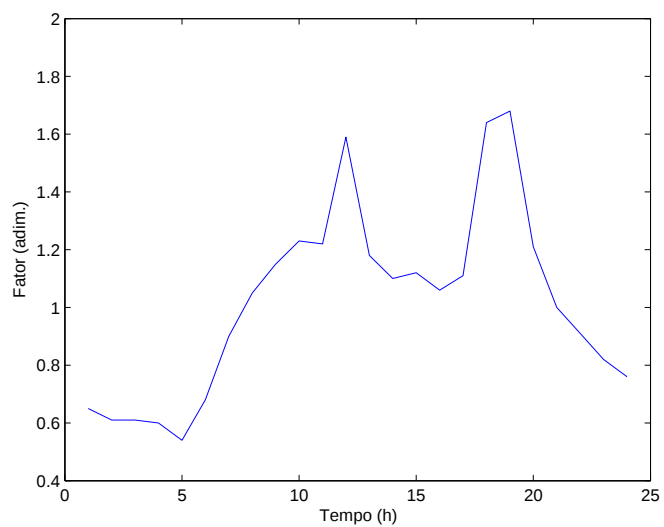


Figura 4.14 - Gráfico do padrão de demanda (Nova Lima)

Capítulo 5

Resultados

Os valores de pressão e vazão observados em campo e as tabelas com os resultados das pressões e vazões simuladas para cada setor após as calibrações durante o período de 24h, estão no Apêndice A. A primeira coluna “Observado” de cada tabela, refere-se aos dados coletados em campo e a segunda coluna “Simulado” é o resultado da simulação da rede modelada sem a calibração. As colunas “Global” e “Local” referem-se ao tipo de calibração adotada. No primeiro caso, utilizou-se o mesmo expoente para todos os nós, e no segundo caso, utilizou-se expoentes locais.

A Tabela 5.1 mostra o resumo da análise das calibrações realizadas. Observa-se que todas as calibrações tiveram valores de R muito próximos. Os melhores valores foram encontrados para as calibrações utilizando os expoentes locais. O Centro apresentou o maior erro, devido a grande quantidade de incertezas e do maior volume de água fornecido.

Tabela 5.1 - Covariância e coeficiente de Pearson dos dados obtidos

Rede	Média diária (L/s)	calibração global		calibração local	
		covariância	correlação (R)	covariância	correlação (R)
Centro	112.24	136.46	0.86	150.32	0.86
Coophatrabalho 4	11.43	8.11	0.90	7.55	0.90
Coophatrabalho 61	11.43	7.95	0.89	8.26	0.90
Nova Lima	42.82	13.33	0.88	37.08	0.89

Os resultados de cada estudo de caso são apresentados e discutidos nas seções seguintes.

5.1 Centro

Para o primeiro setor (centro), observou-se que o erro obtido com a vazão calibrada globalmente foi menor do que a calibrada com expoentes locais. Isso pode ocorrer quando a soma dos erros totais é compensada em outros pontos da rede, como é possível observar na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Erros obtidos na calibração (Centro)

	Erro %	
	Global	Local
Trecho 563	18.06	22.68
Nó 304	5.73	6.47
Nó 632	27.96	11.99
Nó 630	64.87	19.82

A calibração do primeiro ponto de pressão (Tabela 6.5) apresentou valores semelhantes para as calibrações realizadas com expoentes locais e globais. Nos outros pontos do setor (Tabelas 6.6-6.7) referentes aos nós 632 e 630 respectivamente, foram os pontos em que foi possível verificar as maiores variações entre a calibração global e local. É possível verificar nos dados observados (Tabela 6.6) que existe a maior queda da pressão das 11-14h, ocasionado pelo maior consumo de água durante o intervalo da refeição na região central. A vazão obtida pela rede calibrada com expoentes locais apresentou o melhor resultado. Resultado semelhante ocorreu no último ponto da rede, como pode ser visto na Tabela 6.7.

A Tabela 5.3 mostra as taxas de vazamentos encontradas para as duas simulações da primeira rede. É possível observar que tanto na calibração global, quanto local, os valores estimados para os vazamentos apresentam valores próximos.

Tabela 5.3 - Taxa estimada de vazamentos (Centro)

	Calibração global	Calibração local
Vazão média (L/s)	110.89	119.85
Demanda estimada (L/s)	73.35	80.98
Taxa de vazamentos	66.15%	67.56%

A Tabela 5.1 lista os parâmetros obtidos após a calibração do setor. O coeficiente de Hazen-Willians foi de 150 para o grupo 1, tanto na calibração global, quanto local. Entretanto, o coeficiente de vazamento encontrado na primeira calibração foi de 5 (valor máximo permitido para a variável) no grupo 1, enquanto os coeficientes de vazamentos encontrados na calibração local foram inseridos no grupo 4. Este comportamento demonstra que o resultado do

vazamento pode, em parte, ser atribuído erroneamente à perda de energia, fazendo com que a função objetivo seja atingida em um mínimo satisfatório mas que não corresponda a realidade.

Tabela 5.4 - Parâmetros obtidos na calibração (Centro)

Grupo	Global		Local		
	Coef.	Rugosidade	Coef.	Expoente	Rugosidade
1	5	150	0	-	150
2	0	85	0	-	147
3	0	85	0	-	85
4	0	150	0.0764	0.6084	85

Com a calibração concluída, quantificou-se as vazões totais e os vazamentos durante 24h, em intervalos de uma hora. Os resultados das simulações estão descritas na Tabela 5.1. Apesar das regiões com maiores incidências de vazamentos terem sido localizadas em regiões distintas nas duas calibrações, observa-se que as vazões e vazamentos totais na rede mostram valores muito semelhantes, reforçando a afirmação de que a otimização pode não ter sido efetivada plenamente.

A Figura 5.1 ilustra os vazamentos obtidos através da calibração global e a Figura 5.2 ilustra os vazamentos obtidos através da calibração local. Através dos gráficos, verifica-se que os vazamentos seguem tendências contrárias em relação as vazões, demonstrando a relação existente entre vazamentos e pressões na rede.

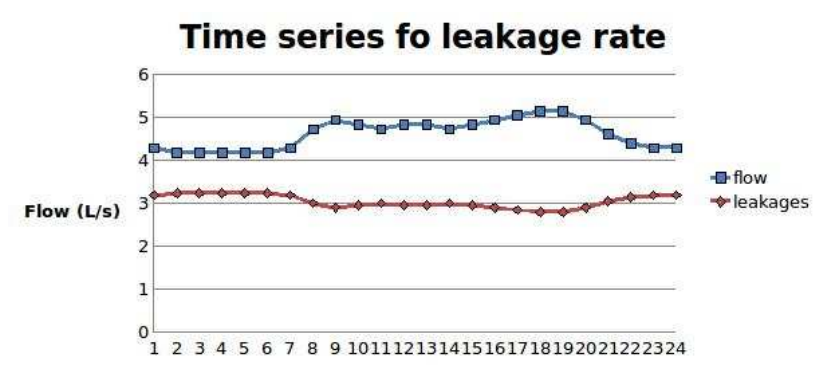


Figura 5.1 - Vazamentos quantificados através da calibração global (Centro)

Com os dados obtidos através da simulação, realizou-se um teste métrico para verificar a qualidade da calibração. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram, respectivamente, os valores de correlação encontrados para a calibração global e local do setor. Observa-se uma maior dispersão na calibração realizada com o expoente global. Matematicamente isso se explica tanto pela inserção do expoente que pode ser alterada tanto em posição, quanto em módulo.

