

Vinícius Battistelli Lemos

Estimativa de Perdas Reais em Distritos
de Monitoramento e Controle

Campo Grande
2014

Vinícius Battistelli Lemos

Estimativa de Perdas Reais em Distritos de Monitoramento e Controle

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para a obtenção de Título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Peter Batista Cheung

**Campo Grande
2014**

Lemos, Vinícius Battistelli

Estimativa de Perdas Reais em Distritos de Monitoramento e Controle

112 páginas

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia.

1. abastecimento de água
2. perdas reais
3. suporte à decisão

I. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr.
Amâncio Rodrigues da Silva Jr.

Prof. Dr.
Fábio Veríssimo Gonçalves

Prof. Dr.
Peter Batista Cheung
Orientador

À minha família

Epígrafe

0011010000110010

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Peter Batista Cheung, pela paciência e dedicação durante a realização desta pesquisa.

Aos meus pais, agradeço pela ajuda e apoio incondicional.

Agradeço a Danielly pelo incentivo e vários finais de semana ensolarados que passamos dissertando juntos.

Não posso deixar de agradecer à UFMS, ao Programa de Pós Graduação em Tecnologias Ambientais e à CAPES pela oportunidade de realizar este trabalho.

Resumo

Perdas nos sistemas de abastecimento de água causam grandes prejuízo às companhias de saneamento. Neste trabalho desenvolveu-se um sistema para análise em tempo real das perdas reais em distritos de monitoramento e controle, utilizando a metodologia das vazões mínimas noturnas e computação em nuvem. O sistema foi capaz de estimar satisfatoriamente as perdas em uma rede fictícia quando configurado com os parâmetros corretos, e foi implementado em quatro distritos reais durante um período de testes.

Palavras-chave: abastecimento de água, perdas de água, modelagem hidráulica

Abstract

Water losses are responsible for a big revenue loss in water utilities. In this work is developed a cloud system for real time estimation of water losses in district metered areas, using the minimum night flow methodology. The system was capable of estimate the water losses in an demo network when set with the right parameters, and was implemented in four real district metered areas for a test period.

Keywords: water utilities, water losses, hydraulic modeling

Lista de Figuras

4.1	Arquitetura da Plataforma de Desenvolvimento	31
4.2	Fluxograma do Módulo Coletor	33
4.3	Modelo de dados	35
4.4	Fluxograma para somatória de volumes	39
4.5	Fluxograma para cálculo da vazão	41
4.6	Fluxograma para cálculo da continuidade	42
4.7	Fluxograma para cálculo do volume diário de perdas reais	46
4.8	Rede fictícia no Epanet	48
4.9	Fluxograma para realizar simulações hidráulicas	55
4.10	Equipamento para coleta e envio dos dados Ologger GPRS	55
4.11	Teste de comunicação entre o Ologger GPRS e o macromedidor Siemens MAG 8000	56
5.1	Interface de visualização dos dados	61
5.2	Boxplot da pressão nas redes simuladas	64
5.3	Boxplot do volume nas redes simuladas	64
5.4	Boxplot do vazão nas redes simuladas	66
5.5	Histórico da continuidade do abastecimento nos DMCs	68

5.6	Volume total e volume de perdas nas redes simuladas	70
5.7	Perdas diárias na Rede 02	74
5.8	Perdas diárias na Rede 03	74
5.9	Volume macromedido e perdas no DMC 01	76
5.10	Volume macromedido e perdas no DMC 02	77
5.11	Volume macromedido e perdas no DMC 03	78
5.12	Volume macromedido e perdas no DMC 04	79
A.1	Pressão e volume na rede simulada	96
A.2	Vazão na rede simulada	97
A.3	Rede 01 - Pressão e volume	98
A.4	Rede 01 - Vazão	99
A.5	Rede 02 - Pressão e volume	100
A.6	Rede 02 - Vazão	101
A.7	Rede 03 - Pressão e volume	102
A.8	Rede 03 - Vazão	103
A.9	DMC 01 - Pressão e volume	105
A.10	DMC 01 - Vazão e Perdas estimadas	106
A.11	DMC 02 - Pressão e volume	107
A.12	DMC 02 - Vazão e Perdas estimadas	108
A.13	DMC 03 - Pressão e volume	109
A.14	DMC 03 - Vazão e Perdas estimadas	110
A.15	DMC 04 - Pressão e volume	111
A.16	DMC 04 - Vazão e Perdas estimadas	112

Lista de Tabelas

3.1	Caracterização geral das perdas	9
3.2	Causas dos vazamentos	11
3.3	Características dos vazamentos	13
4.1	Funções básicas da plataforma de desenvolvimento	36
4.2	Exemplo de armazenamento de volume no banco de dados	38
4.3	Exemplo de volume acumulado	39
4.4	Exemplo de cálculo da vazão	40
4.5	Componentes da vazão mínima noturna	44
4.6	Nós da rede fictícia	50
4.7	Trechos da rede fictícia	51
4.8	Dados do DMC 01	52
4.9	Dados do DMC 02	52
4.10	Dados do DMC 03	53
4.11	Dados do DMC 04	53
4.12	Especificações do Ologger GPRS	55
5.1	Resumo dos dados observados nos DMCs 01, 02, 03 e 04	62
5.2	Resumo dos dados de pressão da rede simulada	63

5.3	Resumo dos dados de volume da rede simulada	63
5.4	Resultados do teste de Kruskal-Wallis para os parâmetros da rede simulada	63
5.5	Resumo dos dados de pressão dos DMCs	65
5.6	Resumo dos dados de volume acumulado diário dos DMCs	65
5.7	Resumo dos dados de vazão dos DMCs	66
5.8	Volume total e volume de perdas nas redes simuladas	69
5.9	Resumo das perdas reais diárias estimadas para Rede 02	71
5.10	Resumo das perdas reais diárias estimadas para Rede 03	72
5.11	Resumo dos parâmetros de cálculo das perdas reais na Rede 02	72
5.12	Resumo dos parâmetros de cálculo das perdas reais na Rede 03	72
5.13	Resumo dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk para os volumes de perdas estimados	73
5.14	Indicadores de perdas calculados para os DMCs reais	75

Nomenclatura

ADERASA *Asociación de Entes Reguladores de Agua Potable y Saneamiento de las Américas*

DMC Distrito de Monitoramento e Controle

ERSAR Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos de Portugal

ETA Estação de Tratamento de Água

FND Fator Noite/Dia

IBNET *International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities*

IWA International Water Association

OfWat *Office of Water Services*

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento

VMN Vazão Mínima Noturna

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	5
2.1	Geral	5
2.2	Específicos	5
3	Revisão Bibliográfica	7
3.1	Introdução	7
3.2	Perdas em Sistemas de Abastecimento	7
3.2.1	Perdas Reais	10
3.2.2	Avaliação e Estimativa de Perdas	15
3.2.3	Indicadores de perdas	20
3.3	Sistemas de Suporte à Decisão - Novas tecnologias	22
3.3.1	Sistemas SCADA	22
3.3.2	Computação em Nuvem	25
4	Materiais e Métodos	29
4.1	Plataforma de desenvolvimento	30
4.1.1	Requisitos	30

4.1.2	Arquitetura	30
4.1.3	Desenvolvimento	32
4.2	Desenvolvimento dos Algoritmos	37
4.2.1	Somatória de Volume	37
4.2.2	Cálculo da Vazão	40
4.2.3	Continuidade no Abastecimento	41
4.2.4	Perdas Reais	43
4.3	Testes dos Algoritmos	47
4.3.1	Caracterização dos DMCs	47
4.3.2	Simulações na rede teste	54
4.3.3	Implantação dos sensores	54
4.3.4	Análise dos dados	57
5	Resultados e Discussão	59
5.1	Plataforma de Desenvolvimento	59
5.1.1	Desenvolvimento	59
5.1.2	Desempenho	60
5.2	Descrição dos Dados Coletados	62
5.2.1	DMC teste	62
5.2.2	DMCs Reais	63
5.3	Descrição dos Resultados dos Algoritmos	65
5.3.1	Cálculo da Vazão	65
5.3.2	Continuidade no Abastecimento	67
5.3.3	Perdas Reais	69
5.4	Discussão dos resultados	79

Sumário	xvii
6 Conclusões e Recomendações	85
Referências Bibliográficas	89
A Gráficos	95
A.1 DMC Teste	95
A.2 DMCs Reais	104

Capítulo 1

Introdução

A Lei 11.445/2007 define em seu Art. 3º que o saneamento básico é um conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de **abastecimento de água potável**, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Como abastecimento de água potável a Lei define as atividades, infraestruturas e instalações necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e respectivos instrumentos de medição (Brasil, 2007).

A disponibilidade de água potável de qualidade é um dos indicadores de desenvolvimento de uma sociedade, e influencia diretamente na qualidade de vida da população. Por ter caráter fundamental na saúde e ser de suma importância para toda população, seus serviços demandam grandes investimentos e complexas infraestruturas. Os vultuosos investimentos necessários para construção e operação dos sistemas de abastecimento provocam um **monopólio natural**, onde é economicamente inviável haver concorrência. Esta e outras falhas de mercado (como a obscuridade na divulgação de informações) funcionam como justificativa para causar justamente o contrário do que é necessário: um déficit de investimentos na melhoria e expansão dos sistemas.

Este déficit de investimentos é ressaltado ao analisar a atual situação do saneamento básico no país. A Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental divulga através de seu diagnóstico dos serviços de água e esgoto (SNSA, 2013) um panorama dos serviços de saneamento. Em 2011 o Brasil atingiu uma média nacional de 93% de atendimento por redes de água nas áreas urbanas. Apesar de ser um número considerável, ainda não garantimos a universalização do acesso à água potável, que exigiria algo próximo a 100% de cobertura. A falta de cobertura é mais evidente nas regiões Norte e Nordeste, com índices de atendimento com rede na área urbana de 67,9% e 89,4%, respectivamente (SNSA, 2013).

Outra face dos problemas encontrados está na deficiência de gestão dos sistemas de abastecimento, evidenciada pelos elevados índices de perdas na distribuição e perdas de faturamento. Perdas no sistema de abastecimento de água são um dos maiores problemas mundiais, não só na questão de volume perdido, que poderia ser utilizado para abastecer mais pessoas, quanto na questão da qualidade da água fornecida (Koelbl *et al.*, 2009). Perdas de água são um problema geral, que acontece em países desenvolvidos e em desenvolvimento (Thornton *et al.*, 2008). Em 2000 estimava-se taxas de perdas de 39% no continente Africano, 42% na Ásia e América Latina, e 15% na América do Norte ¹ (WHO, 2001). No Brasil, a média nacional do indicador IN₀₄₉ (Índice de perdas na distribuição) é de 38,8%, com as regiões Norte e Nordeste apresentando índices de aproximadamente 50% (SNSA, 2013). Muitos municípios não realizam nem a macromedição de seus sistemas, o que fica comprovado com a média do índice de macromedição (IN₀₁₁): 34,3%. É importante ressaltar ainda que as informações fornecidas ao Ministério das Cidades, para elaboração do SNIS, não passam por procedimentos de auditoria, podendo as companhias de abastecimento mascarar os indicadores com informações não condizentes com a realidade.

Encarar o desafio da universalização remonta não só à expansão dos sistemas, mas também na melhoria na gestão e operação dos já existentes, com a implantação de macromedidores, expansão da micromedição, monitoramento contínuo de parâmetros importantes na operação, como pressão, vazão, residual de cloro, turbidez, pH, consumo de energia elétrica, e parâmetros comerciais e financeiros.

¹a estimativa da América do Norte basea-se nos dados de apenas duas cidades

O monitoramento contínuo permite estimar com maior precisão os indicadores de desempenho, e tomar atitudes rápidas, prevenindo maiores problemas nos sistemas de abastecimento e melhorando a qualidade geral do serviço prestado. A redução das perdas representa não só economia financeira, mas também economia de recursos naturais e a redução da pressão nos recursos hídricos.

Este trabalho procura utilizar tecnologias e desenvolver algoritmos e metodologias que auxiliem na gestão, tratando os dados obtidos do monitoramento contínuo e aplicando inteligência, obtendo estimativas das perdas reais que ocorrem nos sistemas de abastecimento e outras informações importantes, tanto para operação dos sistemas quanto para os tomadores de decisão.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Geral

Desenvolver uma ferramenta computacional para avaliação de perdas reais em Distritos de Monitoramento e Controle (DMCs).

2.2 Específicos

- Definir a tecnologia para desenvolvimento do sistema;
- Desenvolver algoritmos específicos para tratamento e análise de dados coletados em campo;
- Realizar simulações computacionais com dados reais para análise dos parâmetros hidráulicos do DMC escolhido para teste;
- Implantar sistema em DMCs reais;
- Realizar análises de estimativa de perdas no DMC;

- Estimar e monitorar as perdas em DMCs reais.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

3.1 Introdução

Este capítulo de revisão bibliográfica problematiza as perdas em sistemas de abastecimento, com enfoque para caracterização das perdas reais. Na sequência apresentam-se estudos da literatura relevantes e relacionados aos objetivos do presente trabalho.

3.2 Perdas em Sistemas de Abastecimento

Os sistemas de abastecimento de água são complexos, geograficamente dispersos e compostos por diversos elementos, que precisam funcionar em harmonia para oferecer um serviço de qualidade para os usuários. Os componentes principais são: mananciais, captações, estações elevatórias, adutoras, estações de tratamento de água, reservatórios e redes de distribuição (Tsutiya, 2006). Cada um destes componentes apresenta características e problemas próprios, que influenciam em diferentes escalas na operação dos sistemas.

O caminho que a água percorre do manancial até o consumidor é longo, e nem toda água captada chegará até o destino final. Nos vários processos envolvidos sempre haverá uma pequena parcela de perdas, que em sua maioria são provenientes da operação ou infraestruturas deficientes, e da gestão comercial inadequada das companhias de saneamento (Kingdom *et al.*, 2006; Farley, 2001). Mas não é somente pela ineficiência e inadequação que as perdas ocorrem. A existência de tubulações enterradas pressurizadas e medidores de volumes ou vazões com graus de precisão inerente sempre levam a se trabalhar com um nível de perdas *aceitável*, sob o ponto de vista econômico e operacional (Kingdom *et al.*, 2006).

Companhias de saneamento ao redor do mundo não são muito eficientes ao utilizar água. Todo ano, em escala global, as companhias processam aproximadamente 48,6 bilhões de metros cúbicos de água, sem efetivamente cobrar os consumidores. Dois terços disto não chegam nem a ser entregue aos consumidores, sendo perdidos no caminho (Kingdom *et al.*, 2006).

As perdas nos sistemas de abastecimento podem estar relacionadas ao volume efetivamente perdido em vazamentos, extravazamentos ou processos relativos ao tratamento de água. Estas perdas representam o volume que não chega ao consumidor, sendo definidas como **Perdas Reais** (Kingdom *et al.*, 2006; Alegre *et al.*, 2004). Este tipo de perdas apresenta dois pontos críticos que devem ser levados em conta (Tsutiya, 2006; Boulos e AbouJaoude, 2011):

- Quanto menor o volume de perdas reais, menor é a pressão sobre os sistemas naturais para extração de água bruta;

- Na ocorrência de despressurização do sistema (sistemas intermitentes, comuns nos sistemas de abastecimento no Brasil), pode ocorrer a entrada de água contaminada do lençol freático nas tubulações, causando um problema de saúde pública ao servir água contaminada à população.

O volume que efetivamente chega ao consumidor e não é faturado, por falhas no cadastro comercial, fraudes, ligações clandestinas ou erros de medição dos hidrômetros e demais medidores, é chamado perda não física, ou como é denominado atualmente, **Perda Aparente** (Kingdom *et al.*, 2006; Alegre *et al.*, 2004).

Por não serem faturadas e efetivamente cobradas dos consumidores, tanto as perdas reais quanto as aparentes são contabilizadas pelas companhias, que incorporam nas tarifas os custos envolvidos no tratamento e distribuição da água. Na Tabela 3.1 há um quadro com um resumo da caracterização geral das perdas.

Tabela 3.1: Caracterização geral das perdas (Fonte: Tsutiya (2006))

Item	Características principais	
	Perdas reais	Perdas Aparentes
Tipo de ocorrência mais comum	• Vazamento	• Erro de Medição
Custos associados ao volume de água perdido	• Custos de produção da água tratada	• Valor cobrado no varejo ao consumidor
Efeito no meio ambiente	• Desperdício de recursos naturais • Maiores impactos ambientais devido à necessidade de ampliação da exploração dos mananciais	• Não é relevante
Efeito na saúde pública	• Riscos de contaminação	• Não é relevante
Ponto de vista empresarial	• Perda de produto <i>industrializado</i>	• Perda elevada de receita
Ponto de vista do consumidor	• Imagem negativa da empresa, associada ao desperdício e ineficiência	• Não é uma preocupação imediata
Efeitos finais no consumidor	• Repasse de custos à tarifa • Desincentivo ao uso racional da água	• Repasse de custos à tarifa • Incitamento ao roubo e fraudes

Kingdom *et al.* (2006) apontam alguns benefícios motivadores para a redução nas perdas em sistemas de abastecimento:

- Uma grande parcela de água **já tratada** passa a ser disponibilizada para os consumidores;
- Sem demandar maior pressão sobre os recursos hídricos, uma maior quantidade de pessoas poderia ser abastecida;
- As companhias de saneamento aumentariam consideravelmente seu faturamento, sem precisar recorrer à empréstimos;
- O uso racional da água seria incentivado nos consumidores, que denunciariam ligações ilegais ou fraudes nos medidores;
- O serviço prestado aos consumidores seria de melhor qualidade;
- Novas oportunidades de negócio e novos empregos seriam criados para atender as demandas de redução de perdas nas companhias.

3.2.1 Perdas Reais

Ocorrência

Os vazamentos físicos muitas vezes são graves, podendo acontecer durante meses ou anos sem que sejam detectados. Ocorrem em todas as etapas dos sistemas de distribuição de água, especialmente nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), nas tubulações de adução e de distribuição, nos ramais, cavaletes, reservatórios e equipamentos das estações elevatórias, dependendo das características dos materiais e dos procedimentos adotados pela companhia para busca e reparo dos vazamentos (Farley, 2001). Na Tabela 3.2 são apresentadas as principais causas dos vazamentos.

Tabela 3.2: Causas dos vazamentos (Fonte: Tsutiya (2006))

	Causas Internas	Causas Externas
Bombas	<ul style="list-style-type: none"> • Desgastes das gaxetas • Ajustes inadequados nos registros, válvulas e juntas • Pressões elevadas 	
Reservatórios	<ul style="list-style-type: none"> • Má qualidade dos materiais • Má execução da obra • Envelhecimento dos materiais 	
Tubulações	<p>Material</p> <ul style="list-style-type: none"> • Má qualidade dos materiais • Corrosão • Envelhecimento <p>Execução</p> <ul style="list-style-type: none"> • Projeto inadequado • Assentamento inadequado • Encaixes inadequados • Corrosão <p>Operação</p> <ul style="list-style-type: none"> • Golpe de aríete • Pressão alta • Qualidade da água (corrosão interna) 	<p>Ambiente</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carga de tráfego • Agressividade do solo (corrosão externa) • Poluição do solo <p>Desastres naturais</p> <ul style="list-style-type: none"> • Movimentos de terra ocasionados por obras • Deslizamentos • Movimentos sísmicos

As redes de distribuição e os ramais prediais são as partes do sistema onde ocorrem o maior número de vazamentos, devido a sua extensão e condições de implantação (Farley, 2001; Kingdom *et al.*, 2006; Morrison *et al.*, 2007).

É consenso que para cada sistema de distribuição, em função das características de construção, materiais utilizados e condições operacionais, exista uma ocorrência natural de vazamentos (Girol, 2008; Mutikanga *et al.*, 2013; Farley, 2001).

Classificação dos Vazamentos

Os vazamentos nos sistemas de abastecimento podem ser visíveis ou não visíveis. Os visíveis são facilmente detectados; em bombas ou tubulações expostas a existência de vazamentos é notada com simples inspeção visual. Em tubulações ou estruturas enterradas, o vazamento precisa aflorar para ser notado (Farley, 2001; Kingdom *et al.*, 2006).

Os vazamentos não visíveis exigem equipamentos e técnicas especiais para serem detectados sem aguardar os afloramentos. Se não se tornarem visíveis pelo afloramento, muitos vazamentos podem permanecer durante longos períodos de tempo, desperdiçando grandes volumes de água. Nem todos os vazamentos não visíveis são detectáveis pelas tecnologias usuais de pesquisa, que utilizam princípios de acústica para detectar anomalias nas redes. Em situações com vazões mínimas de vazamento, baixo nível de ruído ou pressões reduzidas no abastecimento, as técnicas acústicas não detectam com eficiência os vazamentos. É possível detectá-los com outras técnicas e metodologias, mas o custo/benefício destes procedimentos impede sua aplicação em larga escala pelas companhias de saneamento. A proporção entre vazamentos visíveis e não visíveis é função das características de cada sistema de abastecimento (Tsutiya, 2006; Kingdom *et al.*, 2006).

Estes vazamentos não visíveis e de difícil detecção são denominados *vazamentos inerentes* no setor de saneamento, e suas vazões em geral são inferiores a 0,25 m³/h (Lambert e Hirner, 2000; Morrison *et al.*, 2007). A Tabela 3.3 sintetiza as características dos tipos de vazamentos descritos.

Tabela 3.3: Características dos tipos de vazamentos (Fonte: Tsutiya (2006))

Tipos de vazamento	Características
Inerente	Vazamento não visível, não detectável, baixas vazões, longa duração
Não visível	Detectável, vazões moderadas, duração depende da frequência da pesquisa de vazamentos
Visível	Aflorante, altas vazões, curta duração

Duração dos Vazamentos

O tempo de duração do vazamento é o intervalo compreendido entre o surgimento do vazamento, e sua interrupção por uma equipe de manutenção. Em redes de distribuição de água a duração média é resultado da soma de três fases (Farley, 2001):

- **Conhecimento:** tempo médio entre início e detecção do vazamento pela companhia;
- **Localização:** tempo médio entre a detecção do vazamento e a localização exata do ponto onde ocorre;
- **Reparo:** tempo médio entre a localização e a efetiva resolução do vazamento.

Relação entre Pressão e os Vazamentos

A pressão de serviço na rede de distribuição é o parâmetro com mais influência nos vazamentos e na frequência de sua ocorrência. Dois fatores relacionados com a pressão de serviço influenciam na quantificação das perdas: aumento dos arrebentamentos nas tubulações e incremento na vazão dos vazamentos (Gopan *et al.*, 2010; Strum e Thorton, 2005). O aumento dos arrebentamentos se dá pelo estresse do material da tubulação, sujeito as variações de pressão na rede, ou por pressões acima do limite especificado pelo fabricante.

Quanto a relação entre pressão e vazão, em orifícios que não variam de tamanho com alteração da pressão (por exemplo em furos provocados pela corrosão em tubulação de ferro fundido) a aplicação das equações da Hidráulica demonstra que os vazamentos se comportam com relação quadrática à pressão. Nos demais casos de orifícios que variam conforme a pressão, estudos apontam que a relação entre pressão e vazão não é quadrática como nos orifícios de seção constante (Gopan *et al.*, 2010).

Algumas redes de distribuição, e especialmente os ramais, são de materiais plásticos como o Polietileno ou PVC. Nestes materiais, orifícios, rachaduras ou trincas tem suas aberturas variando conforme a pressão. Assim, quanto maior a pressão, maior a área do furo e maior é a vazão perdida no vazamento (Gopan *et al.*, 2010).

A Equação 3.1 relaciona a vazão na rede com a pressão (Morrison *et al.*, 2007).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_1} \quad (3.1)$$

onde: Q_0 = vazão inicial à pressão P_0 ; Q_1 = vazão final à pressão P_1 ; N_1 = expoente que depende do tipo de material dos tubos.

O valor de N_1 é específico para cada sistema, determinado a partir de ensaio em campo, realizado no horário de ocorrência da vazão mínima noturna, baseado na variação da vazão de entrada enquanto monitora-se a pressão média do setor (Tabesh *et al.*, 2009; García *et al.*, 2006).

Ensaio realizados em diversos países chegaram aos seguintes valores para N_1 (Tsu-tiya, 2006; Morrison *et al.*, 2007; García *et al.*, 2006):

- Tubos metálicos: $N_1 = 0,5$
- Tubos plásticos: N_1 entre 1,5 e 2,5

- Vazamentos inerentes: $N_1 \cong 1,5$

Em sistemas mistos, onde há redes de diferentes materiais (caso mais comum), os ensaios de campo mostraram que os valores do expoente N_1 são próximos a 1,15 (García *et al.*, 2006; Morrison *et al.*, 2007).

No Brasil, Girol (2008) encontrou valores de N_1 entre 1,23 e 1,74 em setores de abastecimento no município de Capinzal, SC. Vieira e Carozzi (2005) determinaram os valores de N_1 em diversos sistemas da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, encontrando valores entre 0,61 e 2,45.

3.2.2 Avaliação e Estimativa de Perdas

A metodologia para dimensionamento, execução e acompanhamento das perdas em DMCs é descrita por Morrison *et al.* (2007) e Farley (2001), como o processo de selecionar as regiões ideais, onde seja possível isolar a rede e monitorar todos os pontos de entrada e saída da água, seguindo os critérios que influenciam na estimativa de perdas.

Strum e Thorton (2005) avaliaram as metodologias para redução de perdas, com o objetivo de selecionar as mais adequadas para a realidade Norte Americana. Identificaram que o monitoramento contínuo dos sistemas (em especial dos DMCs) é uma das mais efetivas maneiras de reduzir as perdas, pois o monitoramento contínuo das vazões mínimas noturnas auxilia na rápida identificação de vazamentos, assim como também produz dados que podem ser utilizados para localizá-los. Os autores também ressaltam a importância do controle de pressões nos sistemas, pois contribuem em dois pontos: na redução da frequência de rompimentos e para reduzir a vazão das perdas inerentes (não detectáveis). Consideram que a redução na pressão é a única estratégia de gestão de perdas capaz de reduzir as perdas inerentes, com exceção da reabilitação da infraestrutura.

Mutikanga *et al.* (2013) realizaram uma revisão com as metodologias e práticas utilizadas para gestão de perdas, com estado da arte dos métodos e ferramentas aplicadas para gestão de perdas, enumerando métodos para quantificar, monitorar e controlar tanto perdas reais quanto aparentes. As ferramentas e métodos identificados incluem balanço hídrico (ou auditoria da água), distritos de monitoramento e controle (DMCs), análise das vazões mínimas noturnas, análise hidráulica dos vazamentos, análise estatística das vazões, métodos acústicos, transientes hidráulicos, controle de pressão, gestão de ativos de rede, técnicas de otimização, incluindo otimização multiobjetivo, análise decisória multicritério, monitoramento e detecção *online*, técnicas de *benchmarking*, como indicadores de desempenho, e análise por envoltória de dados. Nas tecnologias de monitoramento *online*, os autores destacaram a utilização de Redes Neurais Artificiais, modelos Bayseanos e filtros de Kalman para dar rápidas respostas ao acontecerem anomalias nas redes de distribuição.

Jankovic-Nisic *et al.* (2004) procuraram uma abordagem mais sistemática para orientar a aquisição dos dados de DMCs, utilizando um modelo hidráulico do Epanet e o método de Monte Carlo para simular o consumo doméstico. A análise dos resultados mostrou que os medidores de vazão devem ser instalados nas tubulações com maior variação na vazão, para que as mudanças bruscas possam ser detectáveis. Recomendam DMCs com aproximadamente 250 unidades consumidoras.

Girol (2008) utilizou a metodologia das Vazões Mínimas Noturnas (VMNs) e o software Epanet Calibrator para estimar as perdas reais em um setor de abastecimento de Capinzal, Santa Catarina. Realizando campanhas de campo, determinou um expoente N_1 entre 1,54 e 1,74. Em suas conclusões, apresenta que o método das VMNs permite aferir satisfatoriamente as perdas reais no sistema.

Hunaidi e Brothers (2007) fizeram medições de VMNs em dois DMCs temporários em Ottawa, Canadá. Encontraram que as VMNs ocorrem geralmente entre 1:00 e 3:00, ou 1:30 e 3:30. Aplicando o método das VMNs conseguiram estimar as perdas reais nos DMCs.

Peters e Ben-Ephraim (2012) utilizaram a metodologia das VMNs para estimar os vazamentos em um DMC localizado na República Cooperativa da Guiana. Os autores evidenciam que apesar da estimativa das perdas reais funcionar em países desenvolvidos, nos países em desenvolvimento são necessárias adaptações na aplicação das metodologias para levar em conta fatores como baixas densidades de ligações por quilômetro de rede, baixas pressões de abastecimento, diâmetros menores nas tubulações, clima e tipos de solos diferentes, que podem influenciar na acurácia da estimativa. Também encontraram que a utilização de reservatórios pelos usuários pode prejudicar a estimativa da vazão mínima noturna, recomendando que as VMNs obtidas nessas situações devem ser utilizadas com cautela, podendo estimar valores superiores do que realmente é perda real.

Karadirek *et al.* (2012) realizaram estudo em 18 DMCs na cidade de Antalya, na Turquia, para controle de perdas. Utilizando um sistema SCADA, monitoraram o nível de reservatórios, vazões e pressões no sistema, gerando um modelo hidráulico calibrado para cada DMC. Analisando as simulações hidráulicas notaram que em alguns DMCs as pressões médias e as VMNs eram elevadas durante o ano. Também calcularam o Índice Infra-Estrutural de Perdas, que indicou a existência de perdas elevadas. Procedendo com o estudo, instalaram uma válvula redutora de pressão em um dos DMCs, reduzindo a pressão e também consideravelmente as perdas. Utilizaram os modelos hidráulicos para prever qual seria a redução nas perdas se prosseguissem com a instalação de PRVs nos outros DMCs, encontrando valores favoráveis à ação. Destaca-se que na cidade do estudo todo o consumo é micromedido, o que facilita no cálculo do balanço hídrico, e acredita-se não existir uso de água não autorizado.

García *et al.* (2006) analisaram as incertezas existentes na utilização da metodologia das VMNs. Em primeiro ponto há incerteza pois a estimativa da parcela que é devida realmente ao consumo já carrega suposições, que podem não ser verdadeiras. Outra fonte de incerteza é que após obtida a vazão mínima noturna é feita uma extrapolação desse valor, que é instantâneo, para o dia inteiro. Concluíram que apesar das incertezas, os volumes estimados pelo método são importantes para comparação entre vários distritos, e que a determinação do Fator Noite/Dia pode servir como indicador de quanta água pode ser economizada com a implantação do controle de pressões.

Gomes *et al.* (2011) realizaram simulações hidráulicas para estimar os benefícios do controle de pressão nos sistemas de abastecimento, utilizando a metodologia das VMNs como um dos parâmetros para análise, e simulando as perdas utilizando os coeficientes dos emissores no EPANET.

Nazif *et al.* (2010) desenvolveram uma aplicação utilizando algoritmos genéticos e Redes Neurais Artificiais para minimizar as perdas em um sistema de abastecimento em Tehran, Irã. Utilizaram como funções para estimar as perdas os coeficientes de emissores no EPANET, e como resultado a aplicação produzia as melhores alternativas para os níveis nos reservatórios utilizados para o abastecimento.

Boulos e AbouJaoude (2011) descrevem uma metodologia para estimativa de perdas com a análise das vazões combinadas com a modelagem hidráulica. Sensores de vazão são instalados em determinados pontos do sistema, e a comparação na diferença das vazões medidas em campo com a modelagem hidráulica permite estimar as perdas.

Buchberger e Nadimpalli (2004) realizaram análise estatística de dados de alta resolução (intervalo de 1 segundo para captura dos dados) em redes com perdas simuladas, concluindo que é possível inferir as perdas dos dados de vazão. Entretanto, dados com esta resolução temporal são raramente produzidos pelas companhias, e a análise depende da criação de DMCs pequenos, com menos de 1000 residências, para ter sensibilidade suficiente.

Palau *et al.* (2012) apontam que as novas tecnologias utilizadas pelas companhias de saneamento para controle em tempo real estão produzindo uma grande quantidade de dados, que precisam ser processados, analisados e transformados em informações úteis para os tomadores de decisão. No trabalho utilizam análise de componentes principais para reduzir a quantidade de dados captados, mantendo estatisticamente a sensibilidade das informações apresentadas.

3.2.3 Indicadores de perdas

Os indicadores de desempenho são utilizados em várias aplicações para monitorar e analisar a situação das companhias de abastecimento, em todos os seus aspectos, sejam financeiros, operacionais ou sociais (Alegre *et al.*, 2006). Existem diversos sistemas de indicadores de performance, com destaque para os sistemas de indicadores da IWA, ERSAR, OfWat, ADERASA, IBNET e nacionalmente o SNIS (Alegre *et al.*, 2006).

Dentre os diversos sistemas de indicadores e indicadores existentes, destacam-se os seguintes para utilização neste trabalho:

Indicador Percentual

O indicador percentual é o mais fácil de compreender, relacionando o volume total perdido com o volume total produzido ou disponibilizado no sistema, em bases anuais (SNSA, 2013; Alegre *et al.*, 2004). Sua expressão básica é dada na Equação 3.2.

$$\text{Índice de Perdas} = \mathbf{IP} = \frac{\text{Volume Perdido Total}}{\text{Volume Fornecido}} \times 100(\%) \quad (3.2)$$

No SNIS é conhecido como **Índice de Perdas na Distribuição**, utilizando o código IN₀₄₉. Para a Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos de Portugal (ERSAR) é conhecido como **Perdas aparentes por volume de água entrada no sistema**, utilizando o código Op26.

Índice de Perdas por Ramal

O índice de perdas por ramal mede o volume perdido de água em cada ramal do DMC. Focado nas perdas de cada ramal, este indicador depende da densidade de ramais no sistema (Farley, 2001; SNSA, 2013; Alegre *et al.*, 2004). Sua expressão básica é dada na Equação 3.3

$$\text{Índice de Perdas por Ramal} = \frac{\text{Volume Perdido Anual}}{\text{N}^\circ \text{ de Ramais} \times 365} (m^3/\text{ramal.dia}) \quad (3.3)$$

Por tender a apresentar valores elevados em sistemas com poucos ramais, seu uso é recomendado em casos em que a densidade de ramais for superior a 20 ramais/km, valor comum em áreas urbanas (Alegre *et al.*, 2004).

No SNIS é conhecido como **Índice de Perdas por Ligação**, utilizando o código IN₀₅₁ e a unidade $(L/dia)/ligação$. Na ERSAR é conhecido como **Perdas de água por ramal**, utilizando o código Op23 e a unidade $m^3/ramal/ano$.

Índice de Perdas por Extensão de Rede

Este indicador mede o volume de perdas por unidade de extensão de rede (SNSA, 2013; Alegre *et al.*, 2004). Sua expressão básica é dada na Equação 3.4.

$$\text{Índice de Perdas por Extensão de Rede} = \frac{\text{Volume Perdido Anual}}{\text{Extensão da Rede} \times 365} (m^3/km.dia) \quad (3.4)$$

Em sistemas com elevada densidade de ramais este indicador costuma apresentar valores acentuados para cada km. Por isso recomenda-se utilizá-lo em sistemas com densidade abaixo de 20 ramais/km (Alegre *et al.*, 2004).

No SNIS é conhecido como **Índice Bruto de Perdas Lineares**, código IN₀₅₀ e unidade $m^3/(dia.km)$. Na ERSAR é conhecido como **Perdas de água por comprimento de conduta**, código Op24 e unidade $m^3/km/dia$

3.3 Sistemas de Suporte à Decisão - Novas tecnologias

3.3.1 Sistemas SCADA

Nas últimas décadas a evolução na capacidade de processamento e do custo/benefício de sistemas eletrônicos influenciou todas as áreas do conhecimento humano, em especial no controle de sistemas industriais.

Inicialmente o controle dos processos produtivos em indústrias (como é o caso da indústria da água ou companhias de saneamento) era feito mecanicamente, com ativação manual ou hidráulica. Quando os primeiros componentes eletrônicos (válvulas, relês, transdutores) se tornaram populares, substituíram o controle mecânico, mas eram muito grandes, ocupando grande espaço e consumindo quilômetros de fios, tanto para comunicação quanto internamente. Com a invenção dos circuitos eletrônicos e microprocessadores os controladores digitais passaram a substituir os analógicos, representando grande vantagem sobre os anteriores, demandando menor capacidade de componentes, e tendo maior capacidade de processamento e controle. A mudança para controladores digitais provocou a criação de novos protocolos de comunicação, evoluindo para o que encontramos hoje, onde as redes para controle industrial são muito semelhantes às redes de comunicação internas de escritórios e residências, mas com requisitos e comportamentos específicos (Galloway e Hancke, 2013).

Redes de controle industrial são definidas como a implementação de protocolos de comunicação entre o campo e equipamentos, controladores digitais, vários softwares e também outros sistemas externos. A diferença essencial entre redes industriais e redes comerciais (utilizadas em escritórios e residências) é na sua aplicação. Redes industriais estão conectadas a equipamentos físicos, e são utilizadas para controlar ou monitorar ações e condições reais. Essa diferença leva a diferentes requisitos, como robustez, qualidade dos dados, tolerância a falhas e confiabilidade para as redes industriais (Galloway e Hancke, 2013).

Redes industriais são compostas por aplicações e componentes específicos, como Controladores Lógico-Programáveis¹, Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados - SCADA², e Sistemas Digitais de Controle Distribuído - SDCD³ (Galloway e Hancke, 2013).

Controladores Lógico-Programáveis são componentes eletrônicos, digitais, que formam a base das redes de controle industrial. São facilmente programáveis e reprogramáveis, de fácil manutenção, tamanho pequeno, mais baratos do que os circuitos de relês que substituíram, capazes de se comunicar com sistemas centrais de coleta de dados e controlar e obter dados tanto de equipamentos digitais quanto analógicos (Galloway e Hancke, 2013).

Sistemas SCADA são puramente uma camada de software, normalmente aplicada um nível acima dos hardwares de controle (geralmente de Controladores Lógico Programáveis). Sistemas SCADA não realizam nenhum controle, mas sim supervisionam os outros sistemas (Daneels e Salter, 1999). O foco de um SCADA é adquirir dados e apresentá-los em uma Interface Homem-Máquina, porém pode também enviar comandos para o hardware de controle, por exemplo uma instrução para ligar ou desligar determinado motor (Galloway e Hancke, 2013)

Os sistemas SCADA são utilizados nos processos industriais mais comuns, como metalurgia, geração e distribuição de energia, indústria química, etc (Daneels e Salter, 1999).

¹Do inglês *Programmable Logic Controller* - PLC

²Do inglês *Supervisory Control and Data Aquisition* - SCADA

³Do inglês *Distributed Control System* - DCS)

Segundo Galloway e Hancke (2013) os Sistemas SCADA são baseados em eventos, podem ser utilizados grandes áreas geográficas, são focados para utilização em vários sistemas independentes que se comunicam entre si, podem operar com baixa qualidade dos dados e se comunicam com hardwares de baixo consumo de energia.

Sistemas SCADA são geralmente compostos de duas camadas de aplicação, uma cliente e outra servidor. Na camada cliente é apresentada a Interface Homem-Máquina, e na camada servidor ficam os processos para receber os dados e enviar comandos para outros servidores ou diretamente aos equipamentos no campo. Além das camadas cliente e servidor, sistemas SCADA atuais também contam com outras camadas adicionais, focadas nas necessidades de cada aplicação, como por exemplo uma camada para exportação de dados, uma camada para controle automático de processos, camada para gerenciamento de alarmes e eventos ou camada de segurança (Galloway e Hancke, 2013; Daneels e Salter, 1999)

Muitas companhias de saneamento controlam seus serviços, tanto na captação, tratamento ou distribuição de água, utilizando sistemas SCADA (Tsutiya, 2006). Seu uso vem sendo ampliado, não só em companhias de abastecimento de água, como em outras indústrias de serviços essenciais (Groves e Azagra, 2012).

3.3.2 Computação em Nuvem

A definição de *cloud computing* foi discutida por Vaquero *et al.* (2008), em uma tradução livre para o português:

"Computação em nuvem é um conjunto de recursos virtualizados (como hardware, plataformas ou serviços de desenvolvimento). Esses recursos podem ser dinamicamente reconfigurados para se ajustarem a carga de trabalho (escalabilidade), permitindo também maximizar o uso dos recursos. Este conjunto de recursos é normalmente oferecido em um modelo de uso *pague o que usar* onde as garantias de funcionamento são oferecidas pelo provedor de infraestrutura."

Os primeiros computadores utilizavam uma topologia de rede em que todo o processamento era realizado por um computador central, e os usuários trabalhavam em terminais, acessando remotamente os recursos do servidor. Esta topologia foi revertida com a evolução dos computadores pessoais, que se tornaram capazes de armazenar e processar sozinhos as informações necessárias para os usuários (Hayes, 2008).

A maior rede de computadores, a Internet, retomou a ideia de um processamento central. Mas agora não dependente de uma única máquina, mas sim de milhares, em vários locais do mundo. Essa topologia é conhecida por vários nomes, principalmente por *cloud computing*, *on-demand computing*, *software as a service* ou *Internet as a platform* (Hayes, 2008).

A computação em nuvem reduz os investimentos em equipamentos locais, valendo-se de contratos semelhantes a um aluguel das máquinas em nuvem. As empresas pagam apenas o que é utilizado, podendo escalar (crescer) suas aplicações imediatamente. A infraestrutura para computação em nuvem é oferecida por preços competitivos por empresas como a Amazon, IBM, Google e Microsoft (Hayes, 2008). O conceito de computação em nuvem remonta os mesmos conceitos dos serviços de água, eletricidade e gás, onde as necessidades do usuário são fornecidas conforme sua demanda (Wu e Khaliefa, 2012).

Infelizmente os sistemas utilizados atualmente pela maioria das companhias de abastecimento não tem poder de processamento suficiente para gerar informações em uma escala de tempo que seja benéfica para os usuários e para as próprias companhias, como informar em tempo real o consumo de cada residência. A utilização da computação em nuvem pode oferecer este poder, permitindo que sejam feitas análises mais rápidas para identificação das perdas de água, por exemplo (Symmonds e Hill, 2013).

Companhias de abastecimento de água tipicamente são mais lentas na adoção de novas tecnologias, se comparadas às outras áreas, como eletricidade, gás e telecomunicações. Com o avanço da tecnologia, em sistemas SCADA ou computação em nuvem, estas empresas estão melhorando suas habilidades para armazenar e analisar grandes volumes de dados, enquanto os custos dessas habilidades são substancialmente reduzidos. O uso desses dados tem impacto direto na redução do consumo de água, gerando benefícios para a companhia, que não precisa explorar maiores quantidades de água, que se torna uma atividade cada vez mais cara, e também promove benefícios para o consumidor na redução das tarifas e reeducação ao consumir (Symmonds e Hill, 2013).

Em aspectos mais técnicos e práticos, o poder da computação em nuvem permite desenvolver novas tecnologias, antes limitadas pelo poder de processamento, como otimizações dos projetos, redes e procedimentos operacionais. Wu e Khaliefa (2012) desenvolveram um sistema de alta performance para otimização de sistemas de distribuição, aplicado ao controle de bombeamento, que permitiria a análise dos melhores procedimentos em tempo próximo ao real. Alonso *et al.* (2000) apresentaram um sistema de computação paralela para simulação e redução de perdas em uma rede de abastecimento, elevando o grau de detalhamento das análises e realizando simulações de longa duração, necessárias para avaliação de problemas de qualidade na água.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

Neste capítulo apresenta-se as etapas seguidas e as metodologias para que os objetivos deste trabalho fossem alcançados. Para isso, estruturamos um ambiente e uma plataforma para obter, armazenar, processar e exibir os dados e indicadores dos DMCs, realizando as seguintes etapas:

1. Descrição da tecnologia adotada para plataforma de desenvolvimento;
2. Descrição dos algoritmos utilizados;
3. Definição de um DMC para testes;
4. Simulação hidráulica com alteração de vários parâmetros do DMC teste;
5. Obtenção de dados em DMCs reais;
6. Testes da plataforma;
7. Análise dos dados obtidos.

4.1 Plataforma de desenvolvimento

4.1.1 Requisitos

Um sistema para análise dos dados em tempo real de sistemas de abastecimento deve ser confiável e robusto para auxiliar a gestão operacional. Deve manter-se *online* 24 horas por dia, 7 dias por semana, recebendo sem falhas as informações enviadas por equipamentos e sistemas SCADA. A sua memória precisa ser expansiva, capaz de armazenar longos períodos de dados, possibilitar comparações históricas, e ser redundante, fazendo cópias de segurança periódicas (*backups*) das informações armazenadas. O sistema deve manter velocidade de processamento elevada, capaz de executar os algoritmos de análise na mesma velocidade de recebimento dos dados.

Além destes requisitos, anteriormente à sua implementação em produção, a plataforma deve permitir rápido desenvolvimento e avaliação dos algoritmos, assim como liberdade para programação destes em várias linguagens de programação.

A interface com o usuário deve ser acessível via navegador web, preferencialmente com suporte para dispositivos móveis como celulares e *tablets*, que permitirão uso do sistema e visualização dos dados até por equipes em campo.

4.1.2 Arquitetura

Para desenvolvimento do trabalho atendendo aos requisitos estabelecidos neste projeto, definiu-se uma arquitetura de sistema baseada em computação em nuvem, que pode garantir os requisitos de velocidade, escalabilidade e capacidade de processamento, com um custo baixo. Para atender os demais requisitos, arquitetou-se uma plataforma de desenvolvimento modular, conforme apresentado na Figura 4.1, onde:

- Módulo **Coletor**: recebe os dados dos equipamentos e sistemas SCADA;
- Módulo **Banco de Dados**: armazena os dados dos equipamentos e resultados dos algoritmos;
- Módulo **Aplicativos Inteligentes**: aplica os algoritmos nos dados armazenados no Banco de Dados, retornando os resultados;
- Módulo **Interface de Usuário**: exibe as informações ao usuário através de uma interface web.

Na Figura 4.1 há uma representação visual da arquitetura definida.

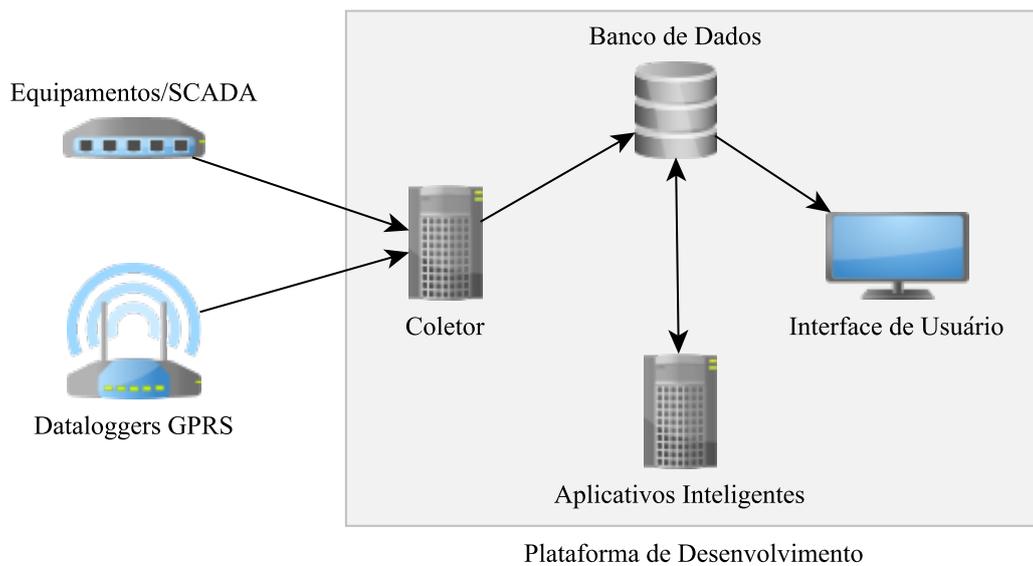


Figura 4.1: Arquitetura da Plataforma de Desenvolvimento

4.1.3 Desenvolvimento

Para desenvolvimento da plataforma foi escolhida a plataforma para computação em nuvem Amazon Web Services. Cada módulo da plataforma foi alocado em uma instância ¹ separada. Todas as instâncias foram iniciadas com o sistema operacional Linux, distribuição Ubuntu versão 12.04 LTS.

Módulo Coletor

O Coletor de dados da plataforma atua em duas etapas. A primeira é passiva, aguardando que os equipamentos (*dataloggers* GPRS) enviem seus dados para o coletor, e a segunda é ativa, buscando os dados de um sistema comercial ou de um sistema SCADA.

Para a primeira etapa é necessário ter alta disponibilidade e capacidade de receber muitas requisições simultaneamente. Para atender estes requisitos adotou-se o *framework* **node.js**, que segundo Tilkov e Vinoski (2010), é baseado em um modelo assíncrono de entrada e saída, orientado à eventos.

Os servidores convencionais usam uma abordagem de multiprocessos para lidar com requisições múltiplas. Exemplificando, para receber os dados de 20 equipamentos, seria necessário manter em execução 20 processos diferentes do mesmo aplicativo, alocando e dividindo as requisições entre os processos conforme elas fossem realizadas. Se um 21º equipamento tentasse enviar os dados, teria sua requisição recusada pois todos os processos estariam ocupados. Estes processos mesmo não sendo utilizados, continuariam a consumir memória e processamento do servidor.

¹Cada instância é equivalente a uma máquina física, com armazenamento, memória e processamento independentes, mas executada em um ambiente em nuvem.

O *framework* node.js utiliza uma abordagem diferente dos multiprocessos, baseada em eventos. Para cada nova requisição é iniciado um novo *evento*, que irá ser executado independentemente dos outros até sua conclusão. Por exemplo, cada novo equipamento que faça uma requisição irá iniciar um novo evento, que continuará sua execução independentemente até sua conclusão. Nesta situação, o número de eventos máximos não é mais determinado pelo número de processos executados, mas sim pela memória disponível no servidor.

O princípio de funcionamento do aplicativo desenvolvido é apresentado na Figura 4.2.