Tabela 5.5 - Quantificação de vazamentos e vazões por hora em L/s (Centro)

hora	Global		Local	
	Vazão	Vazamentos	Vazão	Vazamentos
0	4.30	3.20	4.65	3.55
1	4.18	3.25	4.53	3.59
2	4.18	3.25	4.53	3.59
3	4.18	3.25	4.53	3.59
4	4.18	3.25	4.53	3.59
5	4.18	3.25	4.53	3.59
6	4.30	3.20	4.65	3.55
7	4.73	3.01	5.11	3.39
8	4.95	2.91	5.34	3.31
9	4.84	2.96	5.23	3.35
10	4.73	3.01	5.11	3.39
11	4.84	2.96	5.23	3.35
12	4.84	2.96	5.23	3.35
13	4.73	3.01	5.11	3.39
14	4.84	2.96	5.23	3.35
15	4.95	2.91	5.34	3.31
16	5.05	2.86	5.45	3.26
17	5.15	2.81	5.57	3.22
18	5.15	2.81	5.57	3.22
19	4.95	2.91	5.34	3.31
20	4.63	3.06	5.00	3.43
21	4.41	3.16	4.76	3.51
22	4.30	3.20	4.65	3.55
23	4.30	3.20	4.65	3.55

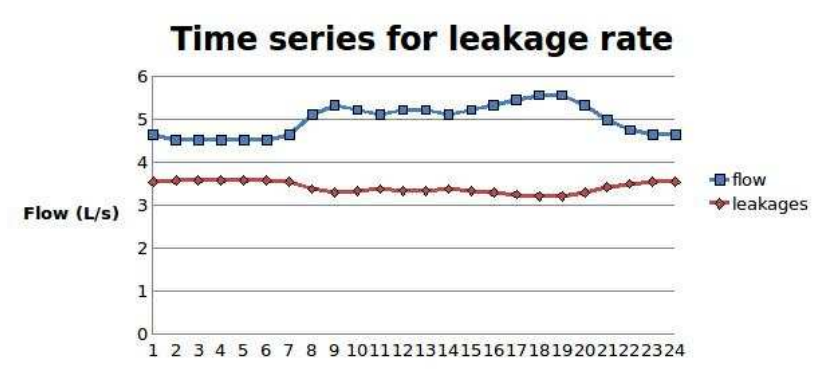


Figura 5.2 - Vazamentos quantificados através da calibração local (Centro)

Os vazamentos foram quantificados utilizando-se o balanço de massa e distribuídos ao longo do trecho utilizando o algoritmo proposto na metodologia. Na Tabela 5.1 listou-se apenas os 25 trechos mais críticos encontrados em cada modalidade de calibração. É possível verificar que os maiores trechos com vazamentos foram distintos em ambas as calibrações, devido a

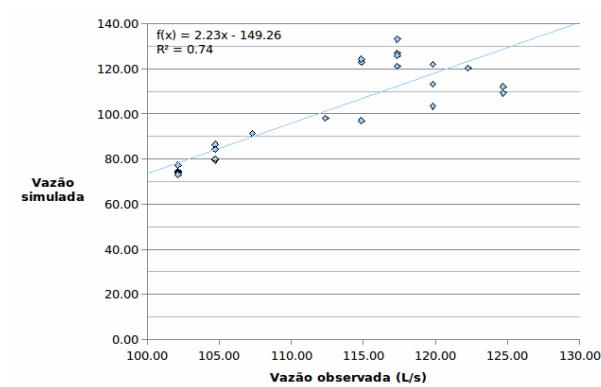


Figura 5.3 - Ajuste de tendência linear para o setor Centro (Global)

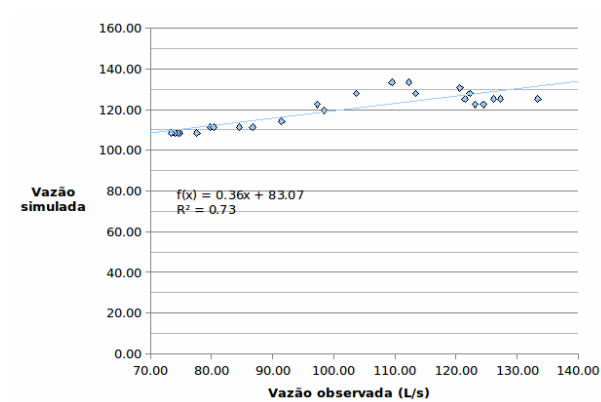


Figura 5.4 - Ajuste de tendência linear para o setor Centro (Local)

estimação dos parâmetros físicos terem sido encontrados em posições diferentes, conforme visto na Tabela 5.1.

As Figuras 5.5-a e 5.5-b apresentam as regiões com os trechos de maiores vazamentos.

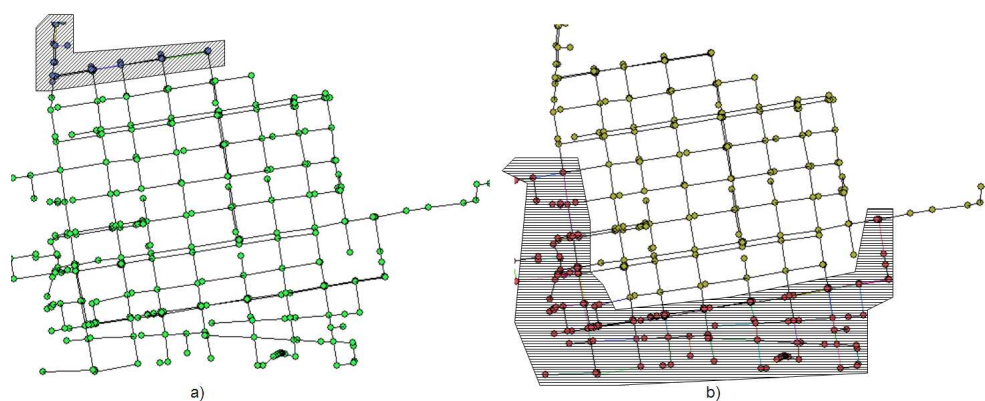


Figura 5.5 - Distribuição de vazamentos por trechos (Centro)

Tabela 5.6 - Trechos com maiores vazamentos em L/s (Centro)

Global		Local	
Trecho	Vazamento	Trecho	Vazamento
532	121.0545	75	1.0323
4	46.478	74	1.0279
209	35.994	11	0.9975
49	12.1614	127	0.9972
512	11.4178	236	0.983
163	10.3316	205	0.9742
291	9.9476	427	0.9353
367	8.8267	323	0.9066
154	8.2077	341	0.9066
184	7.5543	91	0.8849
155	7.5096	394	0.87
368	7.2154	31	0.864
3	6.6929	384	0.8377
26	4.6581	319	0.8267
444	3.866	551	0.8238
25	3.5361	397	0.8154
89	2.9968	381	0.794
275	2.8028	552	0.7907
338	2.475	451	0.7882
339	2.4514	555	0.7865
111	2.3103	353	0.7798
88	1.356	238	0.7771
131	1.3345	550	0.7763
58	1.1706	553	0.7714
274	1.0756	96	0.7618

5.2 Coophatrabalho

A Tabela 5.7 mostra os erros percentuais encontrados durante a calibração da segunda rede. Esperava-se que o resultado obtido com a calibração do setor dividido em uma quantidade maior de grupos apresentasse um erro menor do que o com uma quantidade menor. Entretanto, a adição de grupos aumenta a quantidade de dimensões e consequentemente o espaço de busca do algoritmo genético. Neste caso, para que o algoritmo convergisse com a utilização de 61 grupos, seria necessária um incremento no número de populações e na quantidade de gerações. A calibração de ambas as redes utilizou os mesmos parâmetros para o algoritmo genético (População inicial: 1000, Quantidade de gerações: 20000). Devido a isso, verificou-se um resultado melhor na rede calibrada com apenas 4 grupos. Através da comparação entre a calibração do mesmo setor, utilizando números de grupos diferentes foi possível observar que a velocidade de

convergência pode ser aumentada sensivelmente através da escolha correta da população inicial. Adicionando populações que percorram os vértices de um hipercubo, ou seja, com variáveis de decisão variando nos extremos das restrições, além da adição da população inicial aleatória, mostrou um tempo de resposta muito superior ao método tradicional.

Tabela 5.7 - Erros obtidos na calibração (Coophatrabalho)

	Erro %			
	61 grupos		4 grupos	
	Global	Local	Global	Local
Trecho 1	14.24	67.93	15.28	14.06
Nó 36	16.08	18.96	13.27	16.68
Nó 89	10.16	16.75	18.33	13.83

Conforme explicado, as vazões das calibrações globais e da calibração local utilizando 4 grupos foram muito semelhantes. O erro entre as vazões observadas e simuladas através da calibração com 61 grupos foi de 67.93% (Tabela 5.7).

As simulações das pressões obtidas no nó 36 foram semelhantes em todas as calibrações. A simulação da rede sem calibração já apresentava valores próximos aos valores reais e tiveram uma pequena melhoria com a calibração. É possível verificar que este ponto é pouco influenciado pela vazão e tem sua maior influência de pressão devido a diferença de quota, pois mesmo no cenário de maior vazão, o erro foi próximo ao verificado nas outras simulações.