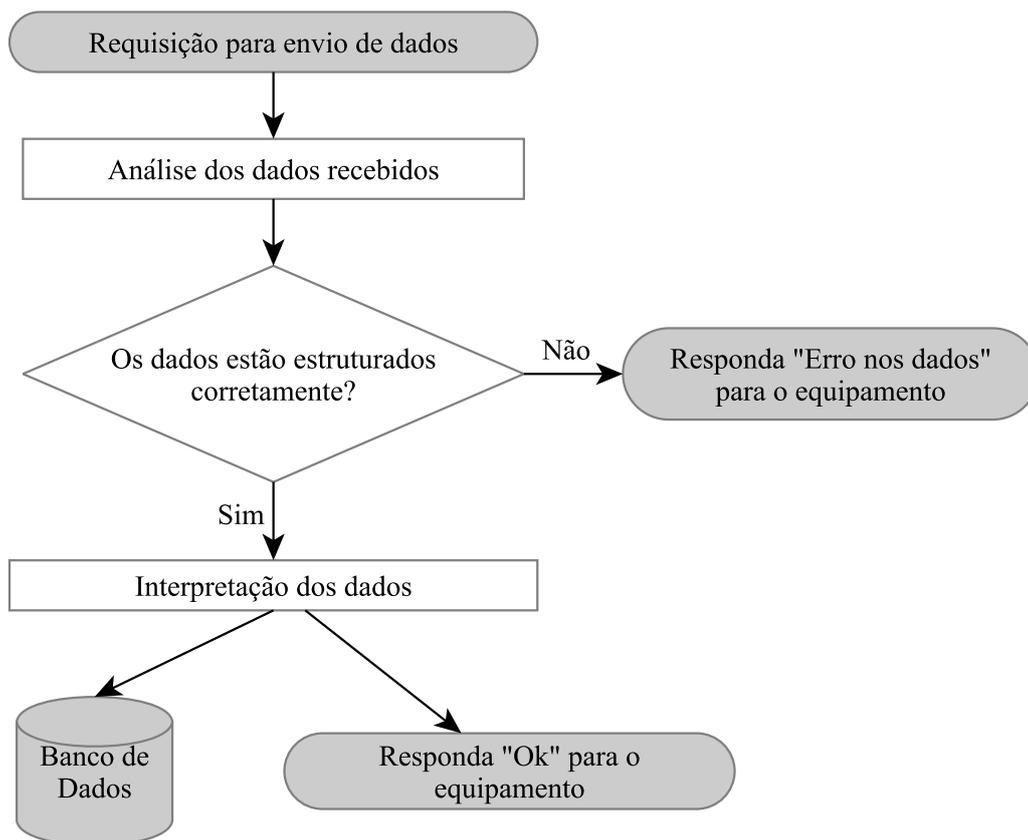


Figura 4.2: Fluxograma do Módulo Coletor

Ao realizar uma requisição para envio de dados, o coletor analisa se o pacote de dados enviado está estruturado de maneira correta. Caso negativo, retornará uma mensagem de erro para o equipamento. Se os dados estiverem na estrutura correta, o coletor irá interpretar os dados, enviá-los para armazenamento no banco de dados e enviar uma mensagem de sucesso para o equipamento.

Os equipamentos coletores de dados utilizados neste trabalho, especificados na Seção 4.3.3, enviam dados em pares Data/Hora-Valor, para cada medida realizada.

Módulo Banco de Dados

O software de banco de dados escolhido foi o MySQL *Community Edition* (MySQL, 2000). Nesta versão gratuita, o MySQL é um aplicativo para banco de dados robusto e de simples configuração. Foram definidas quatro tabelas para armazenamento dos dados:

- Locais: armazena as informações dos locais onde os equipamentos estão instalados, ou descrição da fonte dos dados;
- Equipamentos: armazena as informações dos equipamentos, local onde está instalado ou fonte dos dados;
- Sensores: armazena as informações de cada sensor dos equipamentos, ou nomes das variáveis retiradas de sistemas comerciais/SCADA;
- Medidas: armazena data e valor de cada medida coletada.

Na Figura 4.3 está o diagrama do modelo de dados utilizado na plataforma.

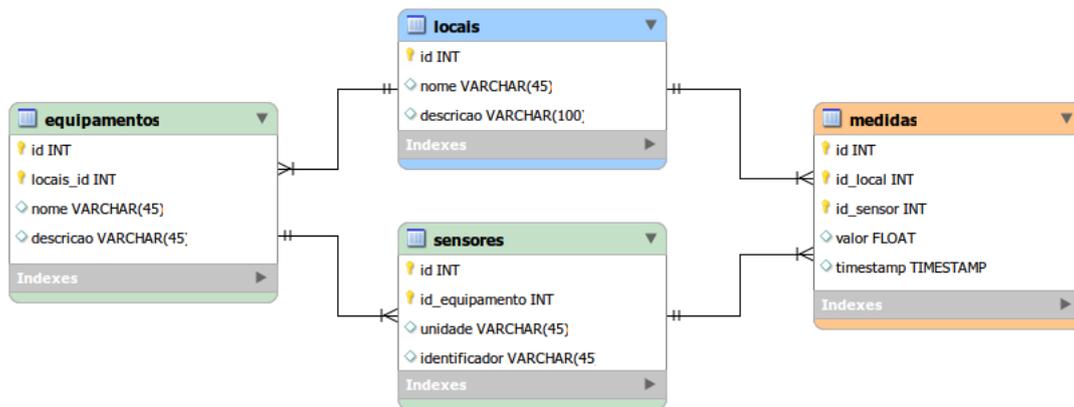


Figura 4.3: Modelo de Dados

Módulo Aplicativos Inteligentes

A linguagem de programação e ambiente para desenvolvimento dos algoritmos foi a linguagem R (R Core Team, 2013). Escolheu-se esta linguagem devido a sua orientação para cálculos estatísticos e geração de gráficos, facilidade e agilidade para cálculos com tabelas e matrizes, e grande biblioteca de pacotes de expansão, que podem ser instalados sob demanda. Como exemplo dessa possibilidade de expansão, utilizamos o pacote RMySQL (James e DebRoy, 2012), que provê a interface entre a linguagem R e o banco de dados MySQL do Módulo Banco de Dados.

Os algoritmos desenvolvidos em R são configurados para execução periódica no módulo, em intervalos escolhidos pelo desenvolvedor. A cada execução os dados são buscados no Módulo Banco de Dados, processados, e os resultados retornam ao Módulo Banco de Dados, na forma de dados de **equipamentos virtuais**.

Para facilitar o desenvolvimento de novos algoritmos foi desenvolvida uma biblioteca com funções básicas (Tabela 4.1) para acessar informações do Módulo Banco de Dados.

Tabela 4.1: Funções básicas da plataforma de desenvolvimento

Função	Parâmetros de Entrada	Saída
buscarDados()	<ul style="list-style-type: none"> • data de início da busca • data final da busca • identificador do local • identificador do sensor • quantidade de resultados desejados • fuso horário do local 	Tabela com os dados (data e valor)
procurarEquipamento()	<ul style="list-style-type: none"> • identificador do local 	Tabela com identificador do equipamento, nome do equipamento
procurarSensores()	<ul style="list-style-type: none"> • identificador do equipamento 	Tabela com os sensores do equipamento

O sistema foi desenvolvido para receber continuamente os dados dos equipamentos, que podem enviar os dados em períodos diferentes. Este período é configurado pelo usuário, que deve levar em consideração a velocidade de atualização dos dados e a duração da bateria dos equipamentos, quando não forem alimentados diretamente na rede de energia ou com painéis solares. Ao mesmo tempo que a plataforma recebe os dados dos equipamentos, deve executar os algoritmos e salvar seus resultados. A velocidade deste processo também é influenciada pela frequência de atualização dos equipamentos, já que os algoritmos não serão executados se não houverem dados.

Como solução para um ambiente heterogêneo em que os equipamentos podem ser configurados para enviar os dados em intervalos de 1 min até 24 horas, adotamos um agendamento horário para execução dos algoritmos. A cada hora inicia-se um novo ciclo de execução dos algoritmos, utilizando os dados que ainda não foram processados como entrada.

Módulo Interface de Usuário

Desenvolveu-se a interface da plataforma em HTML e Javascript, com exibição de gráficos e destaques para os indicadores calculados pelos algoritmos. Os valores calculados pelos algoritmos são exibidos em tempo real na interface de usuário.

4.2 Desenvolvimento dos Algoritmos

Os dados disponíveis para análise são as séries históricas de pressão, na entrada e em outros pontos do DMC, e o volume de água que entrou no distrito.

Desenvolveu-se algoritmos para:

1. Acumular o volume que entrou no DMC;
2. Calcular a vazão instantânea e a vazão média no intervalo de 15 minutos;
3. Calcular indicadores de continuidade no abastecimento;
4. Calcular as Perdas Reais;

4.2.1 Somatória de Volume

Os dados de volume coletados pelos equipamentos representam a somatória de pulsos produzidos pelos macromedidores. Essa somatória de pulsos é multiplicada pelo fator $m^3/pulso$ do medidor, e os volumes reais registrados no sistema. A Tabela 4.2 exemplifica a maneira como os dados são armazenados no Banco de Dados, em um equipamento que registra as informações em um intervalo de 1 minuto.

Tabela 4.2: Exemplo de armazenamento de volume no banco de dados

Data/Hora	Valor (m^3)
2013-05-01 00:00:00	0,00
2013-05-01 00:01:00	0,08
2013-05-01 00:02:00	0,17
2013-05-01 00:03:00	0,25
2013-05-01 00:04:00	0,33
2013-05-01 00:05:00	0,41
2013-05-01 00:06:00	0,47
2013-05-01 00:07:00	0,51
2013-05-01 00:08:00	0,56
2013-05-01 00:09:00	0,59
2013-05-01 00:10:00	0,63

Na presente pesquisa a simulação hidráulica e os equipamentos foram configurados para monitorar o volume **diário** que passa pelos macromedidores. Esta configuração faz com que às 00:00 h o volume seja definido como $0 m^3$, para iniciar um novo ciclo de contagem de pulsos. Este comportamento impede que seja feita uma varredura por toda a tabela, linha por linha, para calcular de uma única vez todas as vazões, pois no instante $t = 00:00:00$ h o ΔV será negativo e conseqüentemente a vazão também será negativa, o que não representará a realidade.

Para resolver este comportamento, o volume deve ser acumulado para todo o período desejado, antes de realizar o cálculo da vazão. O fluxograma do algoritmo de somatória dos volumes é apresentado na Figura 4.4, implementado em uma função que recebe a tabela com os dados de volume e retorna uma coluna com os dados acumulados.

A Tabela 4.3 apresenta um exemplo de aplicação do algoritmo para acumular o volume.

Esta função pode ser utilizada para acumular os volumes em qualquer período.

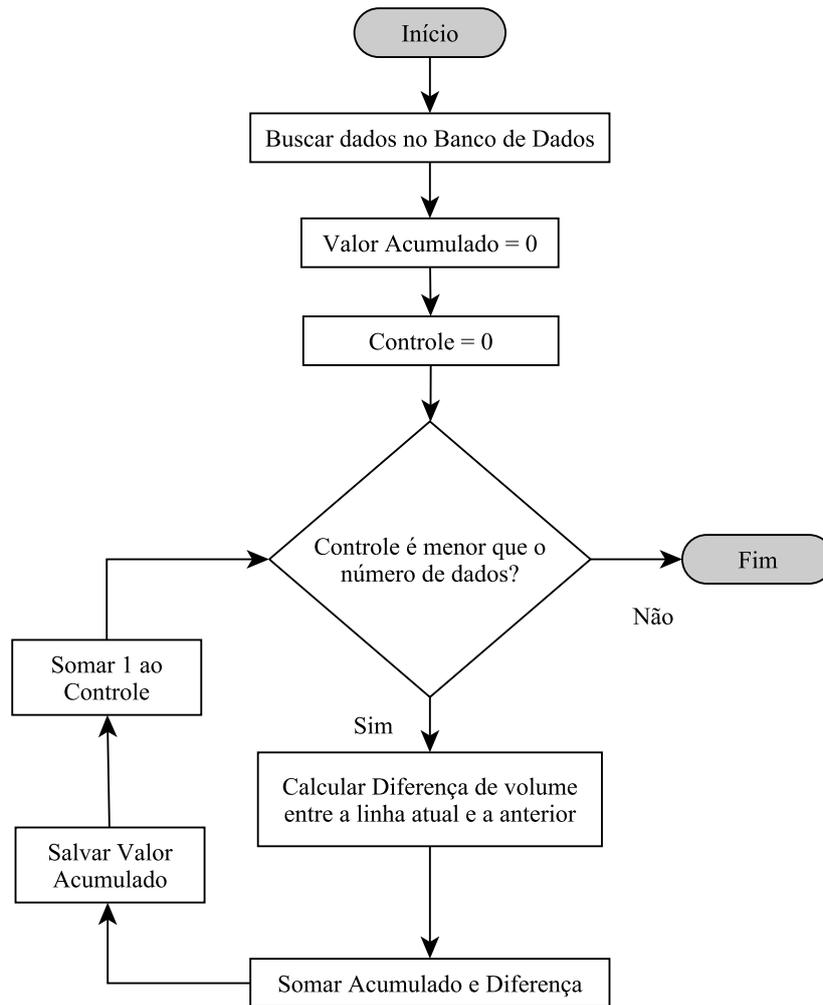


Figura 4.4: Fluxograma para somatória de volumes

Tabela 4.3: Exemplo de volume acumulado

Data/Hora	Volume (m^3)		Data/Hora	Volume (m^3)	Volume Acumulado (m^3)
2013-07-30 23:55:00	113,39		2013-07-30 23:55:00	113,39	113,39
2013-07-30 23:56:00	113,42		2013-07-30 23:56:00	113,42	113,42
2013-07-30 23:57:00	113,44		2013-07-30 23:57:00	113,44	113,44
2013-07-30 23:58:00	113,46		2013-07-30 23:58:00	113,46	113,46
2013-07-30 23:59:00	113,48	→	2013-07-30 23:59:00	113,48	113,48
2013-07-31 00:01:00	0,02		2013-07-31 00:01:00	0,04	113,52
2013-07-31 00:02:00	0,04		2013-07-31 00:02:00	0,06	113,54
2013-07-31 00:03:00	0,06		2013-07-31 00:03:00	0,08	113,56
2013-07-31 00:04:00	0,09		2013-07-31 00:04:00	0,11	113,59

4.2.2 Cálculo da Vazão

A partir dos conceitos da hidráulica básica, a vazão Q de um líquido é dada pela diferença de volume ΔV transferido de um ponto a outro em um intervalo de tempo Δt (Equação 4.1).

$$Q_i = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_1 - V_0}{t_1 - t_0} \quad (4.1)$$

onde: ΔV = diferença de volume; Δt = diferença de tempo; V_1 = volume no instante final; V_0 = volume no instante inicial; t_1 = tempo no instante final; t_0 = tempo no instante inicial.

O cálculo da vazão a cada instante é um processo iterativo, em que cada linha da tabela deverá ser lida e comparada com a anterior para determinar ΔV e Δt .

Com o volume acumulado é possível aplicar o algoritmo de cálculo da vazão, resumido no fluxograma da Figura 4.5.

A Tabela 4.4 demonstra os resultados do cálculo da vazão dos dados da Tabela 4.3.

Tabela 4.4: Exemplo de cálculo da vazão

Data/Hora	Volume (m^3)	Volume Acumulado (m^3)	Vazão (m^3/h)
2013-07-30 23:55:00	113,39	113,39	1,8
2013-07-30 23:56:00	113,42	113,42	1,8
2013-07-30 23:57:00	113,44	113,44	1,2
2013-07-30 23:58:00	113,46	113,46	1,2
2013-07-30 23:59:00	113,48	113,48	1,2
2013-07-31 00:01:00	0,04	113,52	1,2
2013-07-31 00:02:00	0,06	113,54	1,2
2013-07-31 00:03:00	0,08	113,56	1,2
2013-07-31 00:04:00	0,11	113,59	1,8

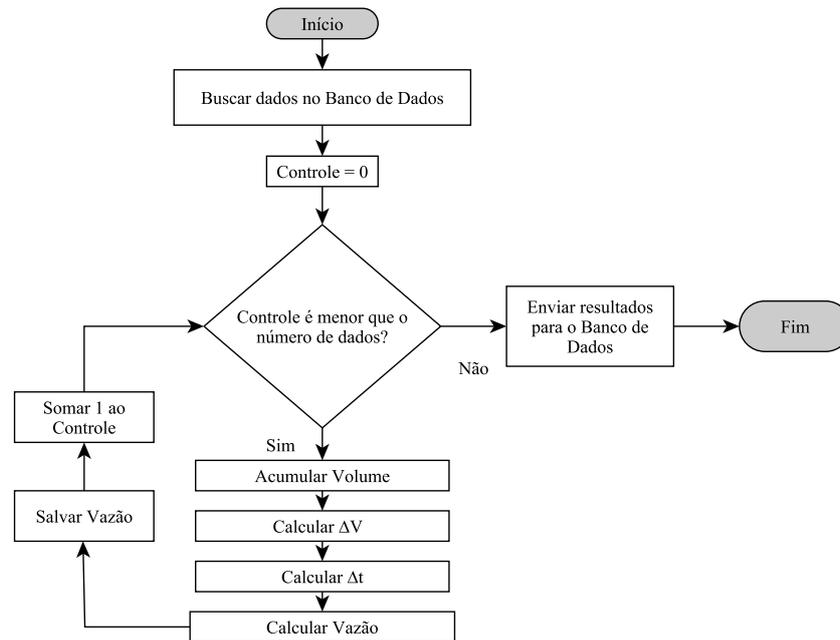


Figura 4.5: Fluxograma para cálculo da vazão

Esta função para cálculo da vazão só é necessária quando os equipamentos utilizados (macromedidores ou *dataloggers*) não são capazes de coletar diretamente os dados da vazão na tubulação.

4.2.3 Continuidade no Abastecimento

A Lei do Saneamento (nº 11.445/2007) discorre em seu Art. 43:

*"A prestação dos serviços atenderá a requisitos mínimos de qualidade, incluindo a **regularidade**, a **continuidade** e aqueles relativos aos produtos oferecidos, ao atendimento dos usuários e às condições operacionais e de manutenção dos sistemas, de acordo com as normas regulamentares e contratuais."*

Em especial, resalta-se os termos **regularidade** e **continuidade**. A prestação de um bom serviço depende, além de outros parâmetros de qualidade, que a população seja abastecida continuamente, sem interrupções.

A norma NBR 12218/1994 (ABNT, 1994) define que a pressão estática máxima nas redes de abastecimento deve ser de 50 mca, e a pressão mínima deve ser 10 mca. Redes com pressões abaixo de 10 mca podem ser classificadas como intermitentes.

Os equipamentos para monitoramento devem coletar os valores de pressão em intervalos configuráveis. Para calcular a continuidade no abastecimento nestes pontos, basta somar a quantidade de intervalos em que as pressões estiveram abaixo da norma (10 mca). A Figura 4.6 apresenta o fluxograma para cálculo do período com pressões abaixo da norma.

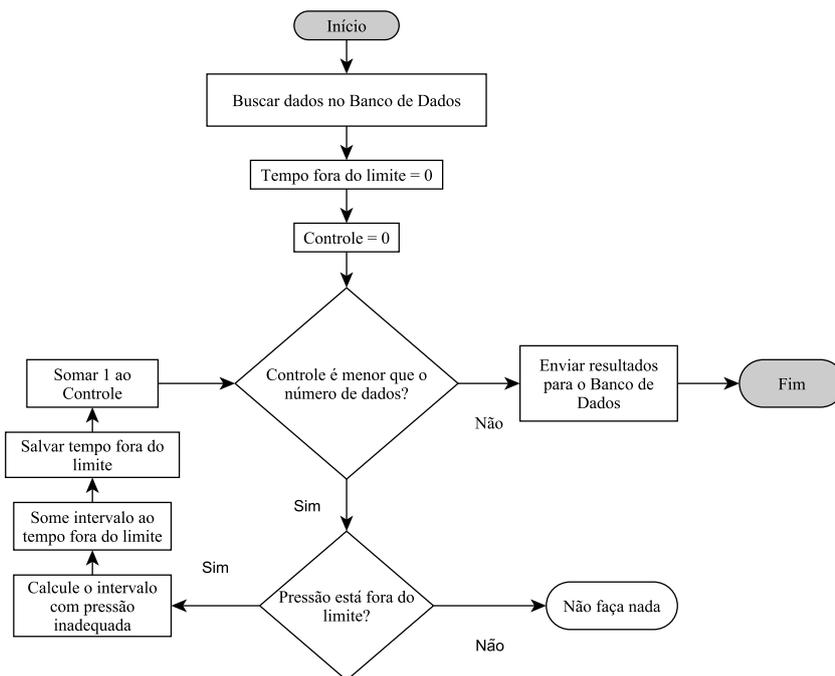


Figura 4.6: Fluxograma para cálculo da continuidade

No Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2011 (SNSA, 2013) o Ministério das Cidades ressalta o problema da intermitência nos sistemas de água, apontando as duas principais ocorrências que causam prejuízo aos usuários: paralisações e interrupções sistemáticas.

4.2.4 Perdas Reais

A quantificação de perdas totais é realizada a partir da subtração do volume que foi faturado ou medido pela companhia, do volume total disponibilizado na entrada do sistema. Porém esta metodologia não permite identificar qual parcela das perdas é referente às perdas reais, e qual parcela é de perdas aparentes (Farley, 2001).

A seguir são apresentados métodos para avaliação e determinação dos volumes de perdas reais.

Método das Vazões Mínimas Noturnas

O método das VMNs leva em consideração a variação existente entre os horários assumidos como de máximo consumo, entre às 11:00 e 14:00 horas, e o pico de menor consumo, que normalmente se dá entre 3:00 e 4:00 horas. Em uma abordagem *bottom-up*, este método é utilizado para estimar as perdas reais. (Tabesh *et al.*, 2009). Utilizar a VMN para determinar as perdas reais é vantajoso pois no instante de sua ocorrência teoricamente há pouco consumo, as vazões são estáveis e intrinsecamente grande parcela do seu valor refere-se aos vazamentos (Morrison, 2010; Tabesh *et al.*, 2009).

O método das VMNs é descrito em Tsutiya (2006), Cheung *et al.* (2009), Tabesh *et al.* (2009). A Tabela 4.5 mostra a composição dos consumos noturnos.

Tabela 4.5: Componentes da vazão mínima noturna. (Fonte: Tsutiya (2006))

Vazão mínima medida	Vazão noturna dos vazamentos	Vazão noturna dos vazamentos na rede	Vazamentos não visíveis estimados	Vazamentos não visíveis estimados
			Vazamentos inerentes no sistema de distribuição	Na rede
		Consumo noturno	Vazamentos em tubulações internas das economias	Nos ramais (rede até o hidrômetro)
				Nas tubulações internas até a caixa d'água, inclusive
	Uso noturno pelos consumidores	Consumo noturno excepcional	Nas bóias das caixas d'água	
			Nas tubulações internas de cada economia, após a caixa d'água	
		Consumo noturno estimado	Não residencial	
			Residencial	

No instante de obtenção da VMN as pressões são máximas e as perdas, por estarem ligadas diretamente a pressão, são maiores. Porém, como a pressão varia durante o dia, conforme o consumo e as manobras na rede, apenas multiplicar a VMN obtida por 24 horas não representaria a realidade, supervalorizando os volumes diários perdidos (Morrison *et al.*, 2007).

Para solucionar este problema foi convencionado o **Fator Noite/Dia (FND)**, número em horas por dia que multiplicado pela vazão dos vazamentos resulta no Volume Médio Diário dos Vazamentos, ou o Valor Diário de Perdas Reais.

O FND é determinado a partir de medições de pressão em um ponto médio representativo do subsetor, manobrando-o no horário da vazão mínima, reduzindo a pressão e anotando os valores de pressão e vazão, utilizando-se posteriormente da relação pressão/vazão descrita na Equação 3.1 para determinar o N_1 (Tsutiya, 2006; Cheung *et al.*, 2009). O FND pode ser calculado pelo somatório de medições de pressão, ao longo de

24 horas, utilizando a relação da Equação 4.2 (Cheung *et al.*, 2009).

$$\text{FND} = \sum \left(\frac{P_{i_{24h}}}{P_{2h \text{ às } 4h}} \right)^{N_1} \quad (4.2)$$

onde: $P_{i_{24h}}$ = média das pressões ao longo de 24 horas, medida de hora em hora; $P_{2h \text{ às } 4h}$ = pressão medida na entrada do setor na campanha de mínima noturna das 3h às 4h

O valor do FND pode ser menor do que 24 horas, caso mais comum, observado em setores sem nenhuma interferência operacional, ou maior do que 24 horas, como acontece em subsetores dotados de Válvulas Redutoras de Pressão, que reduzem a pressão nos horários com menor consumo (durante as madrugadas), invertendo o comportamento das pressões ao longo do dia (Tsutiya, 2006).

O volume perdido em um dia, calculado a partir dos ensaios da VMN em um determinado setor é dado pela Equação 4.3 (Tsutiya, 2006; Cheung *et al.*, 2009).

$$\text{Volume Diário de Perdas Reais} = (\text{FND}) \times (\text{Vazão dos Vazamentos}) \quad (4.3)$$

onde: Volume Diário de Perdas Reais é dado em m³/dia; FND é dado em h/dia; Vazão dos Vazamentos (dada pela VMN subtraída a vazão de consumo real dos usuários) é dada em m³/h.

O algoritmo para cálculo do FND e do volume diário de perdas reais é apresentando na Figura 4.7.

As configurações para o expoente N_1 e o intervalo de tempo em que o algoritmo deve procurar pela menor vazão são personalizáveis para cada DMC.

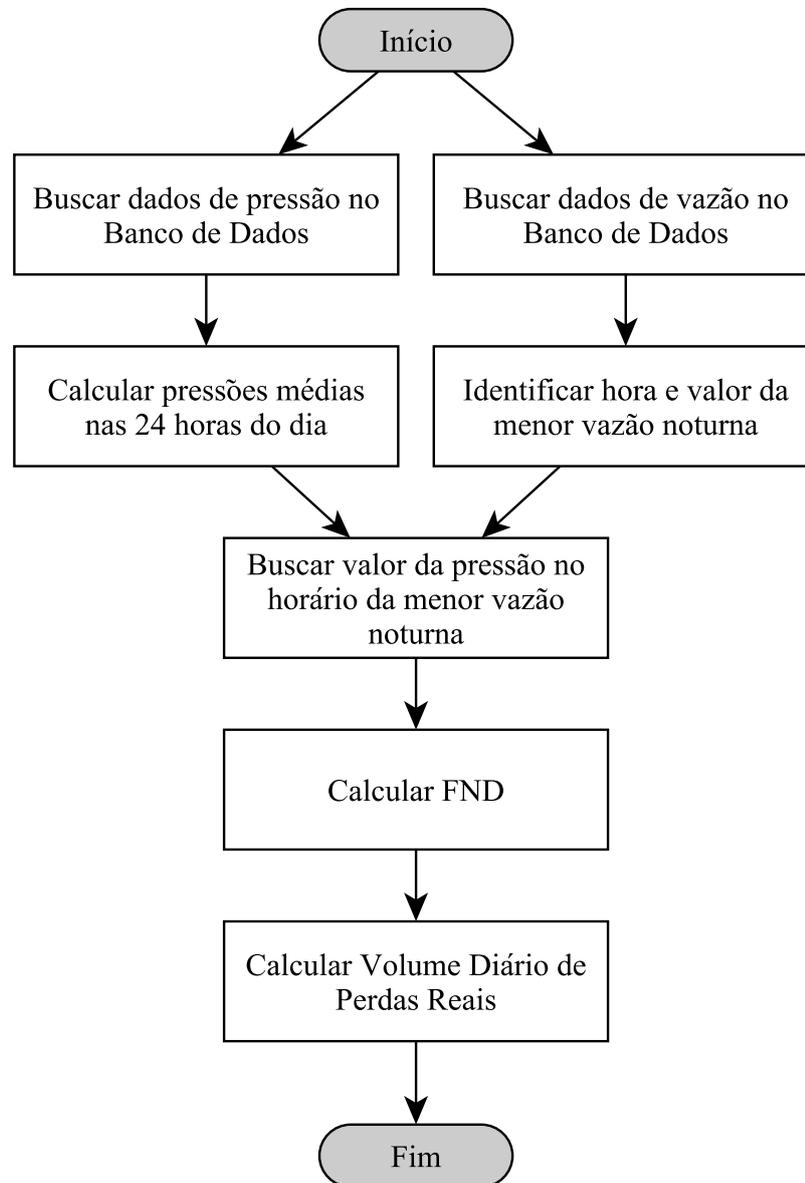


Figura 4.7: Fluxograma para cálculo do volume diário de perdas reais

4.3 Testes dos Algoritmos

4.3.1 Caracterização dos DMCs

A unidade básica para aplicação dos algoritmos aqui desenvolvidos é um Distrito de Monitoramento e Controle (DMC)² ou Distrito Pitométrico. O conceito de DMC foi primeiramente descrito pela *UK Water Authorities Association*, no início dos anos 80, no documento *Report 26 Leakage Control Policy & Practice*. A definição de um DMC era de uma área do sistema de distribuição criada pelo fechamento de válvulas ou pela completa desconexão dos trechos, de maneira que a quantidade de água entrando e saindo possa ser medida (Morrison *et al.*, 2007). Um DMC pode ser definido como:

- Tamanho médio entre 1.000 e 5.000 ligações;
- Área estanque, não se admitindo fluxos entre Distritos Pitométricos vizinhos;
- Existência de ponto para medição de vazão e pressão na entrada.

Os DMCs são amplamente utilizados, como estratégia de setorização dos sistemas de abastecimento, para obter maior controle e robustez operacional.

O presente trabalho propôs um DMC fictício para testes no Epanet, ilustrado na Figura 4.8, para verificar a acurácia do algoritmo de estimativa de perdas. Utilizou-se dados de pressão de uma rede real como valores de cota do Reservatório de Nível Fixo (RNF), no modelo do Epanet, e valores de demanda calculados com base no consumo médio de um setor real. Arbitrou-se um valor de coeficiente do emissor para simular perdas em todos os nós, e efetuou-se as simulações hidráulicas para determinar os parâmetros necessários.

²Em inglês *District Metered Area - DMA*

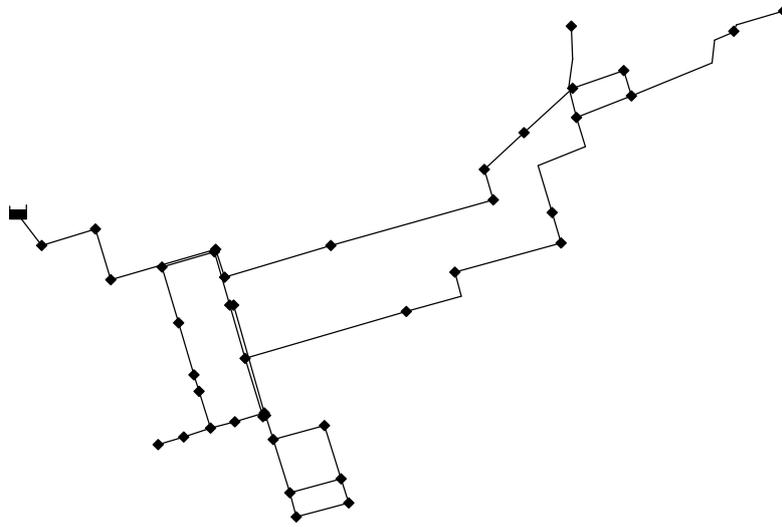


Figura 4.8: Rede fictícia no Epanet

Além disso, analisou-se mais três DMCs reais, dos quais foram monitorados durante aproximadamente dois meses os parâmetros de volume e pressão. Por tratar-se de dados confidenciais, as localizações e prestadoras de serviço responsáveis pelos DMCs não serão divulgadas neste trabalho.

DMC Teste

O DMC fictício (Figura 4.8) contém um Reservatório de Nível Fixo, 41 nós e 45 trechos. As Tabelas 4.6 e 4.7 apresentam os dados dos nós e trechos utilizados.

Emissores podem ser utilizados para simular as perdas em cada nó (Rossman, 2000), então foram elaboradas três versões desta rede, com valores diferentes para o coeficiente do emissor. Para o valor do expoente do emissor foi utilizado o valor padrão do Epanet, 0,5.

Na Rede 01, o coeficiente do emissor é $0 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^{1/2}$, para simular uma rede sem perdas reais em vazamentos. A Rede 02 utilizou coeficiente do emissor $0,038 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^{1/2}$ para cada nó, valor obtido empiricamente para que a rede apresentasse aproximadamente 50% de perdas reais. A Rede 03 utilizou coeficiente do emissor $0,10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^{1/2}$. Quanto maior o coeficiente, maior será o volume de perdas em cada nó.

Para calcular a vazão das perdas reais em cada instante das Redes 02 e 03 basta subtrair o valor da vazão encontrada na Rede com perdas pelo valor da vazão na Rede 01, que não apresenta perdas.

DMC 01

Localizado em um município do interior de Mato Grosso do Sul. Os dados levantados do distrito em julho de 2013 estão na Tabela 4.8.

Tabela 4.6: Nós da rede fictícia

Nó	Cota (m)	Demanda Base (L/s)
N_204	172	0
N_205	172	0
N_206	170	0
N_207	163	3.168
N_208	163	0
N_209	174	0
N_210	176	4.995
N_211	178	0
N_212	178	0
N_213	179	0
N_214	177	0
N_215	174	0
N_216	165	0
N_217	160	0
N_218	163	0
N_219	165	0
N_220	166	2.999
N_221	175	0
N_222	174	0
N_223	174	0
N_224	173	0
N_225	177	0.05
N_226	180	0.01
N_227	164	0
N_228	165	0
N_229	166	0
N_230	166	0
N_231	168	0
N_232	169	0
N_233	170	0
N_240	165	0
N_241	166	0.359
N_242	166	0
N_243	166	0
N_244	167	0.296
N_245	167	0
N_246	170	0.254
N_247	170	0.167
N_248	175	0.232
N_249	175	0.285
N_250	166	0.877

Tabela 4.7: Trechos da rede fictícia

Trecho	Nó inicial	Nó final	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Rugosidade
P_219	N_204	N_205	129.64	150	130
P_220	N_205	N_206	121.53	150	130
P_221	N_206	N_207	252.31	150	130
P_222	N_207	N_208	65.92	100	130
P_223	N_208	N_209	252.70	100	130
P_224	N_209	N_210	387.28	100	130
P_225	N_210	N_211	70.78	100	130
P_226	N_211	N_212	125.26	100	130
P_227	N_212	N_213	152.38	75	130
P_228	N_213	N_214	122.58	75	130
P_229	N_214	N_215	62.00	50	130
P_230	N_215	N_216	302.95	75	130
P_231	N_216	N_217	128.09	75	130
P_232	N_207	N_218	8.14	150	130
P_233	N_218	N_219	128.99	200	110
P_234	N_219	N_220	127.02	200	110
P_235	N_220	N_221	384.14	150	130
P_236	N_221	N_222	187.73	150	130
P_237	N_222	N_223	252.03	150	130
P_238	N_223	N_224	73.27	150	130
P_239	N_224	N_225	304.30	150	130
P_240	N_225	N_226	213.74	150	130
P_241	N_225	N_215	133.11	75	130
P_242	N_218	N_227	124.06	75	130
P_243	N_227	N_228	134.70	75	130
P_244	N_228	N_229	125.45	75	130
P_245	N_229	N_230	39.31	75	130
P_246	N_230	N_231	89.67	100	130
P_247	N_231	N_232	64.59	100	130
P_248	N_232	N_233	59.53	100	130
P_255	N_219	N_240	7.90	100	130
P_256	N_240	N_241	259.82	50	130
P_257	N_220	N_242	139.41	150	130
P_258	N_242	N_243	8.09	75	130
P_259	N_243	N_244	57.47	75	130
P_260	N_244	N_245	119.96	75	130
P_261	N_244	N_246	129.12	50	130
P_262	N_246	N_248	56.77	50	130
P_263	N_245	N_247	126.74	50	130
P_264	N_247	N_249	60.01	50	130
P_265	N_246	N_247	122.17	50	130
P_266	N_248	N_249	122.79	50	130
P_267	N_241	N_250	72.07	50	130
P_268	N_250	N_231	57.58	50	130
PIPE_1	RNF_01	N_204	1	250	100

Tabela 4.8: Dados do DMC 01

Totais	Ligações		Economias	Volume		Consumo entre 0 e 10 m^3	Extensão de rede (km)
	Ativas	Inativas		Consumido (m^3)	Faturado (m^3)		
387	280	107	396	3245	4131	159	10

O sistema é abastecido por um reservatório elevado. Para garantir as pressões mínimas nos horários de pico há um booster em linha de 25 CV, que é desligado manualmente entre às 00:00 e 02:00 horas. A macromedição é realizada na entrada do DMC, por um medidor eletromagnético Siemens MAG 8000.

DMC 02

Localizado em um município do interior de Mato Grosso do Sul. Os dados levantados do distrito em julho de 2013 estão na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Dados do DMC 02

Totais	Ligações		Economias	Volume		Consumo entre 0 e 10 m^3	Extensão de rede (km)
	Ativas	Inativas		Consumido (m^3)	Faturado (m^3)		
522	410	112	523	12805	13834	223	7

O sistema é abastecido por um reservatório elevado, alimentado por um poço tubular profundo. Para garantir as pressões mínimas nos horários de pico há um booster em linha, de 25 CV, que é desligado manualmente entre às 00:00 e 02:00 horas. A macromedição é realizada na entrada do DMC, por um medidor eletromagnético Siemens MAG 8000.

DMC 03

Localizado em um município do interior de Mato Grosso do Sul. Os dados levantados do distrito em julho de 2013 estão na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Dados do DMC 03

Totais	Ligações		Economias	Volume		Consumo entre 0 e 10 m^3	Extensão de rede (km)
	Ativas	Inativas		Consumido (m^3)	Faturado (m^3)		
1013	797	216	1053	13523	15015	360	11

O sistema é abastecido por um reservatório elevado, alimentado por um poço tubular profundo. A macromedição é realizada na entrada do DMC, por um medidor eletromagnético Siemens MAG 8000.

DMC 04

Localizado na capital de Mato Grosso do Sul, Campo Grande. Os dados levantados do distrito em julho de 2013 estão na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Dados do DMC 04

Totais	Ligações		Economias	Volume		Consumo entre 0 e 10 m^3	Extensão de rede (km)
	Ativas	Inativas		Consumido (m^3)	Faturado (m^3)		
45	45	-	45	2000	1850	-	1

O sistema é abastecido por um reservatório elevado, alimentado por um poço tubular profundo. A macromedição é realizada na entrada do DMC, por um macromedidor Actaris Flostar M.

4.3.2 Simulações na rede teste

Desenvolveu-se um aplicativo para executar automaticamente várias simulações no Epanet, obtendo os dados de pressão e vazão da rede para cada um dos instantes simulados e enviando-os para o banco de dados. O aplicativo permite retirar qualquer parâmetro dos nós ou trechos da rede simulada. O funcionamento do aplicativo de simulação automática está na Figura 4.9.

O arquivo de entrada contendo os valores das pressões para cada instante é lido pelo aplicativo, que automaticamente gera um arquivo de rede no Epanet (arquivo com extensão *inp*). Esta rede é então simulada no Epanet, produzindo um arquivo de relatório com os dados da simulação. O relatório é lido pelo aplicativo, que faz a leitura dos parâmetros dos relatórios, gerando um arquivo em formato *csv*, que é enviado para o Módulo Banco de Dados. O procedimento se repete para cada um dos instantes do arquivo de entrada.

4.3.3 Implantação dos sensores

Para obtenção dos dados em campo, em tempo real, foram utilizados equipamentos que integram registradores de dados (*data loggers*) e modem GPRS, da empresa Optimale, modelo Ologger GPRS, apresentado na Figura 4.10. Estes equipamentos armazenam os dados pulsados emitidos pelos macromedidores, e possuem sensor de pressão integrado, o que facilitou a instalação no campo. Na Figura 4.11 está o momento em que o *data logger* e o macromedidor Siemens MAG 8000 foram configurados para funcionar em conjunto. O Ologger GPRS armazena os dados coletados e os envia periodicamente, via rede celular, para o módulo coletor do sistema. As especificações do equipamento estão na Tabela 4.12.

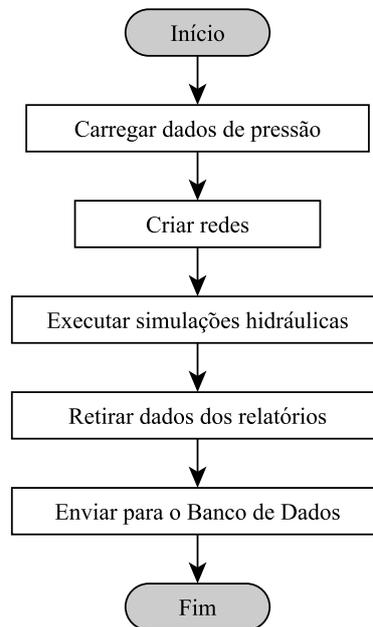


Figura 4.9: Fluxograma para realizar simulações hidráulicas



Figura 4.10: Equipamento para coleta e envio dos dados Ologger GPRS

Tabela 4.12: Especificações do Ologger GPRS

Característica	Valor
Entradas	5, analógicas ou digitais
Saídas	Saída digital com coletor aberto
Alimentação	Bateria, Fonte AC ou conversor interno para placa solar
Memória	Cartão SD de 4 GB
Entradas para chip GSM	2 entradas



Figura 4.11: Teste de comunicação entre o Ologger GPRS e o macromedidor Siemens MAG 8000

Em cada DMC foi instalado um *data logger* na entrada do sistema, coletando os dados do macromedidor e monitorando a pressão da rede de abastecimento.

4.3.4 Análise dos dados

Os dados foram analisados com o software R (R Core Team, 2013), utilizando os pacotes *ggplot2* (Wickham, 2009) para gerar os gráficos, *nortest* (Gross e Ligges, 2012) para testes de normalidade, *xtable* (Dahl, 2013) para exportar as tabelas em formato \LaTeX e *reshape* (Wickham e Hadley, 2007) na organização dos dados em tabelas.

Para tratamento dos dados brutos primeiramente foram realizados testes de normalidade, para definir quais seriam os testes estatísticos adequados para comparação entre as séries. Utilizou-se testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov para séries com mais de 5.000 pontos, e Shapiro-Wilk para séries com menos de 5.000 pontos.

Os dados brutos foram resumidos em seus valores mínimos, máximos, a mediana e o desvio padrão, para cada parâmetro e cada Rede e DMC.

A acurácia do algoritmo para estimativa de perdas foi avaliada realizando um teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para determinar se as séries de dados de pressão e volume seguem a mesma distribuição, determinando estatisticamente se existem diferenças entre elas. Este teste é necessário para avaliar se as simulações, mesmo com parâmetros de entrada diferentes (coeficientes dos emissores) não geraram dados iguais. Provada a diferença entre as séries, realizou-se um teste t de Welch para avaliar a hipótese da média de perdas reais estimadas das redes 02 e 03 ser igual a média de perdas reais obtidas pela diferença entre os volumes de cada Rede com a Rede 01.

Nos DMCs reais, após aplicados os algoritmos de cálculo da vazão e de estimativa de perdas foram calculados os indicadores Índice de Perdas, Índice de Perdas por Ramal e Índice de Perdas por Extensão de Rede, para comparação e avaliação de cada DMC.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5.1 Plataforma de Desenvolvimento

5.1.1 Desenvolvimento

A plataforma foi desenvolvida seguindo as especificações da Metodologia, atendendo todos os requisitos.

Utilizou-se o Banco de Dados MySQL, a linguagem Javascript (*node.js*) para desenvolver o aplicativo para receber os dados dos equipamentos, e os algoritmos foram escritos na linguagem R.

A execução dos algoritmos foi agendada para acontecer de hora em hora, utilizando a ferramenta *cron* disponível na distribuição Linux utilizada na instância de aplicativos inteligentes.

O sistema foi mantido *online* de março à novembro de 2013, com poucas interrupções realizadas para atualizar *softwares* ou algoritmos.

5.1.2 Desempenho

Foi monitorado o desempenho (uso de CPU, RAM e disco rígido) do servidor utilizado para teste da plataforma. Utilizou-se uma instância da plataforma EC2 da Amazon, do tipo *t1.micro*, que tem especificações semelhantes à uma máquina física com um processador de 1 GHz, 615 MiB de memória RAM, e utilizamos um disco virtual com 22 GiB.

Durante os testes a instância coletora não demonstrou lentidão, recebendo todos os dados dos equipamentos, sem interrupções.

As instâncias utilizadas para os módulos Banco de Dados, Aplicativos Inteligentes e Interface de Usuário apresentaram regularmente momentos de lentidão, devido à limitação de processamento imposta pela Amazon às instâncias do tipo *t1.micro*, utilizadas durante os testes.

Em um ambiente de produção, utilizando instâncias mais poderosas, o sistema não deverá ter problemas com velocidade de processamento.

Desenvolveu-se uma interface simples, via web, para visualização dos dados (Figura 5.1). Nesta interface é possível visualizar para cada dia, semana ou mês, os dados de pressão, vazão, o volume total e o volume estimado de perdas reais. Nos DMCs reais também é exibida a continuidade no abastecimento.

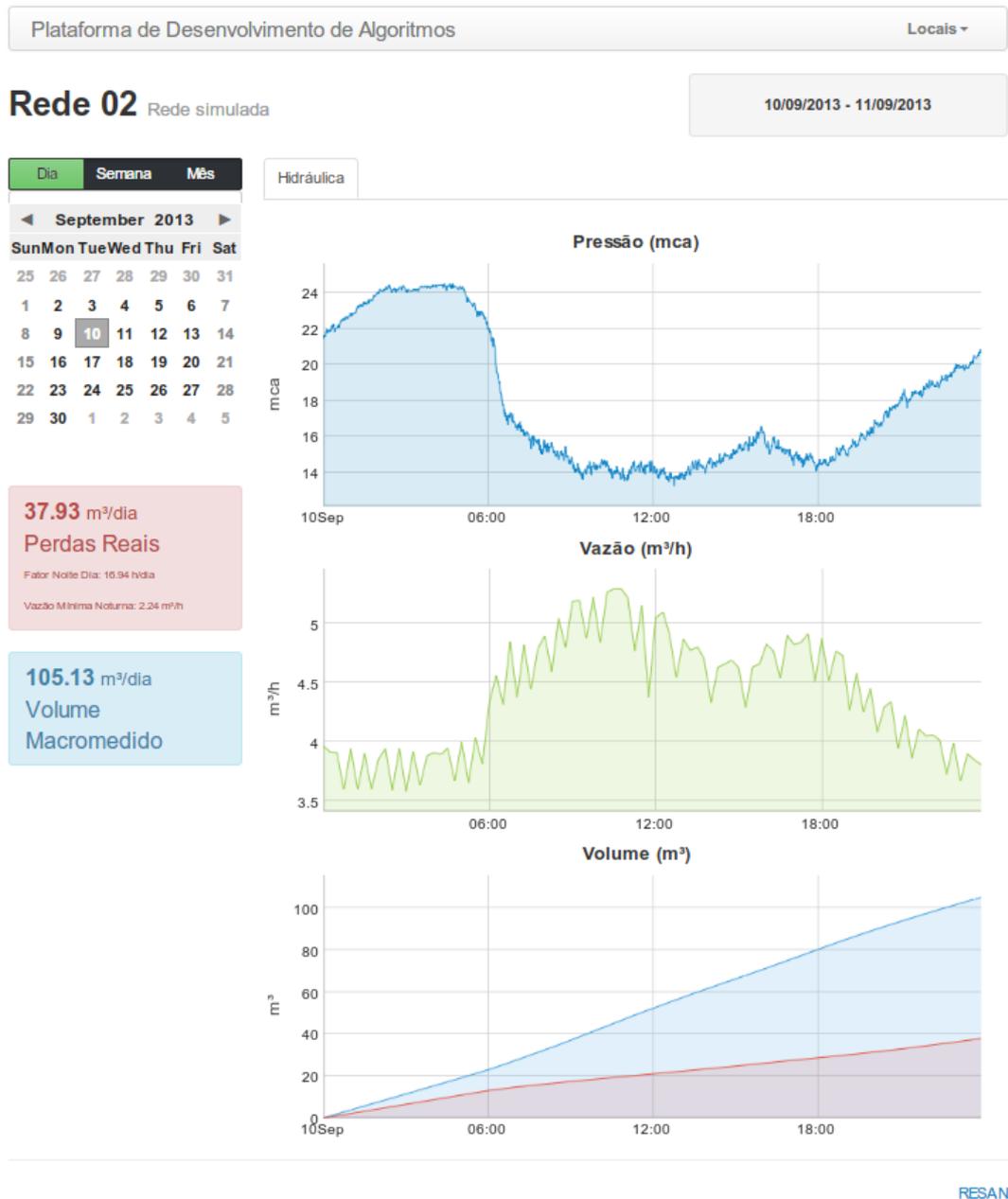


Figura 5.1: Interface de visualização dos dados

5.2 Descrição dos Dados Coletados

No DMC teste realizou-se uma simulação estendida de 9 dias, utilizando os dados de pressão de um DMC real (período de 08/09/2013 à 16/09/2013) como valores da cota do RNF. Para cada versão da rede, obtive-se os dados de pressão e volume acumulado diário no DMC teste. Foram aproximadamente 12.500 observações para cada um dos parâmetros, com dados para cada minuto do período analisado.

A Tabela 5.1 contém um resumo da quantidade de dados coletados, frequência de aquisição de dados e datas de início e fim do monitoramento para os DMCs Reais. Foi monitorada a pressão e o volume acumulado diário na entrada dos DMCs.