Tabela 5.8 - Taxa estimada de vazamentos (Coophatrabalho)

	61 grupos		4 grupos	
	Global	Local	Global	Local
Vazão média (L/s)	10.92	17.78	7.73	11.10
Demanda estimada (L/s)	5.78	12.62	2.59	5.46
Taxa de vazamentos	52.94%	71.10%	33.52%	53.71%

Do mesmo modo que no Centro, o setor apresentou os maiores índices de vazamentos durante a madrugada, entretanto as diferenças entre vazamentos máximos e mínimos foram mais sutis no segundo setor e foram praticamente constantes para todo o período simulado. Os vazamentos simulados foram semelhantes para todos os cenários simulados, excetuando o com expoentes locais e 61 grupos, cenário onde houve o maior erro encontrado (67.93%).

A Tabela 5.2 lista os vazamentos e as vazões simuladas para o setor Coophatrabalho, quantificados após a calibração de forma global e local, separados em 4 e 61 grupos. Em todos

os cenários simulados, verifica-se que grande parcela da vazão no período da madrugada deve-se aos vazamentos.

Tabela 5.9 - Quantificação de vazamentos e vazões por hora em L/s (Coophatrabalho)

hour	61 grupos				4 grupos			
	global		local		global		local	
	flow	leakages	flow	leakages	flow	leakages	flow	leakages
0	0.31	0.25	0.61	0.54	0.18	0.11	0.32	0.25
1	0.32	0.25	0.62	0.56	0.18	0.11	0.33	0.26
2	0.32	0.26	0.63	0.56	0.18	0.12	0.33	0.26
3	0.32	0.26	0.62	0.56	0.18	0.12	0.33	0.26
4	0.31	0.25	0.61	0.55	0.18	0.11	0.32	0.26
5	0.37	0.24	0.66	0.53	0.24	0.11	0.38	0.25
6	0.46	0.24	0.74	0.52	0.32	0.11	0.46	0.25
7	0.52	0.24	0.80	0.52	0.39	0.11	0.53	0.25
8	0.59	0.23	0.87	0.51	0.46	0.11	0.60	0.24
9	0.59	0.23	0.87	0.51	0.47	0.11	0.60	0.24
10	0.58	0.23	0.85	0.51	0.45	0.11	0.59	0.24
11	0.55	0.23	0.82	0.51	0.42	0.10	0.55	0.24
12	0.51	0.24	0.79	0.51	0.38	0.11	0.52	0.24
13	0.50	0.24	0.78	0.52	0.36	0.11	0.50	0.24
14	0.48	0.24	0.77	0.52	0.35	0.11	0.49	0.25
15	0.51	0.24	0.79	0.52	0.38	0.11	0.51	0.25
16	0.51	0.24	0.79	0.52	0.38	0.11	0.52	0.25
17	0.63	0.23	0.91	0.51	0.51	0.11	0.64	0.24
18	0.57	0.23	0.85	0.51	0.44	0.11	0.58	0.24
19	0.53	0.23	0.81	0.51	0.40	0.11	0.54	0.24
20	0.41	0.24	0.69	0.53	0.28	0.11	0.42	0.25
21	0.38	0.24	0.66	0.53	0.24	0.11	0.38	0.25
22	0.34	0.24	0.63	0.53	0.20	0.11	0.35	0.25
23	0.32	0.25	0.60	0.53	0.18	0.11	0.32	0.25

As Figuras 5.2-5.2 ilustram os dados da Tabela 5.2. A taxa de vazamentos calculada para as diferentes modalidades apresentou algumas variações significativas. O valor da simulação global com 61 setores (Figura 5.2) foi semelhante ao valor da simulação local (Figura 5.2) com 4 setores (52.94% e 53.71%). As semelhanças ocorreram tanto nos percentuais, quanto nos valores calibrados individualmente. Os vazamentos encontrados para a calibração local utilizando 61 setores foram super-estimados em 71% (Figura 5.2).

Os parâmetros encontrados com as calibrações do setor Coophatrabalho estão listadas na Tabela 5.2. Esta rede foi modelada utilizando como rugosidade, a fórmula universal (Darcy-Weisbach). No grupo 2, a rugosidade encontrada foi de 1 para as duas modalidades de calibração indicando que no local existe uma alta perda de carga real ou alguma singularidade

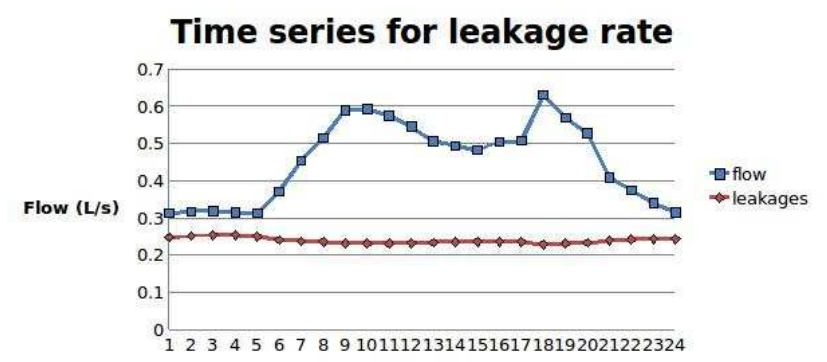


Figura 5.6 - Vazamentos quantificados através da calibração global com 61 grupos (Coophatrabalho)

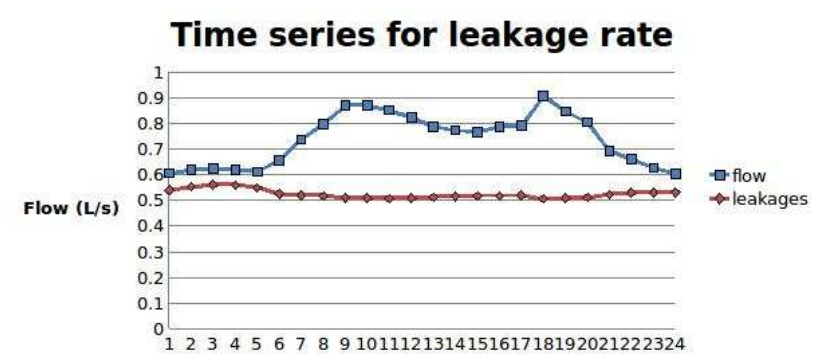


Figura 5.7 - Vazamentos quantificados através da calibração local com 61 grupos (Coophatrabalho)

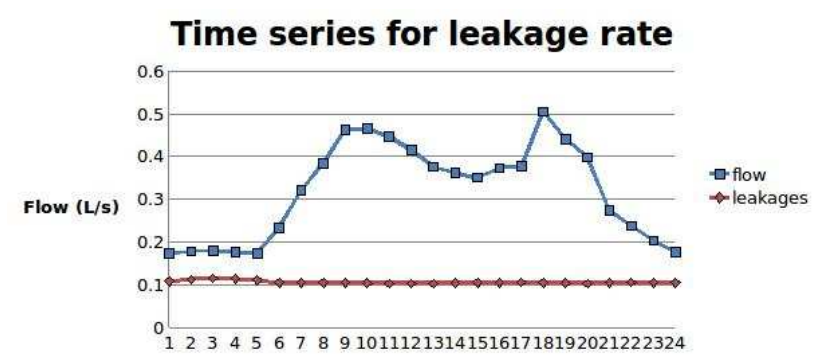


Figura 5.8 - Vazamentos quantificados através da calibração global com 4 grupos (Coophatrabalho)

hidráulica desconhecida. Na calibração global, o algoritmo genético encontrou como melhor solução, um coeficiente de vazamento para o grupo 4, enquanto os outros grupos apresentaram o valor 0, indicando que não existem vazamentos nas outras regiões. Esse comportamento ocorreu pois as regiões devem apresentar uma taxa de vazamentos muito pequena e uma quantidade de nós muito grande. Caso o algoritmo busque uma solução numérica que forneça um pequeno

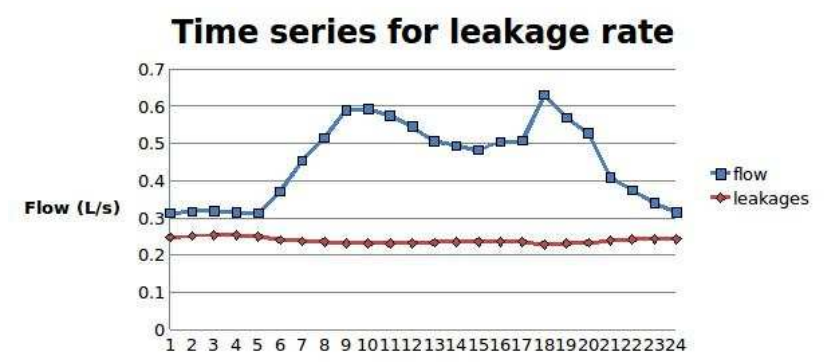


Figura 5.9 - Vazamentos quantificados através da calibração local com 4 grupos (Coophatrabalho)

valor para uma grande quantidade de nós, a totalidade de vazamentos será um número representativo. Neste caso, o valor mais próximo, ou seja, o menor erro, será com o valor zero para o grupo todo.