Tabela 5.1: Resumo dos dados observados nos DMCs 01, 02, 03 e 04

DMC	Nº observações	Início	Fim	Frequência (minutos)
01	240.000	03/03/2013	20/08/2013	1
02	290.000	04/04/2013	28/10/2013	1
03	97.000	15/08/2013	23/10/2013	1
04	2.000	03/07/2013	18/07/2013	10

5.2.1 DMC teste

Os gráficos completos de cada parâmetro das redes estão no Apêndice A.

O teste de Kolmogorov-Smirnov para os parâmetros de pressão e volume apontou que os dados não seguem uma distribuição normal, portanto a medida de tendência utilizada para descrever os dados é a mediana.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam o resumo estatístico dos dados coletados.

Tabela 5.2: Resumo dos dados de pressão da rede simulada

	Valor Mínimo (mca)	Valor Máximo (mca)	Mediana (mca)	Desvio Padrão (mca)
Rede 01	12,25	25,38	16,87	3,80
Rede 02	11,80	24,75	16,31	3,76
Rede 03	11,27	23,62	15,50	3,59

Tabela 5.3: Resumo dos dados de volume da rede simulada

	Valor Mínimo (m ³)	Valor Máximo (m ³)	Mediana (m ³)	Desvio Padrão (m ³)
Rede 01	0,03	54,38	25,61	17,07
Rede 02	0,07	105,84	51,50	31,30
Rede 03	0,13	184,94	92,61	51,92

Os resultados do teste de Kruskal Wallis para semelhança das medianas estão na Tabela 5.4, indicando que há diferenças significativas entre as medianas dos grupos. Estes resultados permitem afirmar que as simulações não geraram dados iguais, e que os dados representam redes com os parâmetros pressão e volume diferentes.

Tabela 5.4: Resultados do teste de Kruskal-Wallis para os parâmetros da rede simulada

Parâmetro	Kruskal-Wallis chi-squared	p-value
Pressão	1365,03	$2,26^{-10}$
Volume	11720,56	$2,26^{-10}$

Sendo os dados diferentes, infere-se destes resultados que há redução da pressão e aumento do volume nas redes com perdas, fato que fica evidenciado ao visualizar as Figuras 5.2 e 5.3, contendo o gráfico boxplot dos dados.

5.2.2 DMCs Reais

Os gráficos completos de cada parâmetro dos DMCs estão no Apêndice A.

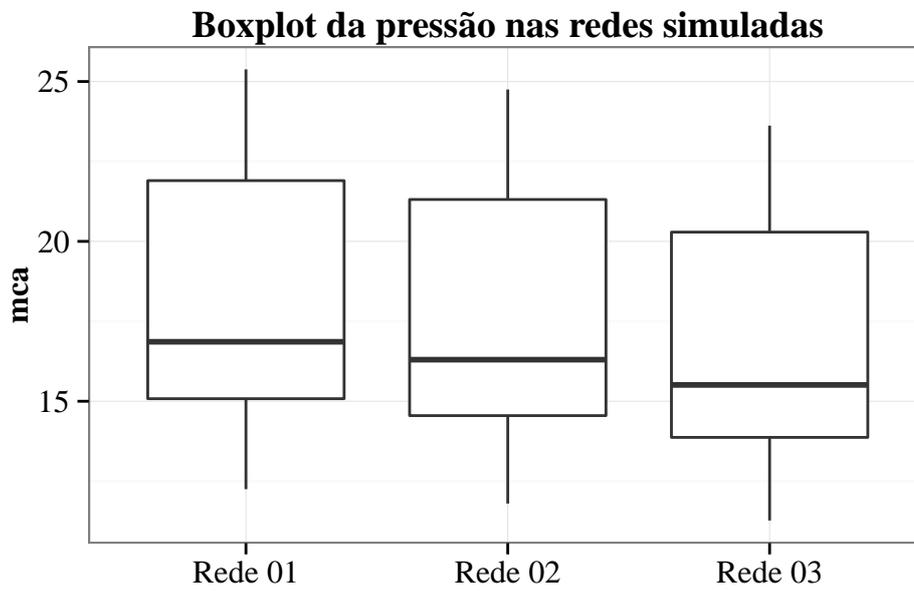


Figura 5.2: Boxplot da pressão nas redes simuladas

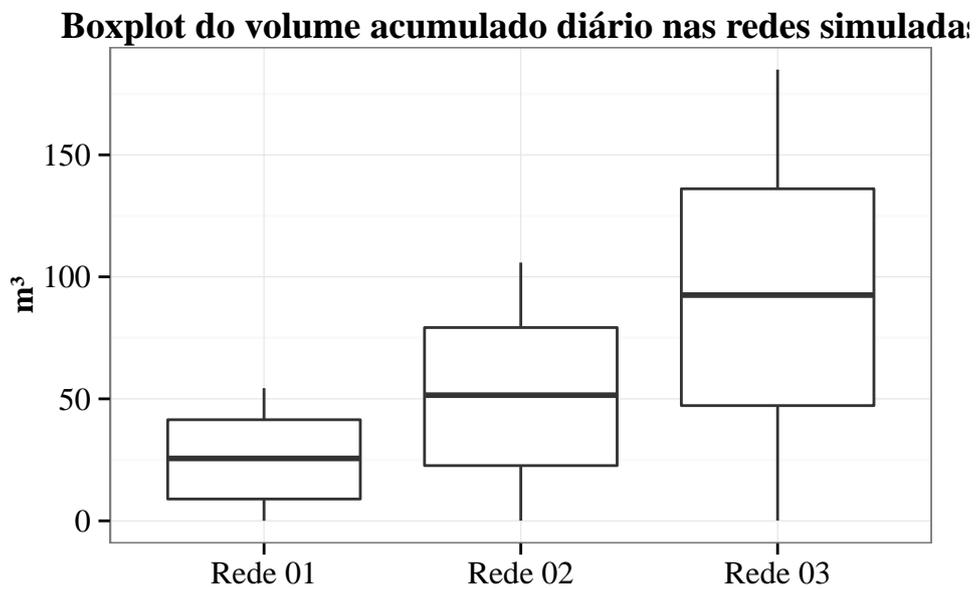


Figura 5.3: Boxplot do volume nas redes simuladas

O teste de Kolmogorov-Smirnov para os parâmetros de pressão e volume apontou que os dados não seguem uma distribuição normal em nenhum dos DMCs.

As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam o resumo estatístico dos dados coletados.

Tabela 5.5: Resumo dos dados de pressão dos DMCs

	Valor Mínimo (mca)	Valor Máximo (mca)	Mediana (mca)	Desvio Padrão (mca)
DMC 01	6,12	47,68	32,06	7,69
DMC 02	0,20	57,10	39,69	8,58
DMC 03	2,67	25,91	18,40	4,30
DMC 04	26,89	42,38	39,00	2,78

Tabela 5.6: Resumo dos dados de volume acumulado diário dos DMCs

	Valor Mínimo (m^3)	Valor Máximo (m^3)	Mediana (m^3)	Desvio Padrão (m^3)
DMC 01	0,00	175,54	54,95	35,98
DMC 02	0,00	1083,20	460,20	302,17
DMC 03	0,04	104,82	44,61	28,07
DMC 04	0,09	66,20	21,94	20,51

5.3 Descrição dos Resultados dos Algoritmos

5.3.1 Cálculo da Vazão

O algoritmo para cálculo da vazão foi aplicado nos dados de volume das redes simuladas e dos DMCs reais, com um intervalo de 15 minutos para os DMCs 01, 02 e 03, e 60 minutos para o DMC 04.

Os testes de normalidade apontaram a rejeição da hipótese dos dados de vazão serem normais em todos os casos.

DMC Teste

A Tabela 5.7 apresenta o resumo estatístico dos dados de vazão das redes simuladas, e a Figura 5.4 apresenta o gráfico boxplot do parâmetro.

Tabela 5.7: Resumo dos dados de vazão dos DMCs

	Valor Mínimo (m^3/h)	Valor Máximo (m^3/h)	Mediana (m^3/h)	Desvio Padrão (m^3/h)
Rede 01	1,35	3,28	2,44	0,59
Rede 02	3,48	5,35	4,43	0,50
Rede 03	6,40	8,93	7,59	0,44

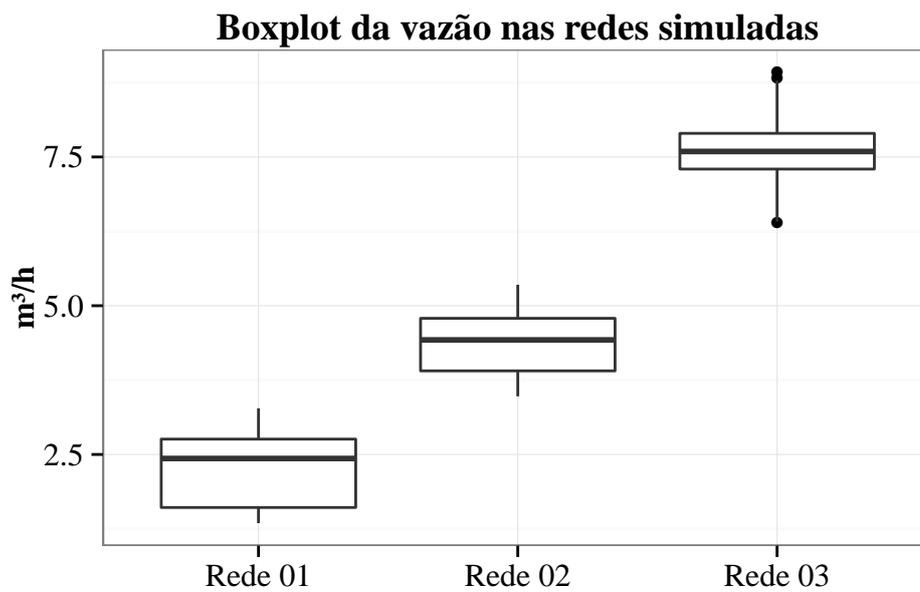


Figura 5.4: Boxplot do vazão nas redes simuladas

Infere-se dos resultados que o aumento nas perdas provoca o aumento da vazão, considerando que não haja desabastecimento provocado pelo incremento no consumo. O Epanet foi programado para resolver as equações hidráulicas necessárias para a simulação assumindo a hipótese de que os nós serão atendidos, não importa qual seja o estado da rede. Em uma situação real o incremento na vazão provocado pelas perdas poderá causar o desabastecimento nos pontos críticos.

DMCs Reais

Os gráficos completos de vazão para cada DMC estão no Apêndice A.

5.3.2 Continuidade no Abastecimento

A continuidade dos DMCs reais foi calculada utilizando o algoritmo apresentado na Seção 4.2.3, calculando satisfatoriamente a razão de tempo em que a pressão de abastecimento na entrada do setor foi maior do que 10 mca. A Figura 5.5 apresenta os gráficos com os resultados. Observou-se que os momentos indicados com desabastecimento são coincidentes com momentos de redução na pressão nas redes, provavelmente resultado de manobras ou manutenções realizadas.

No DMC 03 aconteceram os maiores e mais longos períodos de desabastecimento. Os DMCs 01 e 02 também apresentam problemas recorrentes, o que demonstra que nesta localidade (a mesma para os três primeiros DMCs) são recorrentes os períodos sem pressão suficiente na rede.

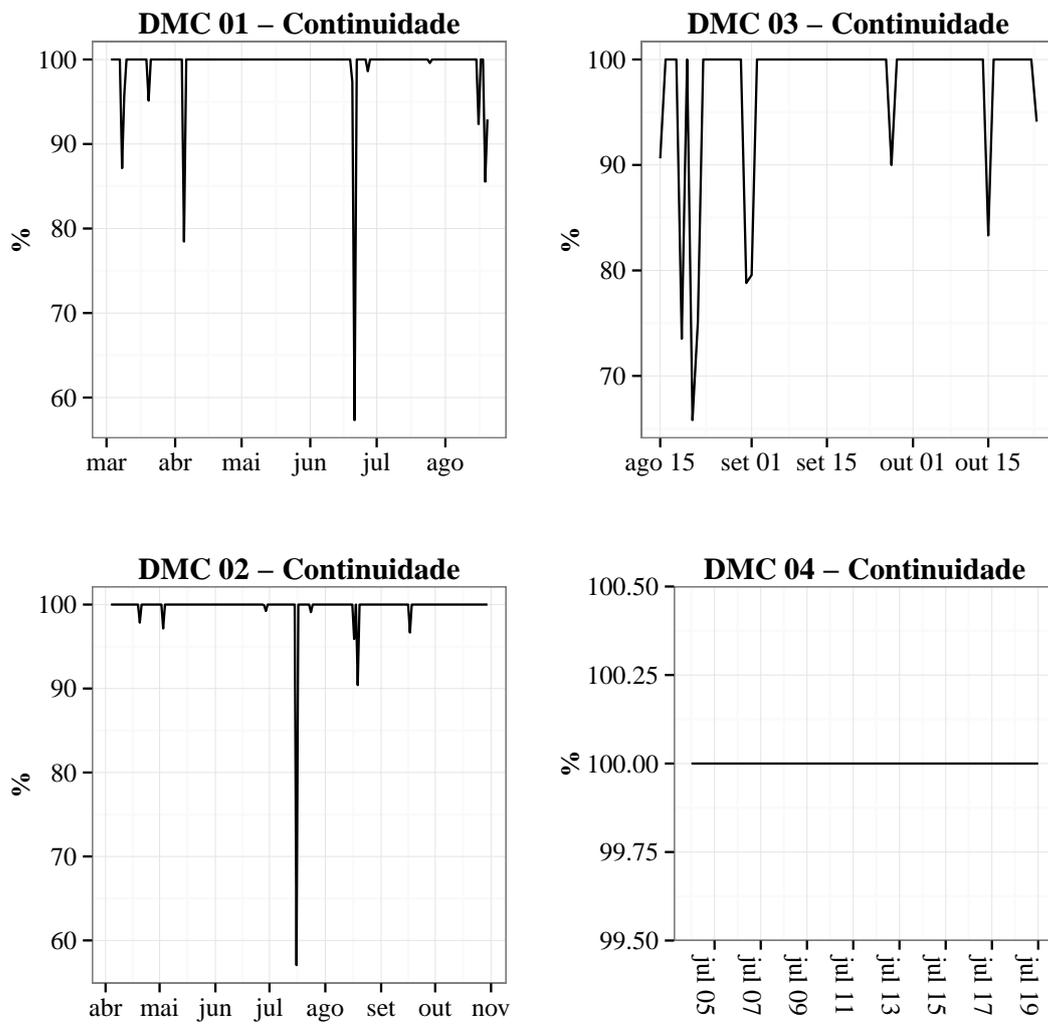


Figura 5.5: Histórico da continuidade do abastecimento nos DMCs

A descontinuidade no abastecimento provoca, além da interrupção no fornecimento aos consumidores, problemas com a qualidade da água fornecida, pois pode haver entrada de água do solo na rede de abastecimento. A grande variação na pressão também influencia no estresse do material das tubulações, aumentando o número de rompimentos.

5.3.3 Perdas Reais

DMC Teste - Validação

Utilizando os dados de pressão e vazão obtidos nas simulações, aplicou-se o algoritmo para estimativa de perdas reais pelo método das VMNs. Com os dados de volume obtivemos os valores reais de perdas, dados pela diferença entre o volume simulado com perdas menos o volume obtido na rede sem perdas (Tabela 5.8). Nesta situação todas as perdas registradas são perdas reais, provenientes de vazamentos simulados nos nós. As mesmas informações podem ser visualizadas na Figura 5.6.

Tabela 5.8: Volume total e volume de perdas nas redes simuladas

Dia	Rede 01		Rede 02		Rede 03	
	Macromedido (m^3)	Perdas (m^3)	Macromedido (m^3)	Perdas (m^3)	Macromedido (m^3)	Perdas (m^3)
2013-09-08	54,38	0,00	105,76	51,38	184,39	130,01
2013-09-09	54,24	0,00	105,19	50,95	182,95	128,71
2013-09-10	54,19	0,00	105,13	50,94	182,56	128,37
2013-09-11	53,16	0,00	103,03	49,87	178,78	125,62
2013-09-12	53,96	0,00	103,54	49,57	178,17	124,21
2013-09-13	52,24	0,00	100,17	47,93	172,42	120,18
2013-09-14	54,30	0,00	103,33	49,03	177,04	122,73
2013-09-15	54,28	0,00	105,84	51,56	184,94	130,66
2013-09-16	53,35	0,00	104,73	51,38	184,14	130,79
% de perdas		0		48,31		70,20

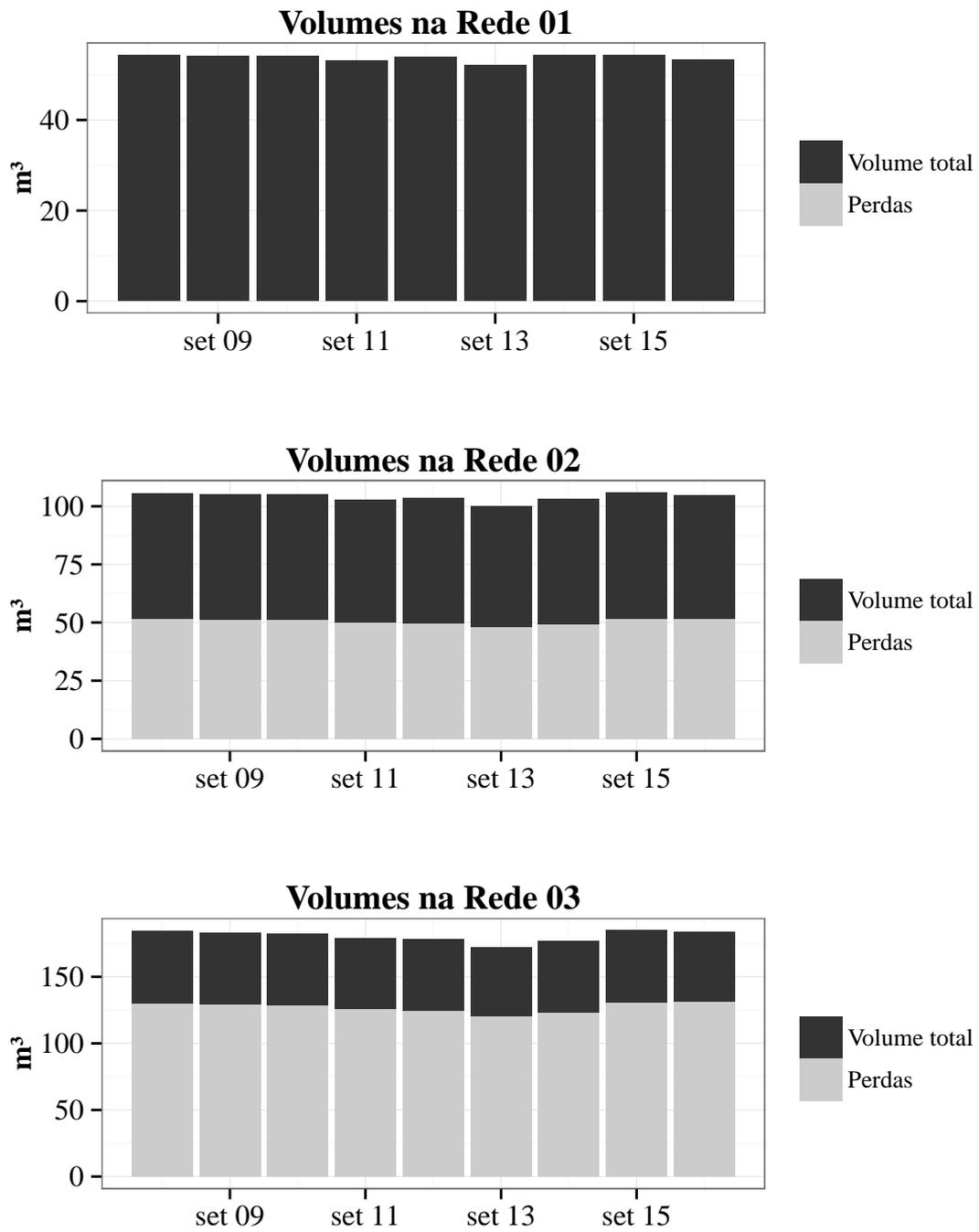


Figura 5.6: Volume total e volume de perdas nas redes simuladas

Na Rede 02 as perdas representam aproximadamente 48% do volume total, e na Rede 03, aproximadamente 70 %.

Foram realizados três ciclos de estimativa de perdas com o algoritmo. No primeiro adotou-se o coeficiente $N_1 = 1$, no segundo $N_1 = 1,15$ e no terceiro $N_1 = 0,5$. Em todas as estimativas considerou-se o horário entre 3 e 4 horas como o de menor vazão noturna. Como vazão de consumo real dos usuários utilizamos a VMN obtida na Rede 01, sem perdas, de $1,344 m^3$.

As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam o resumo das perdas estimadas para cada valor de N_1 , nas Redes 02 e 03. Os demais parâmetros utilizados e calculados para estimativa das perdas reais pelo método estão condensados nas Tabelas 5.11 e 5.12.

Tabela 5.9: Resumo das perdas reais diárias estimadas para Rede 02

Dia	Perdas Reais (m^3)	$N_1 = 1$ (m^3)	$N_1 = 1.15$ (m^3)	$N_1 = 0.5$ (m^3)
2013-09-08	51,38	40,51	39,03	46,14
2013-09-09	50,95	39,91	38,25	46,33
2013-09-10	50,94	39,57	37,93	45,87
2013-09-11	49,87	39,32	37,70	45,52
2013-09-12	49,57	38,49	36,82	44,95
2013-09-13	47,93	38,35	36,72	44,69
2013-09-14	49,03	37,87	36,21	44,36
2013-09-15	51,56	40,55	39,12	45,97
2013-09-16	51,38	40,52	39,02	46,23
Média	50,29	39,45	37,87	45,56

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk aponta que as séries de dados de volumes de perdas reais estimados seguem a distribuição normal, com 95% de confiabilidade. Os resultados dos testes estão na Tabela 5.13.

Tabela 5.10: Resumo das perdas reais diárias estimadas para Rede 03

Dia	Perdas Reais (m^3)	$N_1 = 1$ (m^3)	$N_1 = 1.15$ (m^3)	$N_1 = 0.5$ (m^3)
2013-09-08	130,01	113,20	109,06	129,01
2013-09-09	128,71	111,89	107,22	129,96
2013-09-10	128,37	110,94	106,33	128,72
2013-09-11	125,62	110,20	105,65	127,64
2013-09-12	124,21	107,53	102,85	125,65
2013-09-13	120,18	107,92	103,31	125,81
2013-09-14	122,73	106,77	102,08	125,13
2013-09-15	130,66	113,16	109,10	128,50
2013-09-16	130,79	114,04	109,79	130,19
Média	126,81	110,63	106,15	127,85

Tabela 5.11: Resumo dos parâmetros de cálculo das perdas reais na Rede 02

Dia	Q min (m^3/h)	P min (mca)	$N_1 = 1$		$N_1 = 1,15$		$N_1 = 0,5$	
			FND (h/dia)	Perdas (m^3)	FND (h/dia)	Perdas (m^3)	FND (h/dia)	Perdas (m^3)
2013-09-08	2,21	23,63	18,31	40,51	17,65	39,03	20,86	46,14
2013-09-09	2,27	24,43	17,61	39,91	16,87	38,25	20,44	46,33
2013-09-10	2,24	24,21	17,67	39,57	16,94	37,93	20,49	45,87
2013-09-11	2,22	23,84	17,73	39,32	17,00	37,70	20,53	45,52
2013-09-12	2,21	23,89	17,40	38,49	16,65	36,82	20,32	44,95
2013-09-13	2,20	23,56	17,47	38,35	16,73	36,72	20,36	44,69
2013-09-14	2,20	23,67	17,25	37,87	16,50	36,21	20,21	44,36
2013-09-15	2,19	23,44	18,52	40,55	17,87	39,12	21,00	45,97
2013-09-16	2,22	24,19	18,28	40,52	17,60	39,02	20,85	46,23

Tabela 5.12: Resumo dos parâmetros de cálculo das perdas reais na Rede 03

Dia	Q min (m^3/h)	P min (mca)	$N_1 = 1$		$N_1 = 1,15$		$N_1 = 0,5$	
			FND (h/dia)	Perdas (m^3)	FND (h/dia)	Perdas (m^3)	FND (h/dia)	Perdas (m^3)
2013-09-08	6,19	22,53	18,29	113,20	17,62	109,06	20,85	129,01
2013-09-09	6,36	23,30	17,58	111,89	16,85	107,22	20,43	129,96
2013-09-10	6,29	23,10	17,64	110,94	16,91	106,33	20,47	128,72
2013-09-11	6,22	22,73	17,71	110,20	16,98	105,65	20,52	127,64
2013-09-12	6,19	22,79	17,38	107,53	16,63	102,85	20,31	125,65
2013-09-13	6,18	22,46	17,46	107,92	16,71	103,31	20,35	125,81
2013-09-14	6,19	22,57	17,24	106,77	16,48	102,08	20,20	125,13
2013-09-15	6,13	22,40	18,46	113,16	17,80	109,10	20,96	128,50
2013-09-16	6,25	23,08	18,25	114,04	17,57	109,79	20,83	130,19

Tabela 5.13: Resumo dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk para os volumes de perdas estimados

Rede, N_1	W	p-value
Rede 02 - Perdas Reais	0,89	0,20
Rede 02 - $N_1 = 1$	0,90	0,24
Rede 02 - $N_1 = 1,15$	0,91	0,30
Rede 02 - $N_1 = 0,5$	0,89	0,21
Rede 03 - Perdas Reais	0,91	0,31
Rede 03 - $N_1 = 1$	0,92	0,37
Rede 03 - $N_1 = 1,15$	0,92	0,36
Rede 03 - $N_1 = 0,5$	0,90	0,28

Testes t de Welch apontaram que somente na Rede 03, utilizando $N_1 = 0,5$, a média do volume de perdas estimado pode ser considerada igual a média do volume de perdas real, com 95 % de intervalo de confiança. Na Rede 02 o valor de $N_1 = 0,5$ é o que mais se aproxima das perdas reais simuladas no DMC Teste, apesar do teste T de Welch apontar a rejeição da hipótese das médias serem iguais

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam graficamente a estimativa das perdas na Rede 02 e 03.