Tabela 5.10 - Parâmetros obtidos na calibração (Coophatrabalho)

Grupo	Global		Local		
	Coef.	Rugosidade	Coef.	Expoente	Rugosidade
1	0	0.0015	0.0001	0.7938	0.2778
2	0	1	0.0681	0.5243	1
3	0	0.0790	0	-	0.0015
4	0,2937	1	0.1932	0.5	0.0015

A análise da tendência mostrou bons valores para as calibrações do setor Coophatrabalho em todos os cenários simulados. Observou-se que os valores de calibração que utilizam expoentes locais apresentam resultados melhores do que utilizando um expoente global.

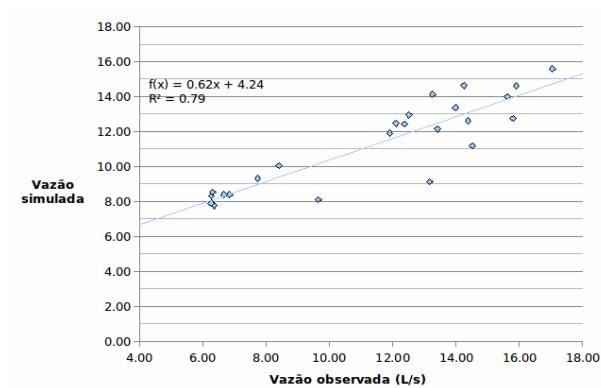


Figura 5.10 - Ajuste de tendência linear para o setor Coophatrabalho com calibração global - 4 setores

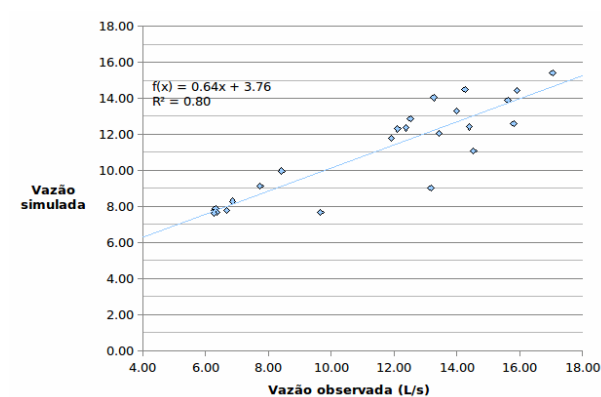


Figura 5.11 - Ajuste de tendência linear para o setor Coopatrabalho com calibração local - 4 setores

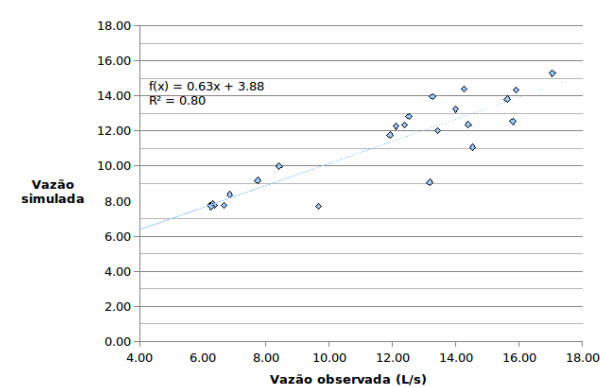


Figura 5.12 - Ajuste de tendência linear para o setor Coopatrabalho com calibração global - 61 setores

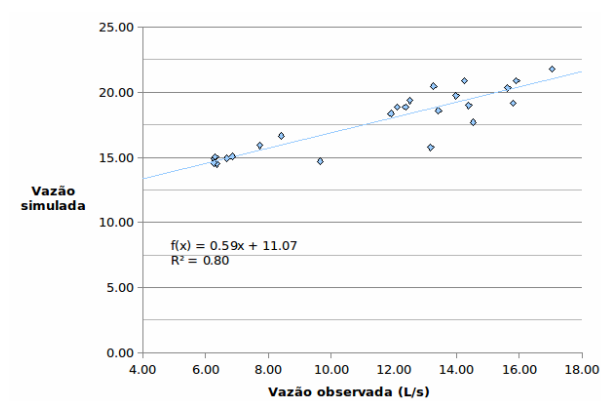


Figura 5.13 - Ajuste de tendência linear para o setor Coopatrabalho com calibração local - 61 setores

A Tabela 5.2 mostra os 25 trechos com maiores vazamentos obtidos através das calibrações. A calibração global utilizando apenas 4 setores inseriu os vazamentos no menor grupo, que apresentava apenas um trecho. A explicação é a mesma da calibração do setor Centro. Gru-

pos com muitos elementos totalizam grandes quantidades de vazamentos e faz com que a opção ótima escolhida seja a de nenhum vazamento. O mesmo comportamento não ocorre na calibração local, mesmo com pequenos números de grupos com grandes quantidades de elementos, pois existe a flexibilidade no valor do expoente, gerando valores mais próximos dos reais. Entretanto, conclui-se que a setorização não deve ser realizada em grupos de forma compulsória, pois não há garantias de que a calibração retorne resultados realísticos.

Tabela 5.11 - Trechos com maiores vazamentos em L/s (Coophatrabalho)

4 grupos				61 grupos			
Global		Local		Global		Local	
Trecho	Vazamento	Trecho	Vazamento	Trecho	Vazamento	Trecho	Vazamento
133	2.5913	133	1.7069	64	5.6808	64	3.7177
158	0.0001	158	0.7497	57	0.0646	102	2.8338
172	0.0001	172	0.6457	58	0.0358	73	1.4348
157	0.0001	157	0.4863	157	0.0001	103	0.9865
156	0.0001	156	0.4751	156	0.0001	57	0.9763
168	0.0001	168	0.4655	168	0.0001	158	0.9307
169	0.0001	169	0.4571	169	0.0001	58	0.8501
170	0.0001	170	0.4483	170	0.0001	56	0.7151
171	0.0001	171	0.44	171	0.0001	55	0.1748
64	0.0001	64	0.0041	64	0.0001	54	0.022
102	0.0001	102	0.0039	102	0.0001	102	0.0001
71	0.0001	71	0.0034	71	0.0001	71	0.0001
31	0.0001	31	0.003	31	0.0001	31	0.0001
63	0.0001	63	0.003	63	0.0001	63	0.0001
68	0.0001	68	0.003	68	0.0001	68	0.0001
61	0.0001	61	0.0029	61	0.0001	61	0.0001
62	0.0001	62	0.0029	62	0.0001	62	0.0001
40	0.0001	40	0.0028	40	0.0001	40	0.0001
103	0.0001	103	0.0028	103	0.0001	103	0.0001
66	0.0001	66	0.0027	66	0.0001	66	0.0001
104	0.0001	104	0.0027	104	0.0001	104	0.0001
105	0.0001	105	0.0027	105	0.0001	105	0.0001
27	0.0001	27	0.0026	27	0.0001	27	0.0001
65	0.0001	65	0.0026	65	0.0001	65	0.0001
70	0.0001	70	0.0026	70	0.0001	70	0.0001

A Figura 5.14 mostra os vazamentos distribuídos por trecho para o setor dividido em quatro grupos e a Figura 5.15 mostra os resultados da distribuição dos vazamentos com a calibração utilizando 61 grupos.