DMCs Reais

Após a validação do algoritmo na rede simulada, implantou-se e monitorou-se as perdas nos DMCs reais, em períodos distintos conforme apresentado na Tabela 5.1. A Tabela 5.14 resume os indicadores calculados para estes DMCs.

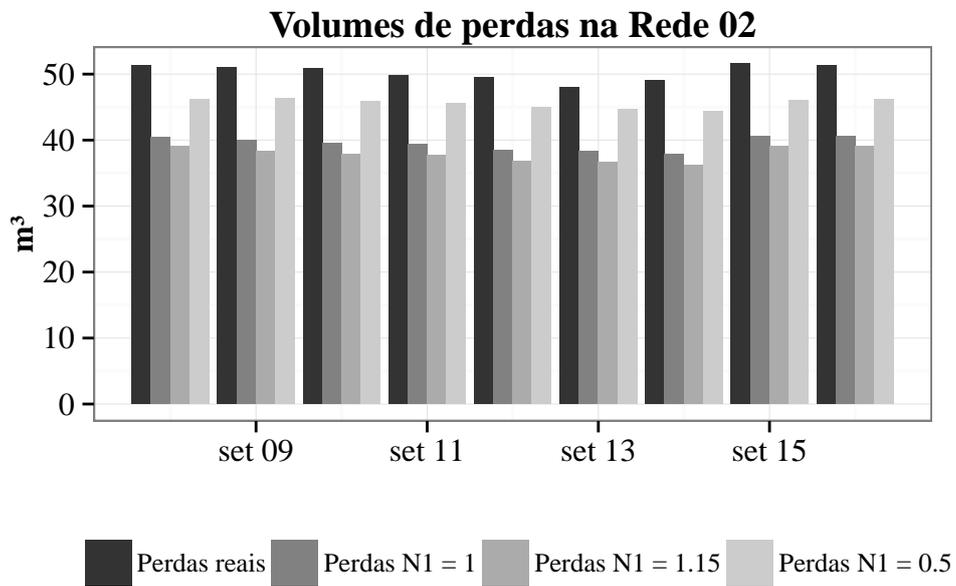


Figura 5.7: Perdas diárias na Rede 02

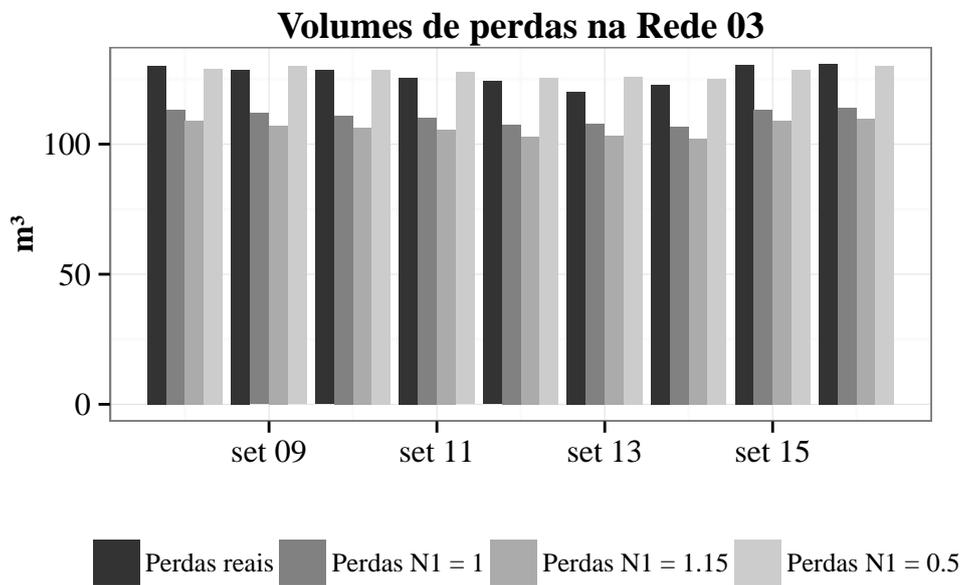


Figura 5.8: Perdas diárias na Rede 03

Analisando esses indicadores, em especial o valor encontrado para o Índice de Perdas por Ramal do DMC 02, pode-se inferir algumas conclusões. A primeira e imediata é a suspeita de que este DMC não esteja corretamente isolado, e tanto o alto consumo quanto a grande quantidade de perdas estimadas sejam consequências da setorização problemática.

Esta suspeita se repete nos outros DMCs, e reforça um item extremamente importante para o funcionamento do método de estimativa das perdas: a correta setorização e isolamento do DMC.

Tabela 5.14: Indicadores de perdas calculados para os DMCs reais

	Índice Percentual (%)	Índice de Perdas por Ramal ($m^3/ramal.dia$)	Índice de Perdas por Extensão de Rede ($m^3/km.dia$)
DMC 01	71,80	0,21	7,94
DMC 02	66,49	1,16	86,64
DMC 03	55,67	0,06	4,18
DMC 04	11,30	0,13	5,90

DMC 01 - Utilizamos o coeficiente $N_1 = 1,15$ nesta rede, valor recomendado nas referências para redes mistas. Consideramos como $0 m^3/h$ a vazão de consumo real dos usuários, portanto o volume de perdas está superestimado. O horário considerado como de menor vazão noturna foi o intervalo entre às 03:00 e 04:00 horas. A Figura 5.9 apresenta um gráfico comparativo entre o valor macromedido e o estimado para as perdas reais durante o período monitorado.

Os testes de normalidade apontaram que as séries de volume macromedido e de perdas neste DMC não seguem a distribuição normal.

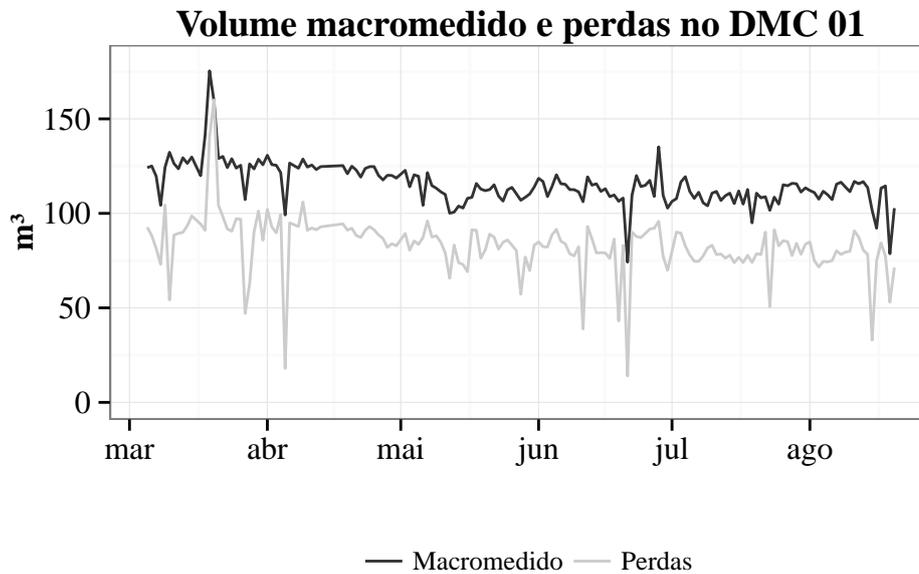


Figura 5.9: Volume macromedido e perdas no DMC 01

DMC 02 - Utilizamos o coeficiente $N_1 = 1,15$ nesta rede, valor recomendado nas referências para redes mistas. Consideramos como $0 \text{ m}^3/h$ a vazão de consumo real dos usuários, portanto o volume de perdas está superestimado. O horário considerado como de menor vazão noturna foi o intervalo entre às 03:00 e 04:00 horas. A Figura 5.10 apresenta um gráfico comparativo entre o valor macromedido e o estimado para as perdas reais durante o período monitorado.

Os testes de normalidade apontaram que as séries de volume macromedido e de perdas neste DMC não seguem a distribuição normal.

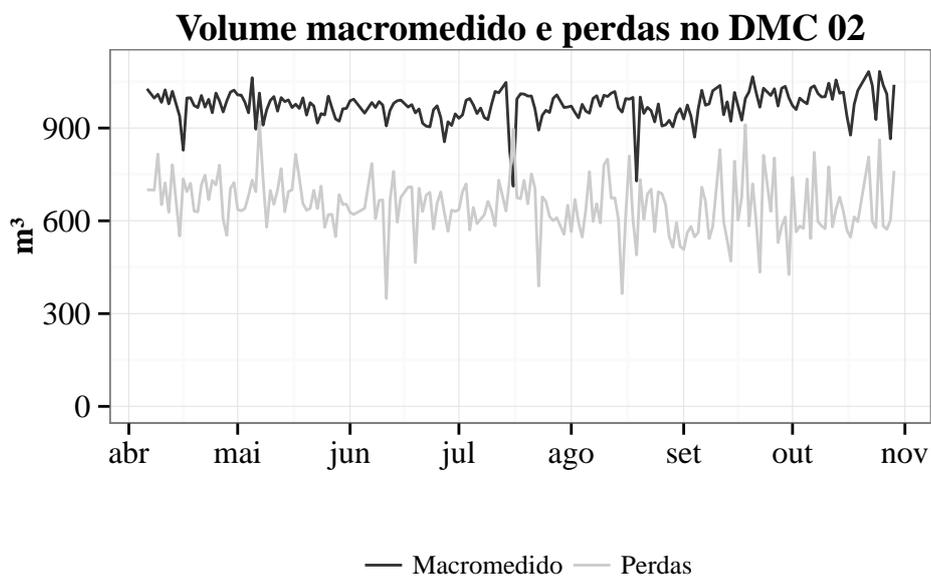


Figura 5.10: Volume macromedido e perdas no DMC 02

DMC 03 - Utilizamos o coeficiente $N_1 = 1,15$ nesta rede, valor recomendado nas referências para redes mistas. Consideramos como $0 \text{ m}^3/h$ a vazão de consumo real dos usuários, portanto o volume de perdas está superestimado. O horário considerado como de menor vazão noturna foi o intervalo entre às 03:00 e 04:00 horas. A Figura 5.11 apresenta um gráfico comparativo entre o valor macromedido e o estimado para as perdas reais durante o período monitorado.

Os testes de normalidade apontaram que a série de volume macromedido não segue a distribuição normal, e que a série de perdas neste DMC segue a distribuição normal.

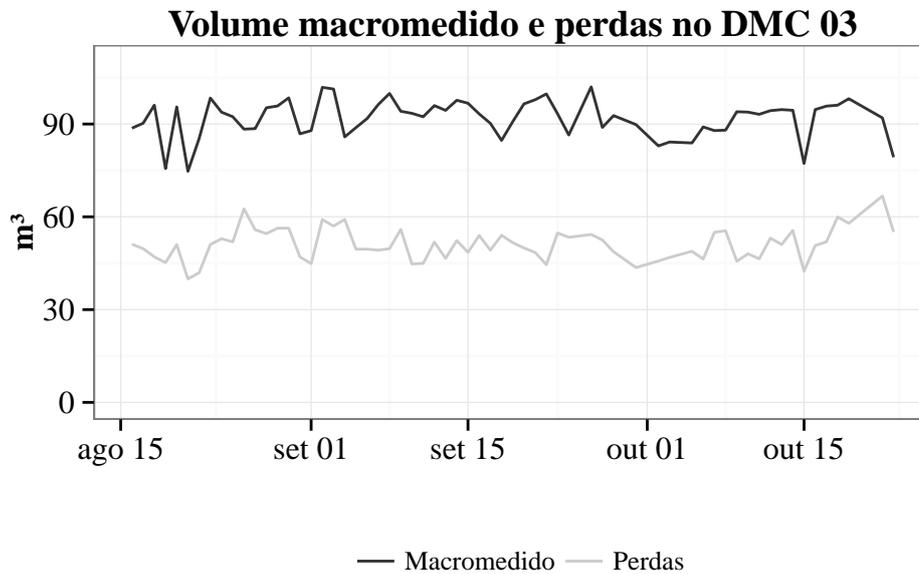


Figura 5.11: Volume macromedido e perdas no DMC 03

DMC 04 - Utilizamos o coeficiente $N_1 = 1,15$ nesta rede, valor recomendado nas referências para redes mistas. Consideramos como $0 \text{ m}^3/h$ a vazão de consumo real dos usuários, portanto o volume de perdas está superestimado. O horário considerado como de menor vazão noturna foi o intervalo entre às 03:00 e 04:00 horas. A Figura 5.12 apresenta um gráfico comparativo entre o valor macromedido e o estimado para as perdas reais durante o período monitorado.

Os testes de normalidade apontaram que a série de volume macromedido não segue a distribuição normal, e que a série de perdas neste DMC segue a distribuição normal.

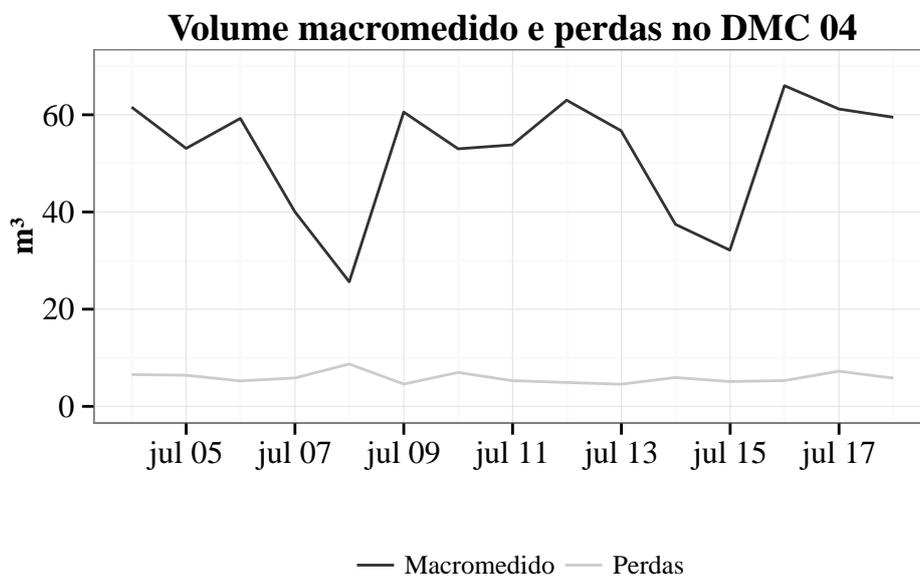


Figura 5.12: Volume macromedido e perdas no DMC 04

5.4 Discussão dos resultados

A variação no coeficiente do emissor nas Redes 01, 02 e 03 permitiu avaliar o comportamento do algoritmo de estimativa em graus diferentes de vazamentos, na Rede 02, com aproximadamente 48 % de perdas, e na Rede 03 com aproximadamente 70 %.

Com os resultados das simulações é possível notar que nas redes com vazamentos houve maior volume de água entrando no sistema, maiores vazões registradas, assim como redução na pressão de abastecimento. As Figuras 5.3, 5.2 e 5.4 demonstram essa tendência, que era esperada, já que além da água efetivamente consumida no DMC, haverá também a entrada da água que é perdida na rede.

O acréscimo de volume é refletido nas vazões de distribuição, ou vice versa; Enquanto na Rede 01, sem perdas, a mediana da vazão foi de $2,44 \text{ m}^3/\text{h}$, na Rede 02 e Rede 03 foram, respectivamente, $4,43 \text{ m}^3/\text{h}$ e $7,59 \text{ m}^3/\text{h}$. A vazão dos vazamentos é, em mediana, de $1,99 \text{ m}^3/\text{h}$ na Rede 02, representando quase a mesma vazão do que é efetivamente consumido, e $5,15 \text{ m}^3/\text{h}$ na Rede 03, mais do que o dobro do que é efetivamente consumido.

Para aplicação do algoritmo de estimativa de perdas é necessário previamente configurá-lo com o coeficiente N_1 que represente a realidade da rede. Utilizamos três valores de N_1 para analisarmos sua influência no algoritmo: $N_1 = 1$, $N_1 = 1,15$ e $N_1 = 0,5$.

Como era esperado ao analisar a influência de N_1 , expoente na Equação 4.2, o valor escolhido para este parâmetro tem grande influência na estimativa de perdas pelo método das VMN. Dada uma mesma rede, sem controle ativo de pressão (sem utilizar uma Válvula Redutora de Pressão), com os mesmo valores de $P_{i_{24h}}$ e $P_{2h \text{ às } 4h}$, quanto menor for N_1 , maior será o FND. Quanto maior o FND, maior será a perda estimada para o DMC.

A determinação do N_1 correto depende de ensaios de campo, como o utilizado por Girol (2008), e é **indispensável** para a correta estimativa das perdas pelo algoritmo. Na rede simulada, o valor de N_1 que mais se aproximou do valor verdadeiro das perdas reais, entre os valores simulados, foi o $N_1 = 0,5$, tanto na Rede 02 quanto na Rede 03. O Teste t de Welch apontou que somente na Rede 03 a média do valor verdadeiro de perdas reais e a média das perdas reais estimadas são iguais.

O algoritmo estimou uma média de perdas reais de $45,56 \text{ m}^3/\text{dia}$ na Rede 02, quando o valor médio verdadeiro de perdas reais foi $50,29 \text{ m}^3/\text{dia}$. Na Rede 03, o valor médio estimado de perdas reais foi de $127,85 \text{ m}^3/\text{dia}$, quando o valor médio verdadeiro de perdas reais foi $126,81 \text{ m}^3/\text{dia}$. Pela proximidade dos valores, pode-se afirmar que o algoritmo avalia satisfatoriamente as perdas reais quando configurado com os parâmetros hidráulicos corretos.

Utilizando valores maiores de N_1 , como 1,0 ou 1,15, as perdas reais foram subestimadas tanto na Rede 02 quanto na 03. Neste caso as perdas foram subestimadas, mas em um DMC com controle ativo de pressões as perdas podem ser superestimadas, já que o valor de $P_{2h \text{ às } 4h}$ poderá ser menor do que o de $P_{i_{24h}}$, e quanto maior o valor de N_1 , maior será o FND e por consequência maior o valor de perdas reais estimado. Mesmo subestimados ou superestimados, estes valores podem funcionar como indicadores em programas de controle de perdas, demonstrando se as ações estão surtindo efeito.

É sob este aspecto que devemos avaliar os valores estimados para os DMCs reais, pois não foram realizados ensaios em campo para determinação do N_1 de cada DMC, sendo adotado o valor 1,15, recomendado pela literatura para redes mistas. Como observado na rede simulada, a não utilização do valor de N_1 correto leva a valores diferentes de perdas reais do que realmente acontece no DMC.

Nos DMCs 01 e 02 o abastecimento é feito com a utilização de um *booster* em linha, que ao ser desligado durante a noite causa comportamento semelhante ao de uma VRP, reduzindo a pressão na rede. O horário normal de desligamento destes *boosters*, durante o período que em os DMCs foram monitorados, foi entre 00:00 e 02:00, não afetando portanto a avaliação da VMN, adotada como acontecendo entre 03:00 e 04:00. Ressalta-se que o desligamento dos *boosters* nestes DMCs representa uma ação para redução de consumo de energia, já que ao serem desligados, desabastecem os pontos críticos dos DMCs.

Compreendendo que as estimativas de perdas reais podem ser sub ou superestimadas nos DMCs reais, devemos analisar também a eficácia da setorização dos DMCs. Os DMCs 01, 02 e 03 fazem parte do mesmo sistema de abastecimento, e apresentaram valores discrepantes para cada indicador. No DMC 02 é notável o alto valor de perdas por ramal e por extensão de rede, respectivamente de $1,16 \text{ m}^3/\text{ramal.dia}$ e $86,64 \text{ m}^3/\text{km.dia}$. Acredita-se que este valor evidencia o isolamento falho do DMC, que pode estar abastecendo outros setores não contabilizados. Esta falha no isolamento deste DMC torna suspeitos os valores encontrados nos DMCs 01 e 03, pois podem ter seus valores estimados mascarados pela setorização errônea.

Neste ponto, é importante frisar que o correto isolamento dos DMCs é outro fator **indispensável** para utilização do sistema e da metodologia.

À parte desta possível falha no isolamento dos DMCs, estes apresentaram valores elevados no Índice Percentual, todos acima de 55 % de perdas, indicando graves vazamentos ou fraudes na região, e a necessidade urgente da implantação de programas de controle de perdas.

Destaca-se também o recorrente problema na descontinuidade no abastecimento, enfatizada pelo indicador de continuidade calculado.

O DMC 04, em outro município, com isolamento verificado e rede construída com materiais e métodos de boa qualidade, apresenta bons valores nos indicadores. Tem o menor Índice Percentual, de apenas 11,30 %, e um Índice de Perdas por Ramal compatível com o exemplificado na literatura para uma rede em bom estado, de $0.13 \text{ m}^3/\text{ramal.dia}$.

Nesta discussão é importante reforçar que apesar dos dados estáticos analisados aqui, o sistema executou todos os algoritmos em tempo real, na medida em que recebia novos dados enviados pelos equipamentos em campo. Desta maneira, seria possível ao operador identificar, além de problemas mais visíveis e imediatos como pressões abaixo dos valores definidos em norma ou falhas nos medidores, também tendências menos aparentes como novos vazamentos ou evolução de vazamentos já identificados.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

Nesta pesquisa desenvolveu-se uma plataforma simples e robusta para receber e analisar em tempo real dados de Distritos de Monitoramento e Controle.

O sistema foi desenvolvido utilizando *softwares* livres, que são gratuitos, reduzindo os custos de uma posterior implementação em um sistema real, e sua arquitetura modular permite a adição de novos dados e algoritmos, implementando novas funcionalidades e preparando-o para utilização de correlacionadores de ruído, modelagem hidráulica e sensores multiparâmetro (pressão, vazão e ruído).

Os algoritmos implementados neste trabalho possibilitaram o cálculo em tempo real da vazão, utilizando os registros de volume, da continuidade e a estimativa de perdas reais utilizando o método das VMNs. Calcular estas variáveis em tempo real permite que o operador tome ações rápidas no sistema, evitando longos períodos de desabastecimento, e também consiga identificar vazamentos rapidamente, reduzindo o tempo para resolução do problema.

O cálculo da continuidade nos DMCs monitorados demonstrou que o serviço prestado está distante do que é requisito na Lei nº 11.445/2007, com vários momentos de desabastecimento. Com o acompanhamento da continuidade em tempo real, as causas do desabastecimento podem ser localizadas e resolvidas rapidamente.

Quanto a estimativa de perdas, o método de análise das VMNs é amplamente utilizado e reconhecido, sendo utilizado mundialmente por sua simplicidade e facilidade de aplicação. Por não ser dependente do cadastro da rede, que seria necessário para simulações hidráulicas com o mesmo objetivo de estimar as perdas, o método das VMN é recomendado para utilização nos países em desenvolvimento, onde a quantidade de dados sobre as redes é escassa. Contribui para sua indicação como método preferencial a queda crescente no preço dos equipamentos utilizados para fazer o monitoramento contínuo.

Com o sistema desenvolvido neste trabalho os operadores e gestores de sistemas de abastecimento podem obter informações valiosas sobre a eficiência das redes, sem vultuosos investimentos, em tempo real.

A metodologia utilizada foi estruturada para, além do desenvolvimento da plataforma e dos algoritmos, avaliar a validação dos resultados das estimativas de perdas reais, utilizando dados de simulações hidráulicas. Os resultados obtidos nas simulações e nas análises permitiram validar a estimativa, com grau significativo de confiança, em pelo menos uma das situações (na estimativa de perdas na Rede 03), onde estatisticamente as medianas das séries de perdas e de estimativas são iguais. Novas simulações com redes diferentes e prévio cálculo do parâmetro N1 são necessárias para dar mais confiança à estimativa, e são uma recomendação para trabalhos posteriores.

Os resultados das estimativas de perdas reais nos DMCs demonstram que é necessário garantir o isolamento correto para realizar os cálculos. Qualquer entrada ou saída não contabilizada irá influenciar no cálculo, gerando estimativas falsas, sub ou superestimando as perdas. É importante também avaliar a qualidade, disponibilidade e frequência de envio dos dados pelos equipamentos de monitoramento. Dados com baixa precisão, grandes margens de erro e frequência aleatória de coleta e envio podem mascarar os parâmetros monitorados, também levando a estimativas de baixa qualidade. Outra recomendação para trabalhos posteriores é a implementação de filtros para tratar os dados brutos, removendo automaticamente dados fora do padrão antes de executar os algoritmos.