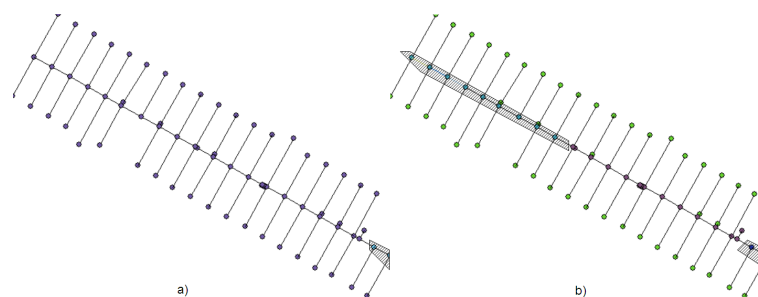


Figura 5.14 - Distribuição de vazamentos por trechos utilizando 4 grupos (Coophatrabalho)

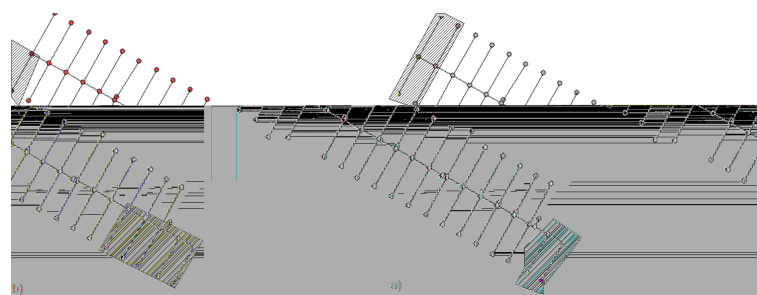


Figura 5.15 - Distribuição de vazamentos por trechos utilizando 61 grupos (Coophatrabalho)

5.3 Nova Lima

No terceiro setor, em todas as simulações do nó 824, existe uma diminuição nos valores da pressão nos dois horários de ponta. Entretanto, essa diminuição não ocorre em campo, a pressão mantém o valor aproximadamente constante durante todo o período do horário comercial, indicando uma provável incerteza na modelagem. A calibração com expoentes locais apresentou erros menores em relação a calibração global.

Tabela 5.12 - Taxa estimada de vazamentos (Nova Lima)

	Calibração global	Calibration local
Vazão média (L/s)	59.75	45.65
Demanda estimada (L/s)	47.29	33.18
Taxa de vazamentos:	79.14%	72.68%

A Tabela 5.3 mostra os resultados da quantificação dos vazamentos do setor Nova Lima. Os valores obtidos demonstram que o setor possui um alto índice de perdas. Boa parte da vazão da madrugada é atribuída aos vazamentos, e durante o dia, existe um pequeno acréscimo no consumo e uma diminuição nos vazamentos. Entretanto, o consumo é baixo no setor, e os valores das altas pressões fazem com que os vazamentos sejam altos durante todo o dia.

A Figura 5.16 mostra o resultado dos vazamentos quantificados durante a simulação global. Observa-se que mesmo após a calibração, a vazão do setor varia muito pouco durante todo o período. O mesmo não ocorre com a calibração local (Figura 5.17), que altera a componente exponencial da equação e faz com que os dados tenham uma maior aderência aos valores observados em campo.

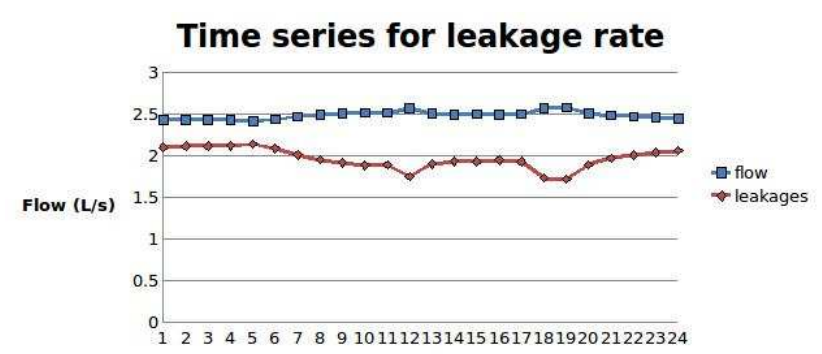


Figura 5.16 - Vazamentos quantificados através da calibração global (Nova Lima)

A análise da tendência mostrou-se satisfatória para ambas as propostas de calibração. Os valores encontrados foram próximos, com uma pequena vantagem para a calibração local. En-

Tabela 5.13 - Quantificação de vazamentos e vazões por hora em L/s (Nova Lima)

hora	Global		Local	
	Vazão	Vazamentos	Vazão	Vazamentos
0	2.44	2.11	1.76	1.43
1	2.43	2.12	1.74	1.43
2	2.43	2.12	1.74	1.43
3	2.43	2.12	1.74	1.43
4	2.42	2.15	1.71	1.44
5	2.44	2.10	1.77	1.42
6	2.47	2.01	1.86	1.40
7	2.49	1.96	1.92	1.38
8	2.51	1.92	1.96	1.37
9	2.52	1.89	1.99	1.36
10	2.52	1.90	1.98	1.36
11	2.57	1.76	2.12	1.31
12	2.51	1.91	1.97	1.37
13	2.50	1.94	1.94	1.37
14	2.50	1.93	1.94	1.37
15	2.50	1.95	1.92	1.38
16	2.50	1.94	1.94	1.37
17	2.58	1.74	2.14	1.30
18	2.58	1.73	2.15	1.30
19	2.52	1.90	1.98	1.36
20	2.49	1.98	1.90	1.39
21	2.47	2.01	1.86	1.40
22	2.46	2.04	1.83	1.41
23	2.45	2.07	1.80	1.41

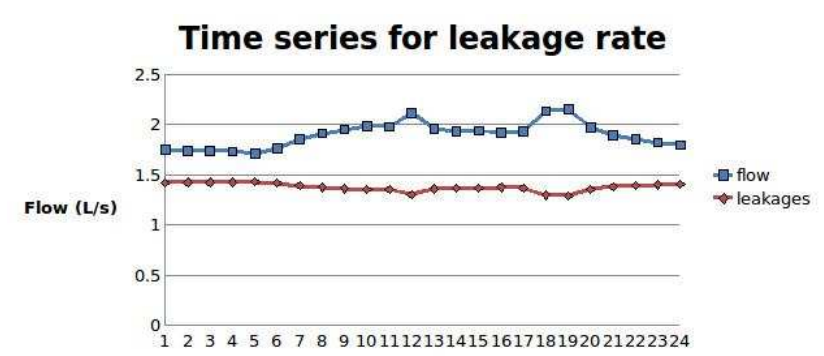


Figura 5.17 - Vazamentos quantificados através da calibração local (Nova Lima)

tretanto, o coeficiente angular da calibração global mostra que o ângulo da primeira calibração está mais próximo do real, indicando que existe um erro sistêmico no segundo método que pode ser corrigido.

As rugosidades obtidas em ambas as calibrações foram próximas, com excessão dos gru-

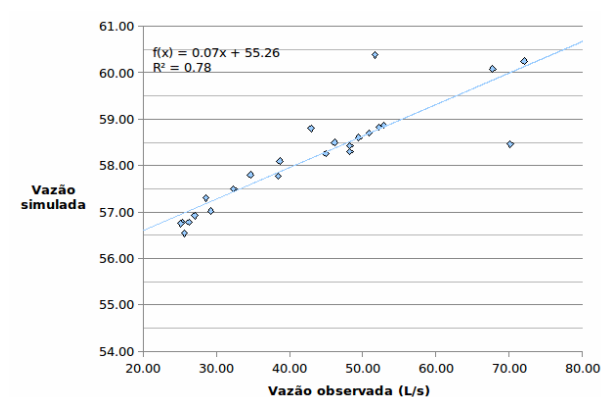


Figura 5.18 - Ajuste de tendência linear para o setor Nova Lima com calibração global

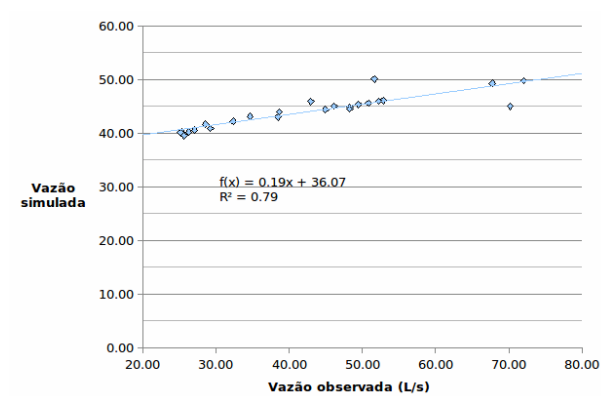


Figura 5.19 - Ajuste de tendência linear para o setor Nova Lima com calibração local

pos internos, que compensaram a diferença com a adição de pequenos valores para os coeficientes de vazamentos. O grupo que apresentou coeficientes maiores na calibração global, coincidiu com o da calibração local, indicando um bom local para a localização dos vazamentos.

A Tabela 5.3 lista os 25 maiores trechos com vazamentos estimados pelas calibrações ordenados por quantidade de vazamentos. As colunas mostram uma certa consistência entre a calibração global e local pois, apesar de não localizarem os trechos na mesma ordem, apresentaram grande parte dos mesmos trechos em ambos os resultados.

A Figura 5.20 mostra os resultados visuais da localização dos trechos com maiores probabilidades de vazamentos.

Tabela 5.14 - Parâmetros obtidos na calibração (Nova Lima)

Grupos	Global		Local		
	Coef.	Rugosidade	Coef.	Expoente	Rugosidade
1	0.0001	85	0.0299	0.5586	85
2	0.0001	85	0	-	147
3	0.0001	85	0	-	143
4	0.0001	85	0	-	150
5	1.6973	114	0.1616	0.5839	146
6	0.0001	144	0	-	146
7	0.0001	148	0	-	150
8	0.0001	149	0.5	-	150
9	0.532	144	0.5	-	138
10	1.063	149	0.5	-	150
11	0.0001	85	0	-	150
12	1.3906	149	0	-	150
13	0.0001	105	0.0003	0.7502	149

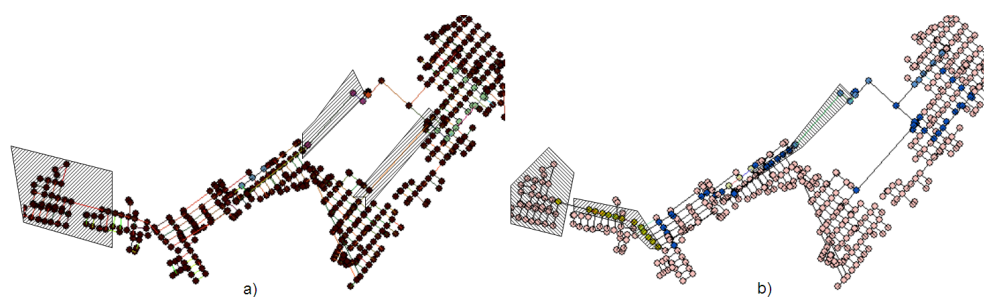


Figura 5.20 - Distribuição de vazamentos por telhas (Nova Lima)

Tabela 5.15 - Trechos com maiores vazamentos em L/s (Nova Lima)

Global		Local	
Trecho	Vazamento	Trecho	Vazamento
1308	8.1392	1373	4.0214
2	6.9073	2	3.4005
1135	5.3758	992	3.1656
1159	5.1121	7	2.0252
1160	4.9121	5	1.9812
3	3.2401	1308	1.9123
1131	2.7308	748	1.8249
4	2.1253	1159	1.6813
5	2.1183	3	1.3151
1132	2.1026	1160	1.2697
1134	1.6791	4	1.2465
278	1.0812	1127	1.1006
1133	1.007	1128	1.1005
190	1.0066	192	0.6718
277	0.6901	185	0.6493
191	0.6204	193	0.5717
1129	0.5919	1182	0.4676
361	0.5281	1172	0.3937
295	0.4666	1181	0.2808
298	0.3059	1180	0.2786
301	0.1154	1179	0.2723
748	0.1044	1178	0.2671
1130	0.0804	1177	0.2643
654	0.0458	1174	0.2616
644	0.0443	1173	0.2606

Capítulo 6

Conclusão

As perdas físicas em sistemas de distribuição de água são problemas que afetam países desenvolvidos e em desenvolvimento. Para auxiliar na quantificação e localização de regiões com vazamentos, foi proposta uma metodologia de baixo custo que utilizasse modelagem e método inverso.

A metodologia foi aplicada em redes de diferentes tamanhos e topologias (espinha de peixe e redes mistas) e os resultados mostraram que o método proposto pode ser uma ferramenta de grande auxílio no combate as perdas. Através do método foi possível quantificar as perdas totais dos setores e determinar regiões que apresentavam as maiores probabilidades de vazamentos. No entanto, o método não elimina a necessidade de modeladores experientes em conjunto com operadores de campo. Devido as inúmeras incertezas existentes nas redes de distribuição, a calibração dos modelos podem levar a falsos resultados, gerando parâmetros físicos não realísticos, e é necessário que as informações geradas sejam interpretadas de maneira crítica.

O uso de expoentes locais para a calibração mostrou resultados um pouco melhores em relação a utilização de um expoente global, ao custo de um incremento significativo na complexidade e tempo de processamento computacional. A inclusão do expoente no processo de calibração aumenta o número de variáveis de 2 (rugosidade e coeficientes) para 3. Consequentemente, o espaço de busca do algoritmo genético para as variáveis de decisão passa a ser definido como uma combinação C_3^n . Teoricamente, o aumento no espaço de busca aumenta a probabilidade de encontrar soluções melhores, entretanto, conclui-se que o uso da calibração utilizando

expoentes locais é recomendado somente com a redução no número de incertezas, incluindo inserindo constantes levantadas via mínimas noturnas para o expoente em algumas regiões.

A divisão dos setores em grandes grupos mostrou que a calibração pode ser prejudicada devido a generalização de muitos trechos ao mesmo tempo. Por outro lado, a criação de grupos muito pequenos pode levar a aproximações numéricas melhores, mas que podem não ter significado físico real, pois a rede é fonte de diversas incertezas. Com isso, conclui-se que o método proposto pode ser utilizado para auxiliar na localização de vazamentos, mostrando áreas com possíveis regiões de vazamentos, entretanto, a localização exata do vazamento em um trecho só se tornará viável com tecnologias de monitoramento utilizadas em grande quantidade e com o barateamento da tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMOODAND, A. I. A.; ABO-GHOBAR, H. M. Evaluation of hydraulic characteristics of some locally available emitters. *Journal of King Saud University*, v. 6, p. 15–26, 1994.
- ARAUJO, L.; RAMOS, H.; COELHO, S. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, Springer, v. 20, n. 1, p. 133–149, February 2006. ISSN 0920-4741.
- BOSE, J. R.; OLSON, M. K. Taps's leak detection seeks greater precision. *Oil & Gas Journal*, v. 91(13), p. 43–48, 1993.
- CARLSON, B. N. Selection and use of pipeline leak detection methods for liability management into the 21st century. In: *Pipeline Infrastructure II, Proceedings of the International Conference*, ASCE. [S.l.: s.n.], 1993.
- COVAS, D.; RAMOS, H.; ALMEIDA, A. B. de. Standing wave difference method for leak detection in pipeline systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 131, n. 12, p. 1106–1116, 2005. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?QHY/131/1106/1>>.
- GIUSTOLISI, O.; SAVIC, D.; KAPELAN, Z. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 134, n. 5, p. 626–635, 2008. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?QHY/134/626/1>>.
- GREYVENSTEIN, B.; ZYL, J. E. v. An experimental investigation into the pressure leakage relationship of some failed water pipes. In: *Journal of Water Supply*. Great Britain: [s.n.], 2007. v. 56, n. 2, p. 117–124.
- KAPELAN, Z. S.; SAVIC, D. A.; WALTERS, G. A. Multiobjective design of water distribution systems under uncertainty. *Water Resources Research*, v. 41, 2005.

- LIGGETT, J. A.; CHEN, L.-C. Inverse transient analysis in pipe networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 120, n. 8, p. 934–955, 1994. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?QHY/120/934/1>>.
- MALLICK, K. N. et al. Determining pipe groupings for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 128, n. 2, p. 130–139, 2002.
- ROSSMAN, L. A. *EPANET 2 Users Manual*. Cincinnati, 2000.
- SNIS. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2008*. Brasília, dez 2008.
- SOARES, A. K. et al. *Avaliação das perdas físicas de um setor da rede de abastecimento de água de Campo Grande - MS via modelo inverso*. [S.l.], 2004.
- TODINI, E.; PILATI, S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. Research Studies Press Ltd., Taunton, UK, UK, p. 1–20, 1988.
- TUCCIARELLI, T.; CRIMINISI, A.; TERMINI, D. Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 125, n. 3, p. 277–285, 1999.
- TURNER, N. C. Hardware and software techniques for pipeline integrity and leak detection monitoring. In: *Proceedings of Offshore Europe 91, Aberdeen, Scotland*. [S.l.: s.n.], 1991.
- VITKOVSKY, J. P. et al. Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 133, n. 6, p. 519–530, 2007. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?QWR/133/519/1>>.
- VITKOVSKY, J. P.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 126, n. 4, p. 262–265, 2000. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?QWR/126/262/1>>.
- WALL, M. *GAlib: A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. [S.l.]: Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- WU, Z. Y. et al. Efficient pressure dependent demand model for large water distribution system analysis. In: BUCHBERGER, S. G. (Ed.). [S.l.]: ASCE, 2006. v. 247, n. 40941, p. 39–39.