É importante ressaltar que as referências encontradas e utilizadas para realização deste trabalho, assim como aponta Mutikanga *et al.* (2013), tem foco na detecção e estimativa das perdas reais, principalmente nas que resultam de vazamentos na rede de distribuição. Falta uma reflexão maior sobre as perdas aparentes, e também sobre aspectos sociais da administração e gestão das perdas de água.

Segundo Kingdom *et al.* (2006) as companhias perdem aproximadamente 16 bilhões de m³ em perdas aparentes. Compreender a influência das perdas aparentes nas estimativas do método das VMN é um desafio para um trabalho posterior, assim como analisar a influência das intermitências, que mascaram os indicadores calculados. A própria aplicação da metodologia de VMNs, quando aplicada em redes intermitentes, apesar de possível, apresenta problemas já documentados (Peters e Ben-Ephraim, 2012). Além das alterações nas pressões utilizadas para o cálculo das perdas, nessas situações é costumeira a utilização de reservatórios para cobrir os períodos de desabastecimento (assim como é costume no Brasil), que podem mascarar as reais vazões de consumo (Morrison *et al.*, 2007). Recomenda-se que trabalhos posteriores façam a análise da influência das intermitências nas estimativas, assim como a influência dos reservatórios domiciliares.

Outro ponto para reflexão é a utilização de DMCs como unidades de controle para gestão de perdas, que precisa ser discutida, e alternativas encontradas, já que muitas companhias de saneamento não concordam em estruturar suas redes em distritos, que poderiam provocar problemas no abastecimento e ocasionar contaminação nas pontas de rede com pouco consumo, além dos vultuosos custos envolvidos para reorganizar sistemas inteiros em DMCs. Uma solução para a continuidade do uso do método, utilizando DMCs sem prejudicar a confiabilidade do sistema, é aproveitando a redução nos custos de equipamentos de monitoramento e de medidores, ampliar o número de pontos de medição de entrada e saída. Assim o número de DMCs poderia ser ampliado sem obrigatoriamente provocar a desconexão física dos distritos, já que todos os pontos de entrada e saída serão monitorados.

Referências Bibliográficas

- ABNT (1994). *NBR 12218: Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Alegre, H., Baptista, J., Jr., E. C., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., e Parena, R. (2006). *Performance Indicators for Water Supply Services (Manual of Best Practice Series)*. IWA Publishing.
- Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J. M., e Parena, R. (2004). Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. *Série Guias Técnicos, LNEC and IRAR*.
- Alonso, J., Alvarruiz, F., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P., Vidal, A., Martínez, F., Vercher, J., e Ulanicki, B. (2000). Parallel computing in water network analysis and leakage minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4):251–260.
- Boulos, P. F. e AbouJaoude, A. S. (2011). Managing leaks using flow step-testing, network modeling, and field measurement. *J Am Water Works Assoc*, 103(2):90–97.
- Brasil (2007). Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007. estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Publicada no DOU de 08 de janeiro de 2007 e retificada no DOU de 11 de janeiro de 2007*.

- Buchberger, S. e Nadimpalli, G. (2004). Leak estimation in water distribution systems by statistical analysis of flow readings. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(4):321–329.
- Cheung, P. B., Kiperstok, A., Cohim, E., Alves, W. C., Philippi, L. S., Zanella, L., Abe, N., Gomes, H. P., da Silva, B. C., Pertel, M., e Gonçalves, R. F. (2009). Consumo de água. *Gonçalves, Ricardo Franci (Coordenador). Uso Racional de Água e Energia: Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro: ABES*, pgs. 36–98.
- Dahl, D. B. (2013). *xtable: Export tables to LaTeX or HTML*. R package version 1.7-1.
- Daneels, A. e Salter, W. (1999). What is scada. Em *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems*, pgs. 339–343.
- Farley, M. (2001). Leakage management and control. *A best practice training manual*.
- Galloway, B. e Hancke, G. (2013). Introduction to industrial control networks. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 15(2):860–880.
- García, V. J., Enrique Cabrera, J., e Cabrera, E. (2006). *The Minimum Night Flow Method Revisited*, capítulo 34, pgs. 1–18.
- Girol, G. V. (2008). Análise de perdas reais em um setor do sistema de abastecimento de água no município de capinzal - sc. *Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental - UFSC*.
- Gomes, R., Sá Marques, A., e Sousa, J. (2011). Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems. *Urban Water Journal*, 8(2):65–77.

- Gopan, A. *et al.* (2010). Pressure control for leakage minimization in water distribution network.
- Gross, J. e Ligges, U. (2012). *nortest: Tests for Normality*. R package version 1.0-2.
- Groves, D. e Azagra, E. (2012). Bridging the gap between it and scada systems in the water sector. *Journal: American Water Works Association*, 104(2):26 – 29.
- Hayes, B. (2008). Cloud computing. *Commun. ACM*, 51(7):9–11.
- Hunaidi, O. e Brothers, K. (2007). Night flow analysis of pilot dmas in ottawa. Em *Canada. Loss Specialist Conference, International Water Association, Bucharest, Romania*, pgs. 32–46.
- James, D. A. e DebRoy, S. (2012). *RMySQL: R interface to the MySQL database*. R package version 0.9-3.
- Jankovic-Nisic, B., Maksimovic, C., Butler, D., e Graham, N. (2004). Use of flow meters for managing water supply networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2):171–179.
- Karadirek, I., Kara, S., Yilmaz, G., Muhammetoglu, A., e Muhammetoglu, H. (2012). Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. *Water Resources Management*, 26(9):2555–2568.
- Kingdom, B., Liemberger, R., e Marin, P. (2006). The challenge of reducing non-revenue water (nrw) in developing countries - how the private sector can help : a look at performance-based service contracting. *Water Supply and Sanitation Sector Board discussion paper series no. 8. Washington D.C*, pg. 52.

- Koelbl, J., Mayr, E., Theuretzbacher-Fritz, H., Neunteufel, R., e Perfler, R. (2009). Benchmarking the process of physical water loss management. Em *Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference Cape Town, South Africa*, pgs. 176–183.
- Lambert, V. e Hirner, W. (2000). Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. *IWA Blue Pages*.
- Morrison, J. (2010). Managing leakage by district metered areas: a practical approach.
- Morrison, J., Tooms, S., e Rogers, D. (2007). District metered areas guidance notes. *International Water Association (IWA), specialist group on efficient operation and management of urban water distribution systems, water loss task force, version, 1*.
- Mutikanga, H., Sharma, S., e Vairavamoorthy, K. (2013). Methods and tools for managing losses in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2):166–174.
- MySQL, A. (2000). ‘mysql documentation. Disponível por WWW em <http://www.mysql.com/doc>.
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., e Moridi, A. (2010). Pressure management model for urban water distribution networks. *Water Resources Management*, 24(3):437–458.
- Palau, C., Arregui, F., e Carlos, M. (2012). Burst detection in water networks using principal component analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(1):47–54.
- Peters, E. J. e Ben-Ephraim, Y. (2012). System leakage by night flow analysis: a case study in guyana. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 165:451–457(6).

- R Core Team (2013). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rossmann, L. A. (2000). Epanet 2: users manual.
- SNSA (2013). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgoto - 2011*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.
- Strum, R. e Thornton, J. (2005). Proactive leakage management using district metered areas (dma) and pressure management—is it applicable in north america. Em *IWA Leakage 2005 conference proceedings*.
- Symmonds, G. e Hill, T. (2013). *Using Cloud Dataservice to Save Water*, capítulo 274, pgs. 2768–2775.
- Tabesh, M., Yekta, A., e Burrows, R. (2009). An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. *Water Resources Management*, 23(3):477–492.
- Thornton, J., Sturm, R., e Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control*. McGraw-Hill Professional.
- Tilkov, S. e Vinoski, S. (2010). Node.js: Using javascript to build high-performance network programs. *Internet Computing, IEEE*, 14(6):80–83.
- Tsutiya, M. T. (2006). *Abastecimento de Água*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 4 edition.
- Vaquero, L. M., Rodero-Merino, L., Caceres, J., e Lindner, M. (2008). A break in the clouds: towards a cloud definition. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 39(1):50–55.

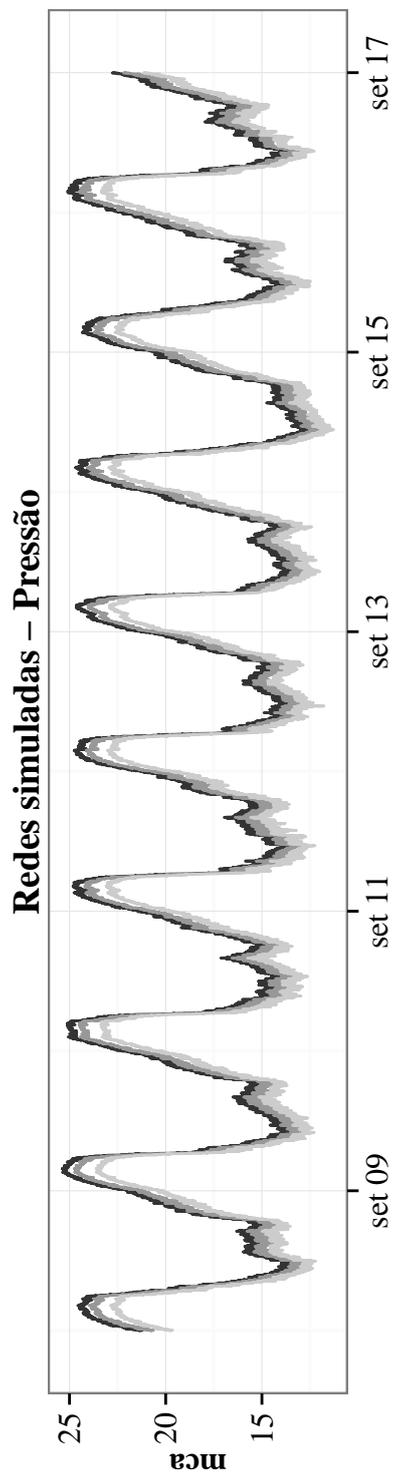
- Vieira, A. C. C. e Carozzi, E. C. (2005). Resultados da metodologia de campo para quantificação das perdas reais físicas e aparentes em sistemas de abastecimento de água da sabesp, como ferramenta de gestão do controle de perdas. Em *23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- WHO, W. H. O. (2001). *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report*. World Health Organization.
- Wickham e Hadley (2007). Reshaping data with the reshape package. *Journal of Statistical Software*, 21(12).
- Wickham, H. (2009). *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. Springer New York.
- Wu, Z. e Khaliefa, M. (2012). *Cloud Computing for High Performance Optimization of Water Distribution Systems*, capítulo 71, pgs. 679–686.

Apêndice A

Gráficos

Neste apêndice estão contidos os gráficos obtidos nas simulações e análises das redes.