- ZHANG, D. Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system. In: *Pipeline Reliability Conference*. [S.l.: s.n.], 1996.
- ZYL, J. E. v.; CLAYTON, C. R. I. The effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Water Management*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, v. 160, n. 2, p. 109–114, 2007. ISSN 1741-7589.

APÊNDICE A - DADOS DAS SIMULAÇÕES

Tabela 6.1 - Grupos criados para o setor Centro

Grupos	Trechos
1	1 , 10 , 11 , 114 , 120 , 121 , 127 , 133 , 148 , 149 , 153 , 156 , 157 , 158 , 159 , 160 , 164 , 165 , 166 , 167 , 170 , 172 , 173 , 174 , 175 , 176 , 177 , 205 , 206 , 21 , 214 , 215 , 22 , 23 , 235 , 236 , 238 , 239 , 24 , 262 , 265 , 266 , 267 , 268 , 269 , 27 , 270 , 271 , 272 , 273 , 276 , 277 , 28 , 286 , 287 , 29 , 30 , 31 , 313 , 317 , 318 , 319 , 320 , 322 , 323 , 324 , 33 , 332 , 333 , 34 , 340 , 341 , 344 , 345 , 346 , 349 , 350 , 353 , 354 , 355 , 357 , 358 , 372 , 373 , 374 , 375 , 376 , 377 , 379 , 380 , 381 , 382 , 383 , 384 , 385 , 393 , 394 , 395 , 396 , 397 , 402 , 405 , 406 , 425 , 426 , 427 , 429 , 447 , 451 , 455 , 456 , 471 , 472 , 474 , 475 , 476 , 484 , 485 , 492 , 5 , 500 , 505 , 510 , 517 , 518 , 52 , 524 , 525 , 544 , 545 , 550 , 551 , 552 , 553 , 554 , 555 , 7 , 70 , 71 , 72 , 73 , 74 , 75 , 76 , 77 , 78 , 8 , 9 , 91 , 95 , 96 , 97
2	112, 113, 12, 122, 13, 134, 135, 136, 14, 15, 16, 17, 178, 18, 187, 188, 189, 19, 190, 191, 193, 194, 196, 197, 2, 20, 200, 201, 202, 203, 204, 218, 219, 264, 282, 288, 289, 295, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 32, 334, 335, 336, 337, 35, 351, 352, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 37, 38, 386, 387, 388, 389, 39, 390, 391, 398, 399, 40, 400, 401, 41, 42, 428, 440, 441, 446, 448, 450, 452, 454, 457, 458, 459, 460, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 473, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 486, 506, 507, 508, 515, 516, 519, 520, 521, 522, 528, 537, 54, 543, 546, 549, 55, 562, 563, 6, 98
3	117, 132, 179, 195, 199, 207, 210, 211, 212, 213, 216, 217, 220, 234, 237, 263, 360, 369, 371, 378, 43, 439, 44, 442, 453, 461, 462, 463, 47, 470, 48, 483, 487, 488, 489, 490, 491, 493, 494, 495, 496, 501, 503, 504, 511, 514, 526, 534, 535, 536, 538, 539, 540, 542, 560
4	111, 131, 154, 155, 163, 184, 208, 209, 25, 26, 274, 275, 285, 291, 3, 338, 339, 367, 368, 370, 4, 443, 444, 445, 49, 509, 512, 513, 530, 532, 541, 56, 57, 58, 59, 88, 89

Tabela 6.2 - Grupos criados para o setor Cooptrabalho

Grupos	Trechos
1	1, 124, 131, 16, 163, 164, 165, 166, 167, 17, 174, 175, 176, 177, 4
2	132, 133
3	156, 157, 158, 168, 169, 170, 171, 172, 173
4	102, 103, 104, 105, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78

Tabela 6.3 - Grupos criados para o setor Nova Lima

Grupos	Trechos
1	1172, 1173, 1174, 1175, 1176, 1177, 1178, 1179, 1180, 1181, 1182
2	1167, 1168, 1169, 1170, 1171, 1316, 1317
3	1165, 1166
4	1161, 1162, 1163, 1164
5	1159, 1160, 1307, 1308
6	1158
7	10, 11, 1278, 365
8	1373, 8, 9, 992
9	5, 6, 7
10	2, 3, 4
11	750, 751, 752, 753, 754
12	1127, 1128, 1129, 1130, 1131, 1132, 1133, 1134, 1135, 1136, 361, 366
13	Todos os trechos restantes

Tabela 6.4 - Vazões referentes ao trecho 563 em L/s (Centro)

Observado	Simulado	Global	Local
77.50	22.53	102.12	108.71
74.72	22.52	102.12	108.71
74.44	22.53	102.12	108.71
73.89	22.53	102.12	108.71
73.33	22.52	102.12	108.71
79.72	22.53	104.70	111.54
97.22	41.30	114.84	122.69
113.33	48.80	119.79	128.18
121.39	45.05	117.33	125.44
123.06	41.30	114.85	122.69
133.33	45.05	117.33	125.44
127.22	45.05	114.85	122.69
124.44	41.29	117.33	125.44
126.11	45.05	114.85	125.44
122.22	48.80	117.33	128.18
120.56	52.56	119.79	130.89
112.22	56.31	122.24	133.60
109.44	56.31	124.66	133.59
103.61	48.80	124.66	128.18
98.33	37.54	112.34	119.93
91.39	30.03	107.27	114.35
86.67	26.28	104.70	111.54
84.44	26.28	104.70	111.54
80.29	26.28	104.70	111.54

Tabela 6.5 - Pressões referentes ao nó 304 em mH_2O (Centro)

Observado	Simulado	Global	Local
21	32.62	23.01	22.99
21	32.62	23.01	22.99
21	32.62	23.01	22.99
21	32.62	23.01	22.99
22	32.62	23.01	22.99
21	32.54	22.38	22.48
20	32.14	19.82	20.37
19	31.88	18.51	19.26
19	32.01	19.17	19.82
19	32.14	19.82	20.37
19	32.01	19.17	19.82
19	32.01	19.17	19.82
18	32.14	19.82	20.37
18	32.01	19.17	19.82
18	31.88	18.51	19.26
18	31.74	17.85	18.70
19	31.59	17.19	18.12
19	31.59	17.19	18.12
20	31.88	18.51	19.26
20	32.25	20.47	20.91
20	32.45	21.75	21.97
21	32.54	22.38	22.48
21	32.54	22.38	22.48
21	32.54	22.38	22.48

Tabela 6.6 - Pressões referentes ao nó 632 em mH_2O (Centro)

Observado	Simulado	Global	Local
35	41.15	23.01	30.28
37	41.15	23.01	30.28
38	41.15	23.01	30.28
37	41.15	23.01	30.28
36	41.15	23.01	30.28
32	41.04	22.38	29.65
29	40.49	19.82	27.01
26	40.14	18.51	25.63
24	40.32	19.17	26.32
24	40.49	19.82	27.01
21	40.32	19.17	26.32
22	40.32	19.17	26.32
22	40.49	19.82	27.01
22	40.32	19.17	26.32
24	40.14	18.51	25.63
25	39.94	17.85	24.92
26	39.73	17.19	24.20
27	39.73	17.19	24.20
28	40.14	18.51	24.20
29	40.65	20.47	25.63
31	40.93	21.75	27.69
32	41.04	22.38	29.65
33	41.04	22.38	29.65
35	41.04	22.38	29.65

Tabela 6.7 - Pressões referentes ao nó 630 em mH_2O (Centro)

Observado	Simulado	Global	Local
33	52.78	43.32	30.84
34	52.78	43.32	30.84
37	52.78	43.32	30.84
37	52.78	43.32	30.84
36	52.78	43.32	30.84
30	52.69	42.82	30.24
26	52.19	40.78	27.78
18	51.87	39.72	26.52
21	52.04	40.25	27.15
19	52.19	40.78	27.78
19	52.04	40.25	27.15
19	52.04	40.25	27.15
19	52.19	40.78	27.78
20	52.04	40.25	27.15
20	51.87	39.72	26.52
20	51.70	39.18	25.88
21	51.51	38.64	25.24
23	51.51	38.64	25.24
28	51.87	39.72	26.52
29	52.33	41.30	28.41
30	52.58	42.32	29.64
31	52.69	42.82	30.24
32	52.69	42.82	30.24
32	52.69	42.82	30.24

Tabela 6.8 - Vazões referentes ao trecho 1 em L/s (Coophatrabalho)

Observed	Simulated	61 grupos		4 grupos	
		Global	Local	Global	Local
6.26	1.57	7.84	14.91	8.34	7.83
6.3	1.56	7.90	15.07	8.56	7.91
6.66	1.46	7.79	14.95	8.42	7.80
9.64	1.50	7.74	14.74	8.13	7.71
13.16	3.10	9.10	15.80	9.15	9.05
14.51	5.19	11.10	17.72	11.21	11.10
15.79	6.70	12.56	19.19	12.79	12.61
15.89	8.60	14.36	20.91	14.64	14.45
14.24	8.68	14.42	20.93	14.65	14.50
13.25	8.25	13.99	20.49	14.16	14.06
13.97	7.50	13.27	19.78	13.39	13.32
12.36	6.54	12.36	18.90	12.45	12.38
13.41	6.21	12.05	18.62	12.16	12.07
11.90	5.91	11.79	18.40	11.93	11.81
12.09	6.43	12.30	18.91	12.50	12.34
14.37	6.51	12.39	19.03	12.63	12.44
17.03	9.61	15.32	21.83	15.62	15.44
15.61	8.10	13.85	20.36	14.03	13.92
12.50	7.07	12.86	19.39	12.98	12.90
8.40	4.07	10.02	16.67	10.08	9.99
7.72	3.17	9.21	15.95	9.33	9.17
6.84	2.35	8.39	15.11	8.42	8.32
6.35	1.73	7.79	14.52	7.79	7.70
6.25	1.56	7.72	14.59	7.93	7.66

Tabela 6.9 - Pressões referentes ao nó 36 em mH_2O (Coophatrabalho)

Observed	Simulated	61 grupos		4 grupos	
		Global	Local	Global	Local
44.88	39.17	38.10	36.96	39.12	38.10
46.57	40.08	39.04	37.89	40.08	39.04
47.42	39.95	38.87	37.73	39.90	38.88
47.28	38.53	37.51	36.40	38.52	37.53
45.68	36.19	35.03	33.90	36.11	34.96
40.98	35.91	34.63	33.44	35.84	34.42
39.69	36.18	34.77	33.52	36.04	34.43
40.14	35.87	34.31	33	35.61	33.79
39.12	35.56	34	32.70	35.30	33.48
39.21	35.35	33.83	32.55	35.12	33.36
39.88	35.29	34.03	32.50	35.10	33.43
40.74	35.43	34.26	32.81	35.28	33.71
41.28	35.63	34.59	33.04	35.49	33.96
41.63	35.92	34.69	33.37	35.83	34.32
41.71	36.06	34.92	33.40	35.95	34.32
41.81	36.30	34.92	33.67	36.18	34.59
41.18	35.64	34.03	32.70	35.34	34.32
39.87	35.45	33.92	32.64	35.20	33.41
39.88	35.47	34.01	32.77	35.28	33.46
40.14	35.99	34.78	33.63	35.93	33.65
41.30	36.55	35.43	34.29	36.53	34.65
41.99	36.26	35.18	34.08	36.21	35.15
42.71	36.22	35.19	34.12	36.18	35.20
43.56	37.49	36.45	35.35	37.44	36.46

Tabela 6.10 - Pressões referentes ao nó 89 em mH_2O (Coophatrabalho)

		61 grupos		4 grupos	
		Global	Local	Global	Local
50.97	50.96	44.57	37.9	50.91	48.98
52.53	51.88	45.42	38.63	51.87	49.90
53.38	51.75	45.29	38.54	51.70	49.76
53.25	50.33	44.06	37.49	50.32	48.42
51.99	47.95	41.43	35.01	47.86	45.67
44.86	47.61	40.53	35.94	47.48	44.81
40.24	47.82	40.23	33.48	47.58	44.56
36.76	47.43	39.28	32.41	46.99	43.56
32.05	47.10	38.99	32.15	46.68	43.24
32.06	46.92	38.96	32.19	46.54	43.21
34.14	46.89	39.18	32.48	46.58	43.42
36.42	47.08	39.62	32.99	46.84	43.42
37.53	47.30	39.91	33.28	47.08	43.88
38.32	47.60	40.29	33.64	47.43	44.19
40.19	47.71	40.24	33.47	47.51	44.59
37.65	47.96	40.42	33.66	47.74	44.59
35.75	47.13	38.73	31.81	46.62	44.75
34.50	47.03	39.08	32.31	46.63	42.98
38.49	47.10	39.46	32.78	46.79	43.33
40.81	47.73	40.96	34.47	47.64	43.72
43.65	47.79	41.77	35.29	48.28	45.23
45.66	48.05	41.75	35.40	47.99	46.05
48.02	48.02	41.92	35.64	47.97	46.11
49.48	49.28	43.09	36.65	49.24	47.37

Tabela 6.11 - Vazões referentes ao trecho 5 em L/s (Nova Lima)

Observado	Simulado	Global	Local
25.30	7.47	56.79	40.31
26.20	7.47	56.79	40.31
25.10	7.35	56.76	40.21
25.60	6.62	56.55	39.62
29.20	8.33	57.03	40.99
38.40	11.02	57.78	43.10
44.90	12.86	58.27	44.52
49.40	14.09	58.61	45.45
52.80	15.07	58.88	46.19
52.20	14.94	58.84	46.09
67.70	19.48	60.09	49.43
50.80	14.45	58.71	45.73
48.20	13.47	58.44	44.98
46.10	13.72	58.51	45.17
48.20	12.98	58.31	44.61
70.10	13.60	58.47	45.08
72	20.09	60.26	49.87
51.60	20.58	60.39	50.22
42.90	14.82	58.81	46
38.60	12.25	58.11	44.05
34.60	11.15	57.81	43.20
32.30	10.04	57.51	42.34
28.50	9.31	57.31	41.76
27	7.96	56.93	40.70

Tabela 6.12 - Pressões referentes ao nó 808 em mH_2O (Nova Lima)

Observado	Simulado	Global	Local
52	70.58	54.07	53.60
52	70.58	54.07	53.60
52	70.64	54.22	53.74
52	71.01	55.08	54.55
51	70.09	52.97	52.64
52	68.30	49	49.50
48	66.84	45.85	47.29
46	65.75	43.54	45.77
44	64.83	41.83	44.55
42	64.95	31.57	44.7
42	60.02	42.82	38.84
40	65.41	44.71	45.32
41	66.31	44.8	46.53
46	66.09	44.25	46.23
48	66.73	45.62	47.14
46	66.20	44.48	46.38
42	59.27	30.03	38.03
41	58.65	28.77	37.38
48	65.07	42.08	44.85
48	67.35	46.94	48.03
50	68.21	48.80	49.36
51	69	50.53	50.66
52	69.49	51.62	51.51
52	70.31	53.45	53.05

Tabela 6.13 - Pressões referentes ao nó 824 em mH_2O (Nova Lima)

Observado	Simulado	Global	Local
82	89.20	72.10	65.32
83	89.20	72.10	65.32
83	89.29	72.28	65.51
83	89.71	73.29	66.62
79	88.64	70.80	64
69	86.54	66.09	59.71
43	84.82	62.33	56.67
39	83.56	59.58	54.61
42	82.48	57.24	52.93
45	82.61	57.54	53.14
42	76.85	45.28	45.15
44	83.16	58.72	53.98
47	84.20	60.98	55.64
45	83.95	60.43	55.23
43	84.7	62.07	56.47
44	84.08	60.71	55.44
43	75.97	43.44	44.05
42	75.25	41.92	43.16
49	82.75	57.84	53.35
46	85.42	63.63	57.69
63	86.43	65.85	59.51
74	87.36	67.91	61.29
79	87.93	69.20	62.46
80	88.88	71.37	64.57