A.1 DMC Teste



Redes simuladas – Volume acumulado diário

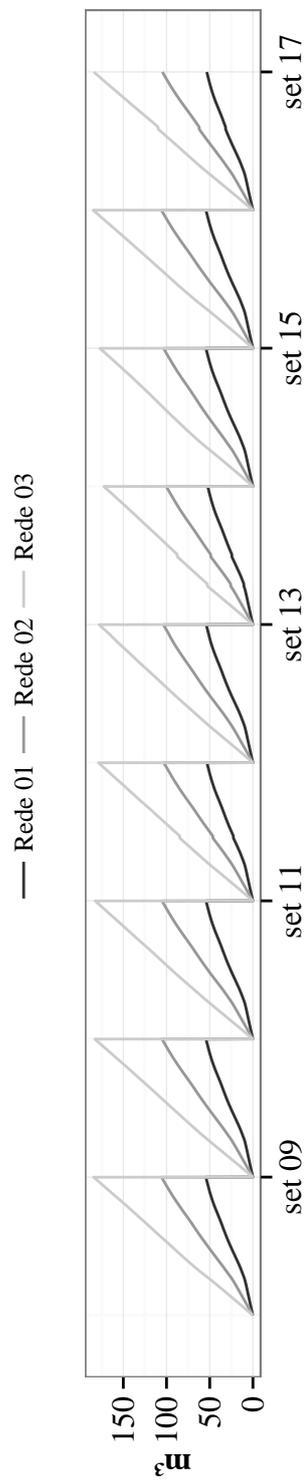


Figura A.1: Pressão e volume na rede simulada

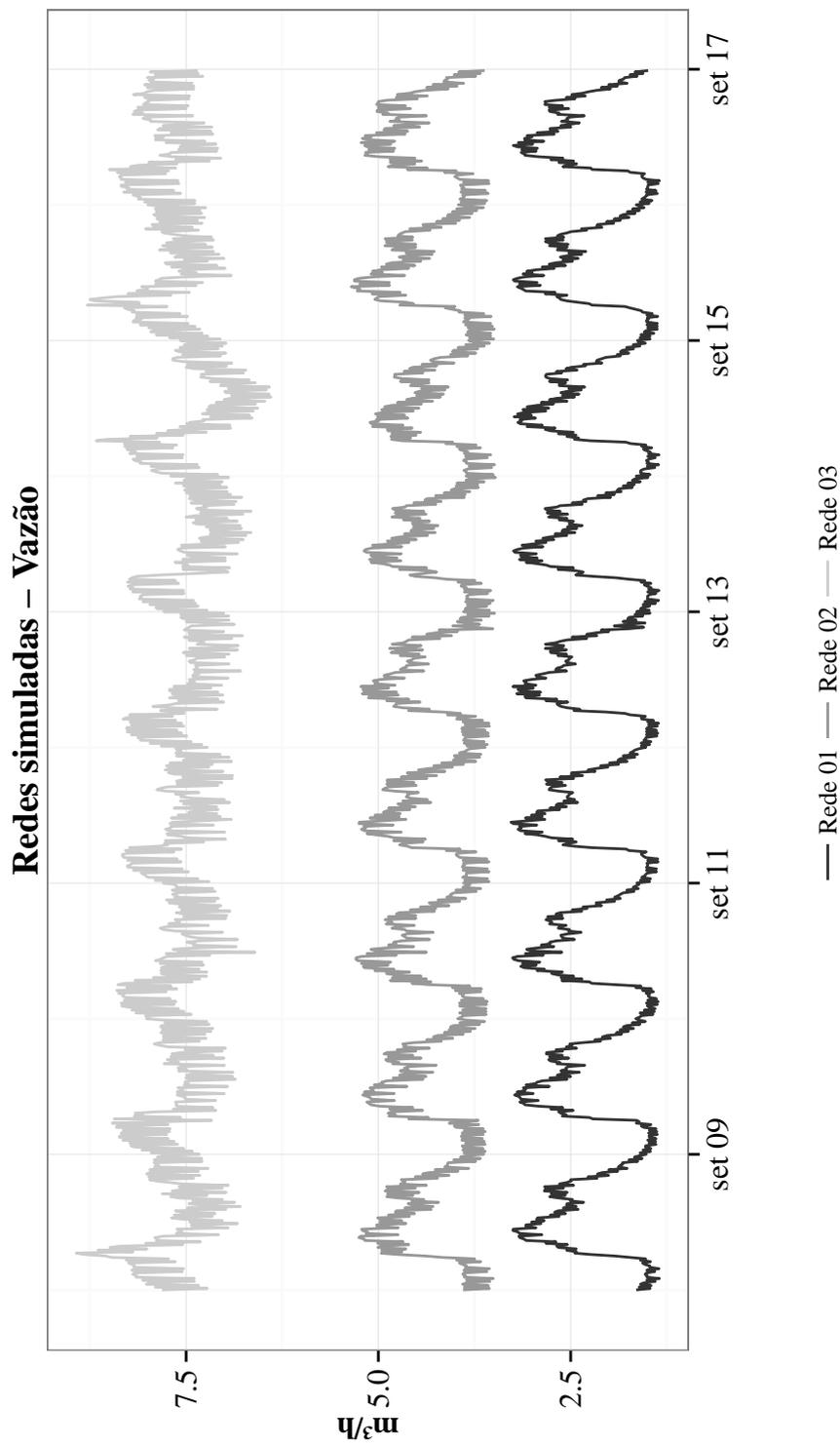


Figura A.2: Vazão na rede simulada

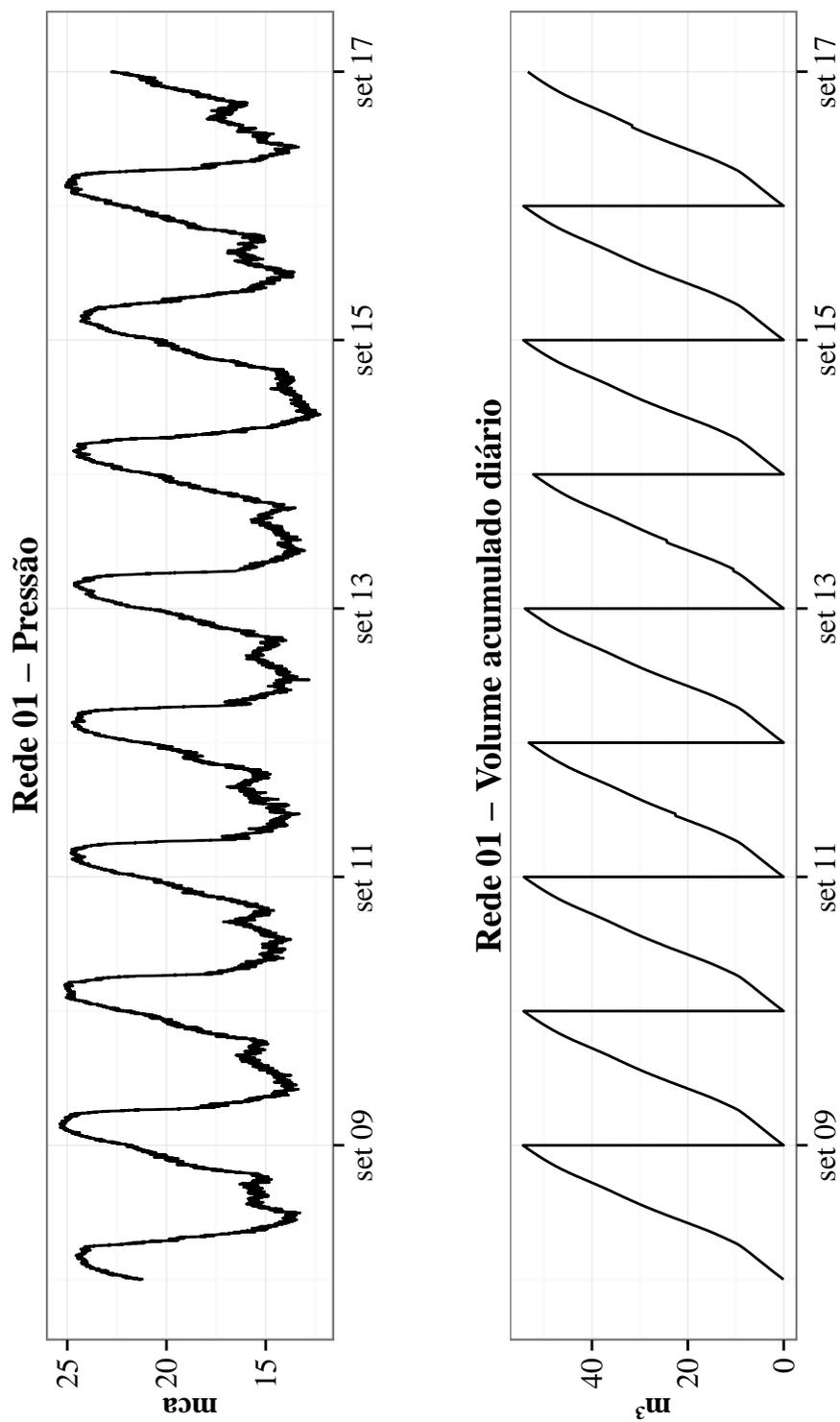


Figura A.3: Rede 01 - Pressão e volume

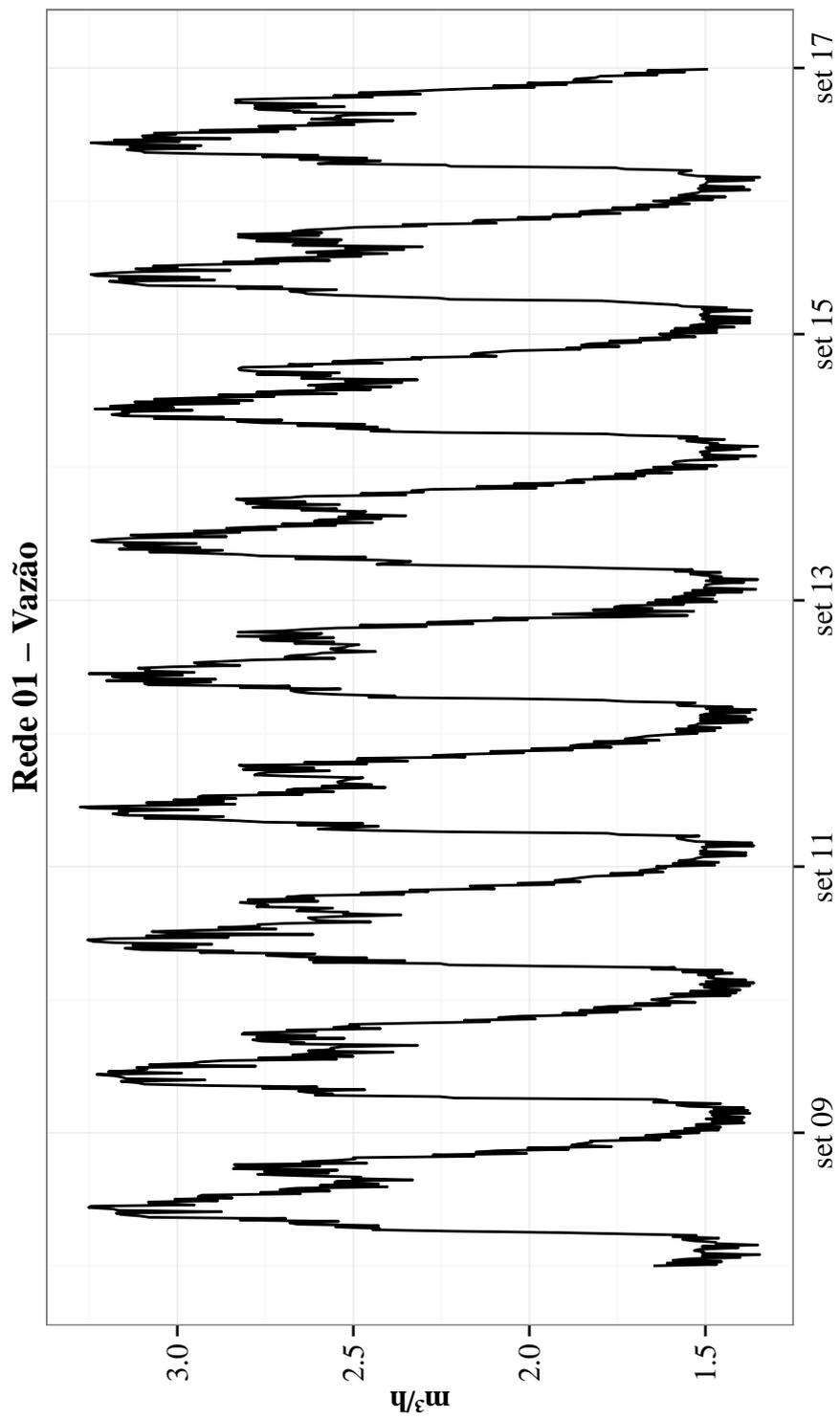


Figura A.4: Rede 01 - Vazão

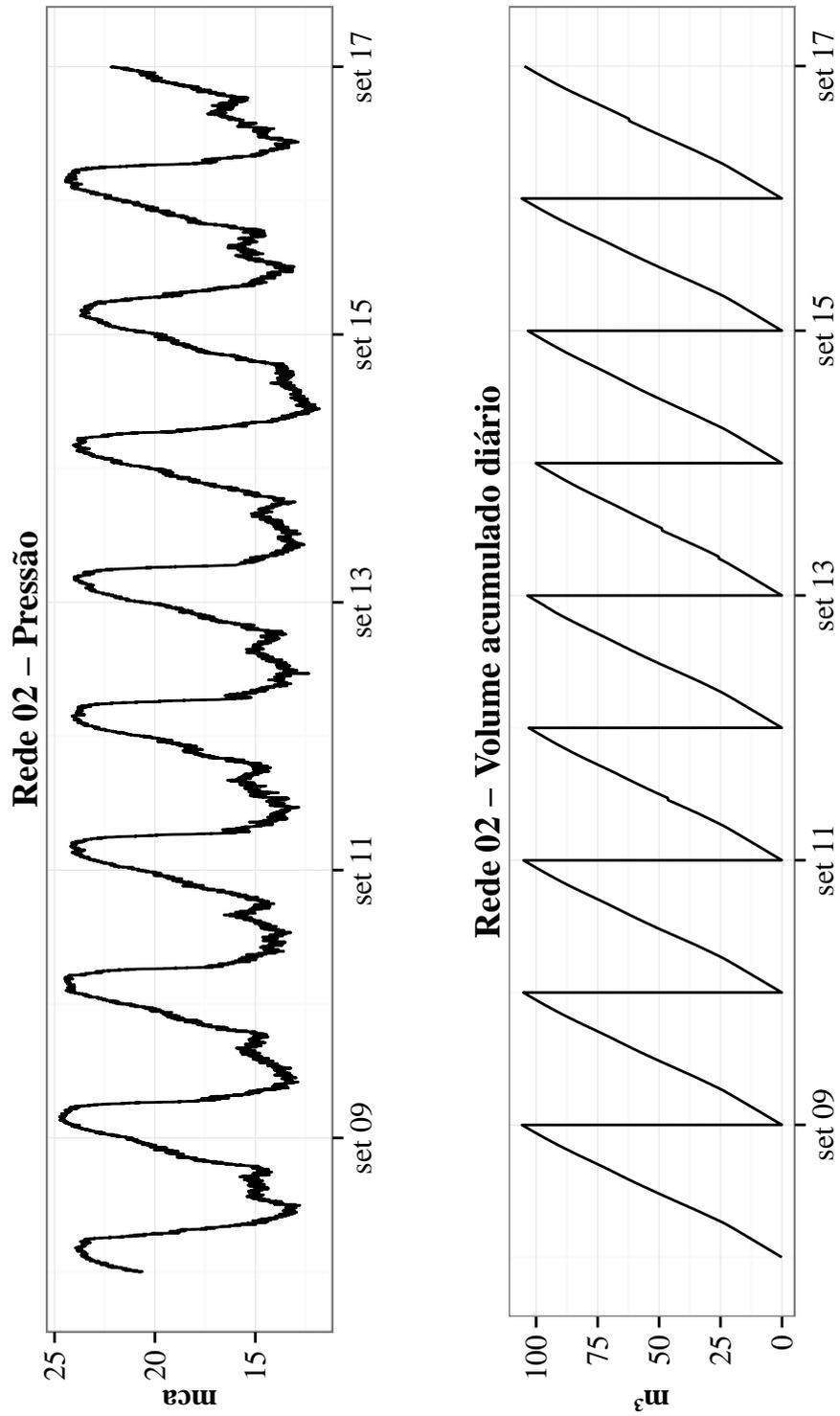


Figura A.5: Rede 02 - Pressão e volume

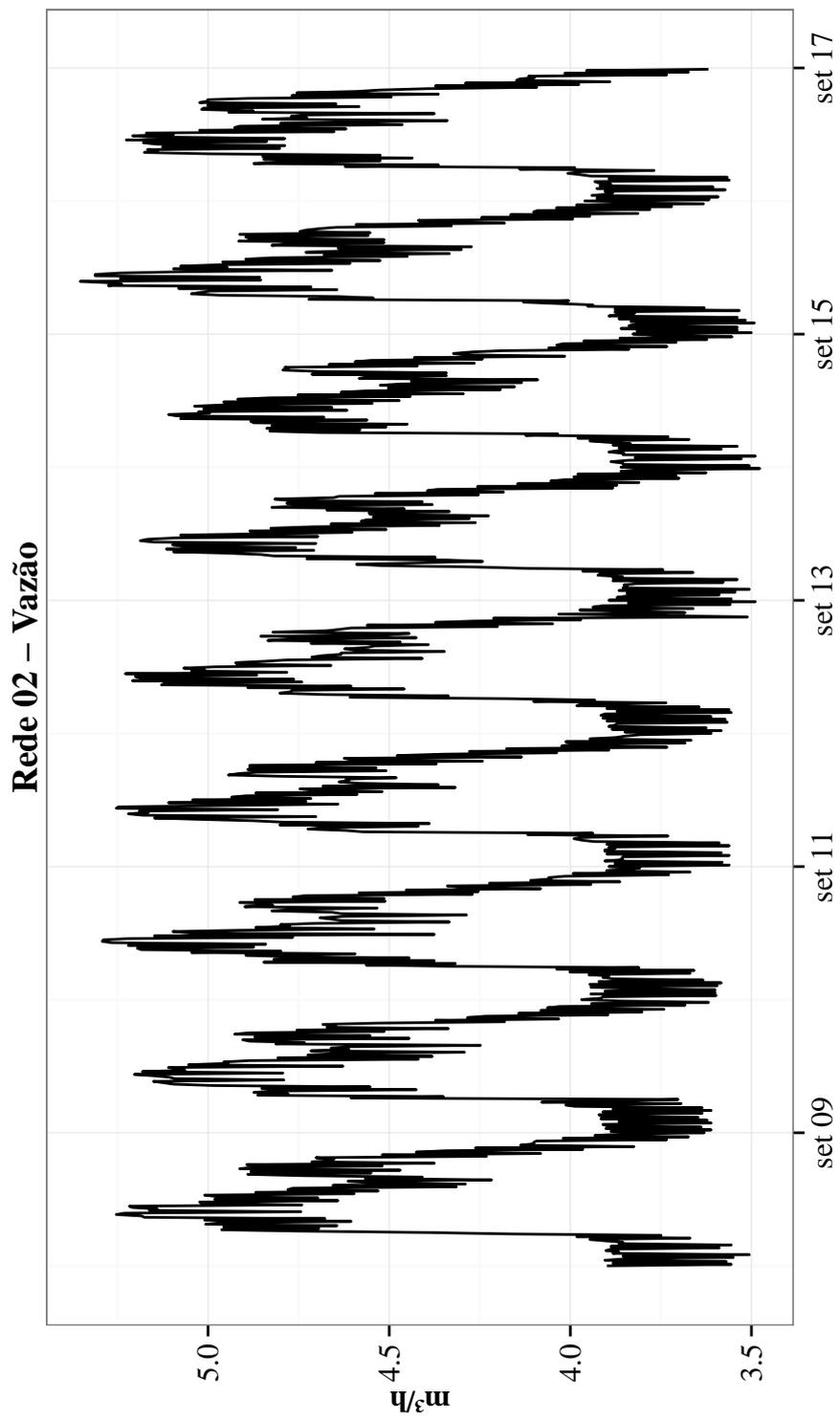


Figura A.6: Rede 02 - Vazão

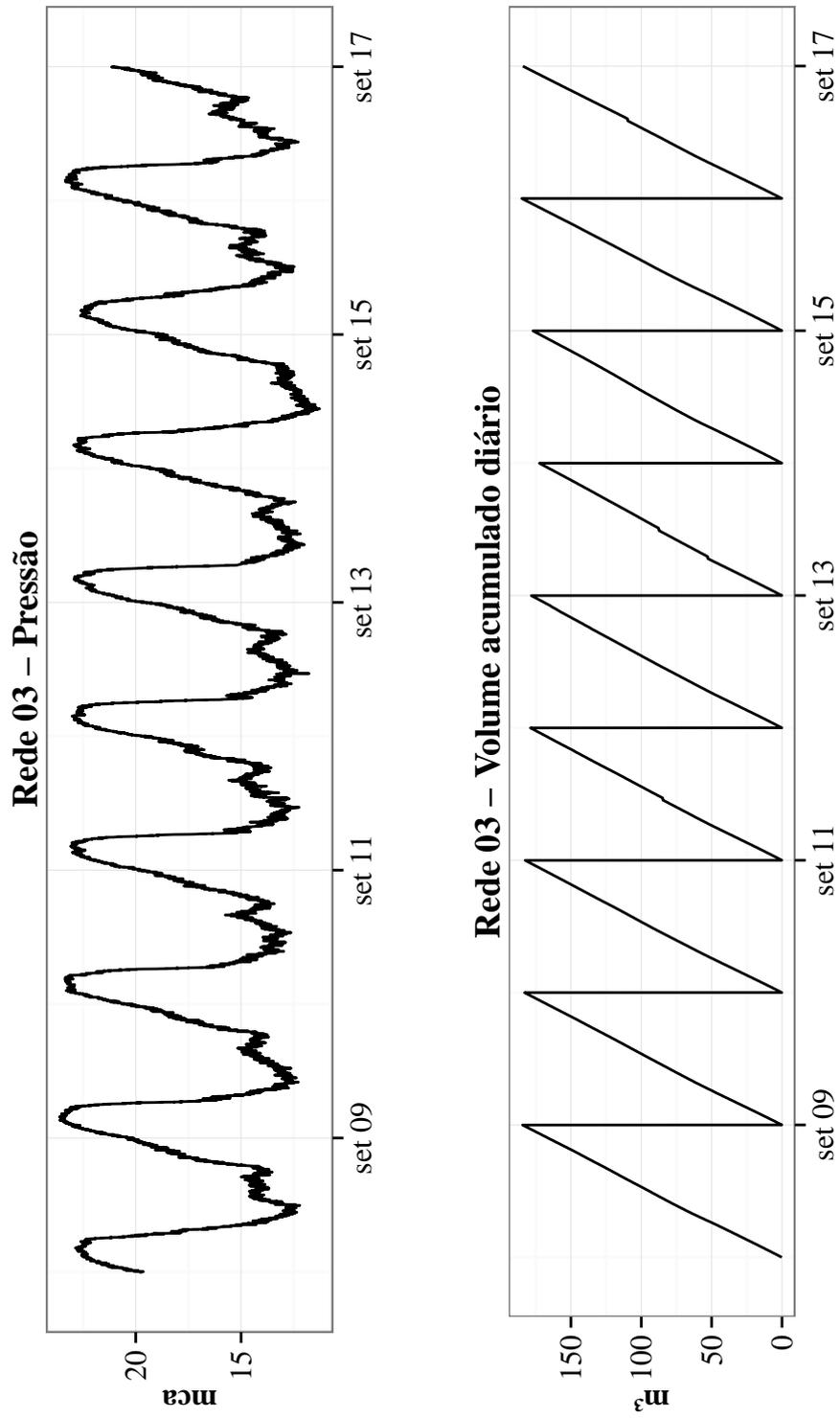


Figura A.7: Rede 03 - Pressão e volume

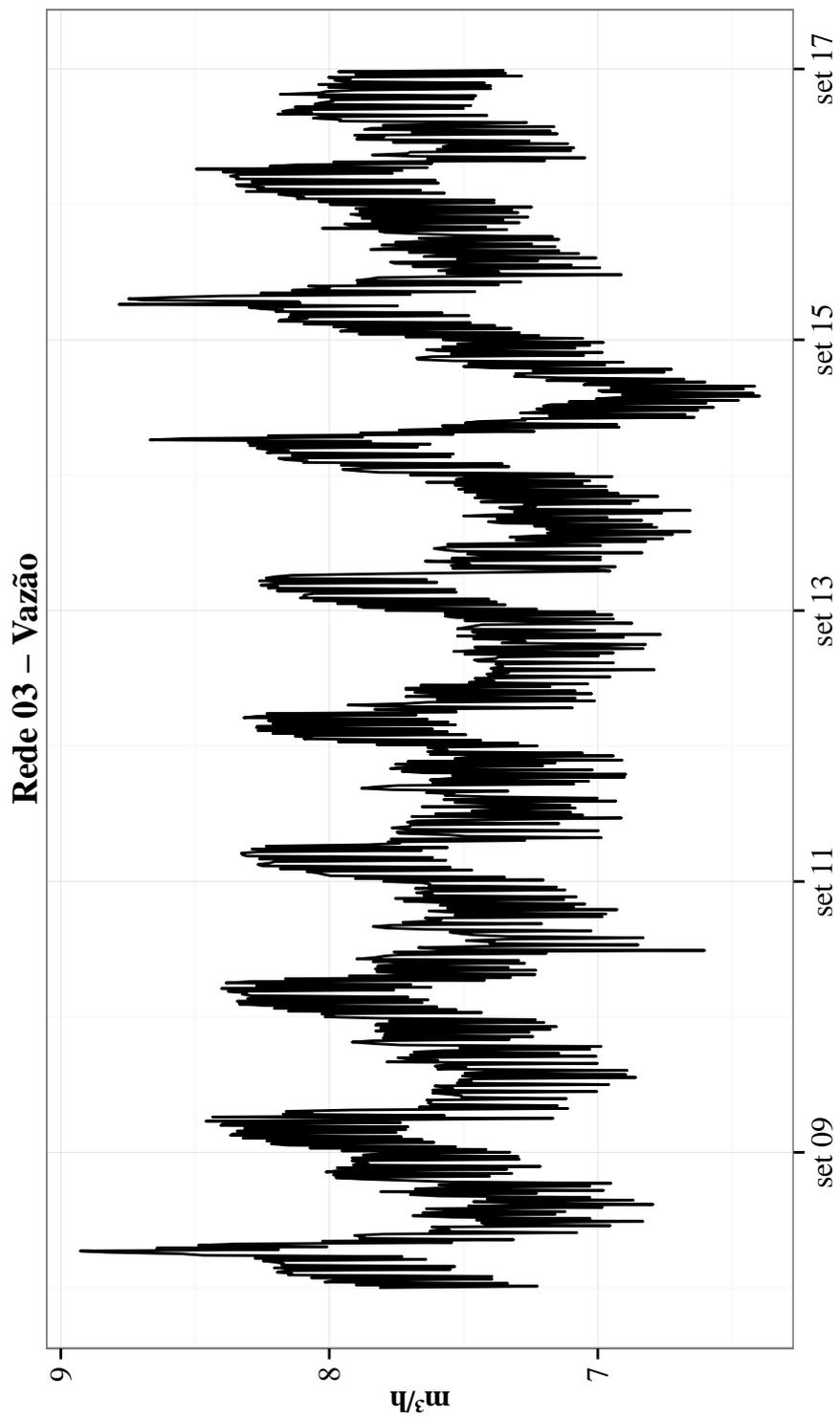


Figura A.8: Rede 03 - Vazão

A.2 DMCs Reais

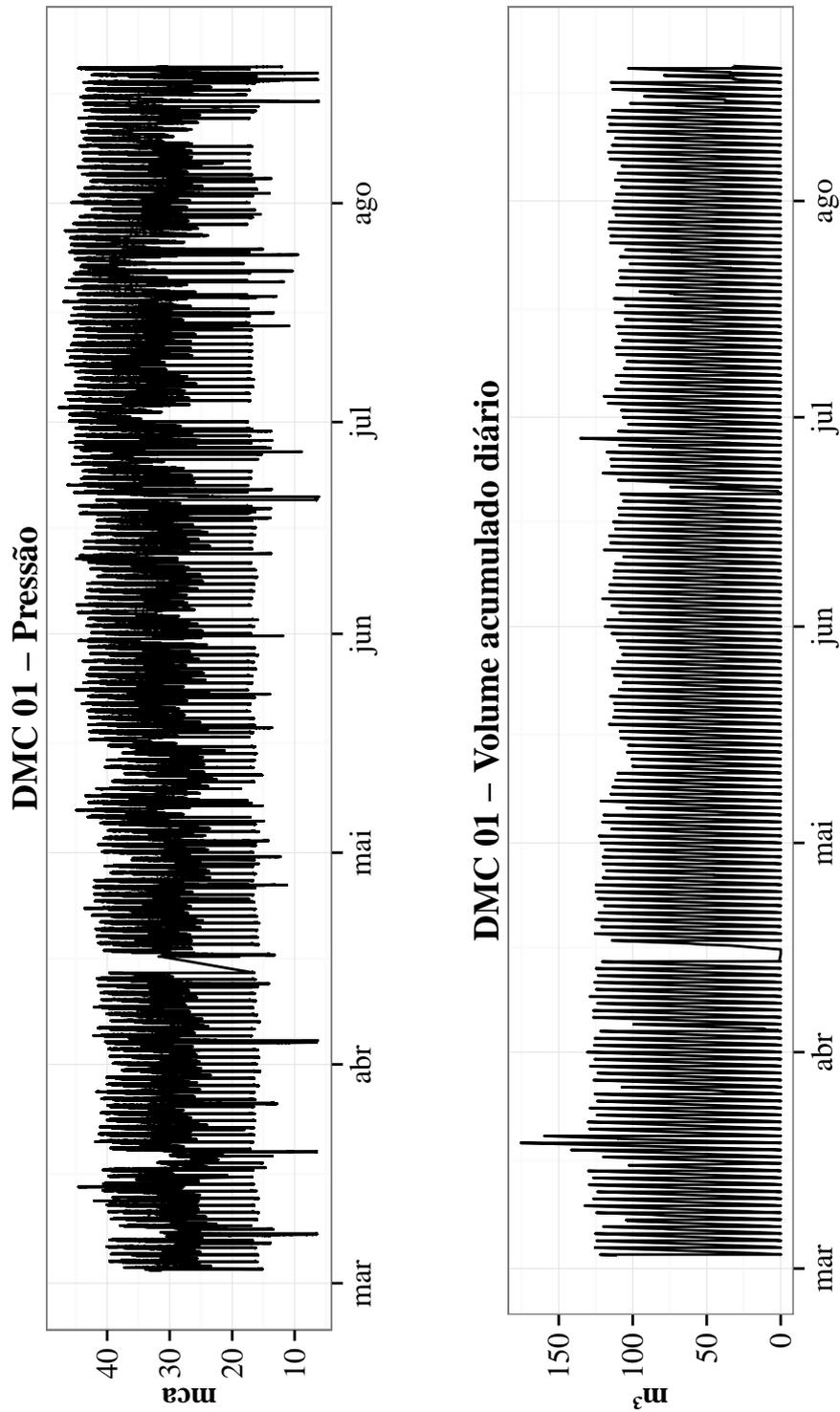


Figura A.9: DMC 01 - Pressão e volume

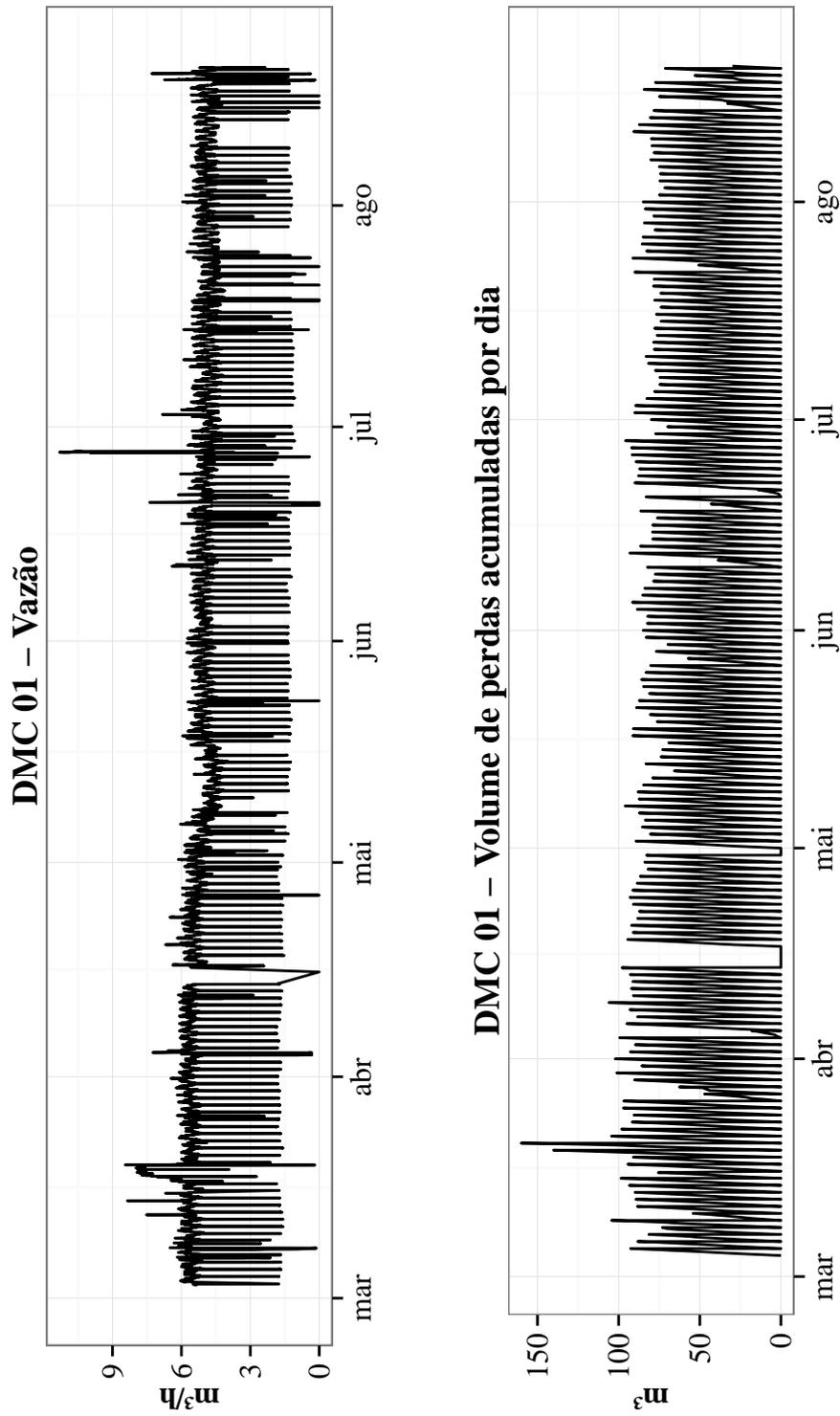


Figura A.10: DMC 01 - Vazão e Perdas estimadas

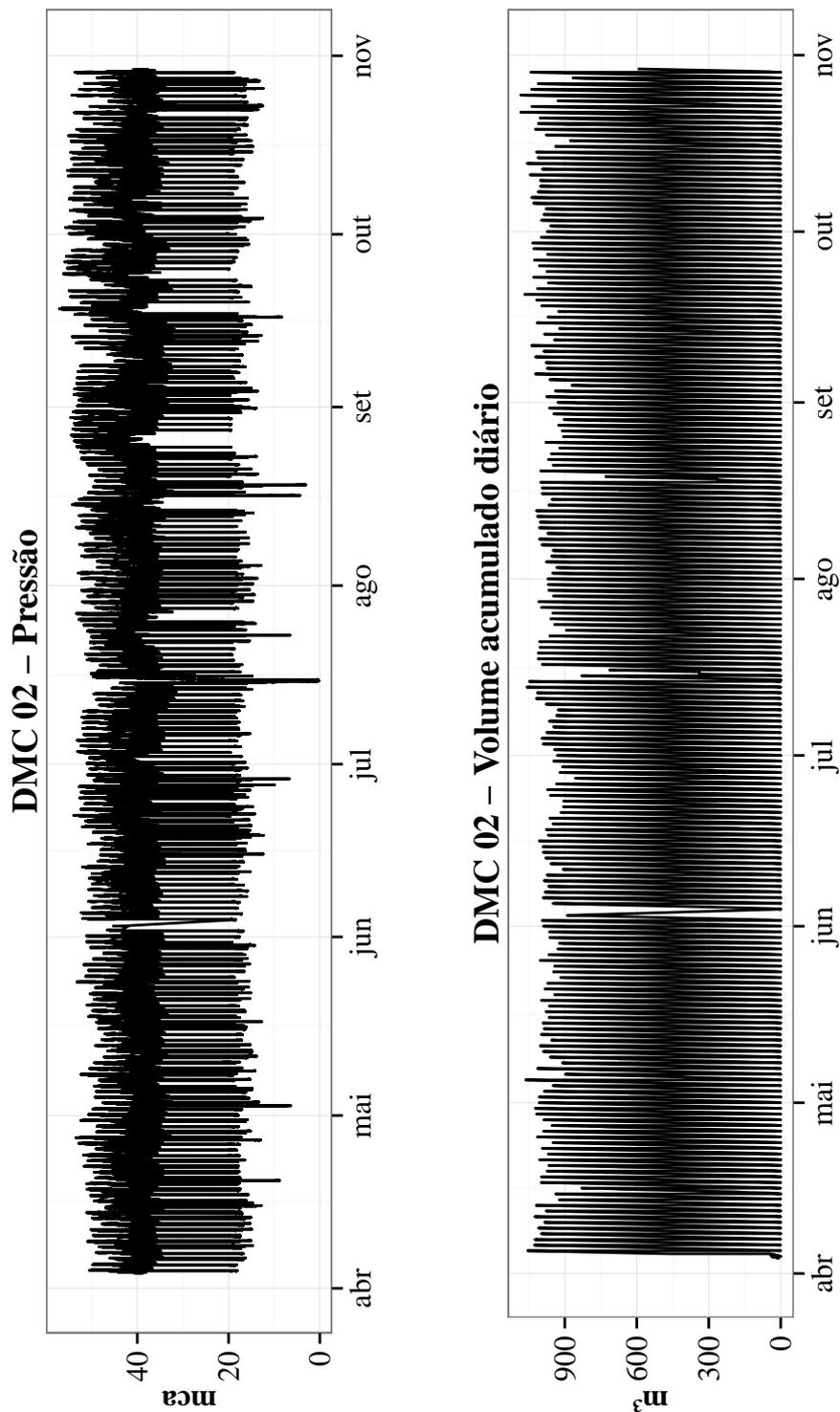


Figura A.11: DMC 02 - Pressão e volume

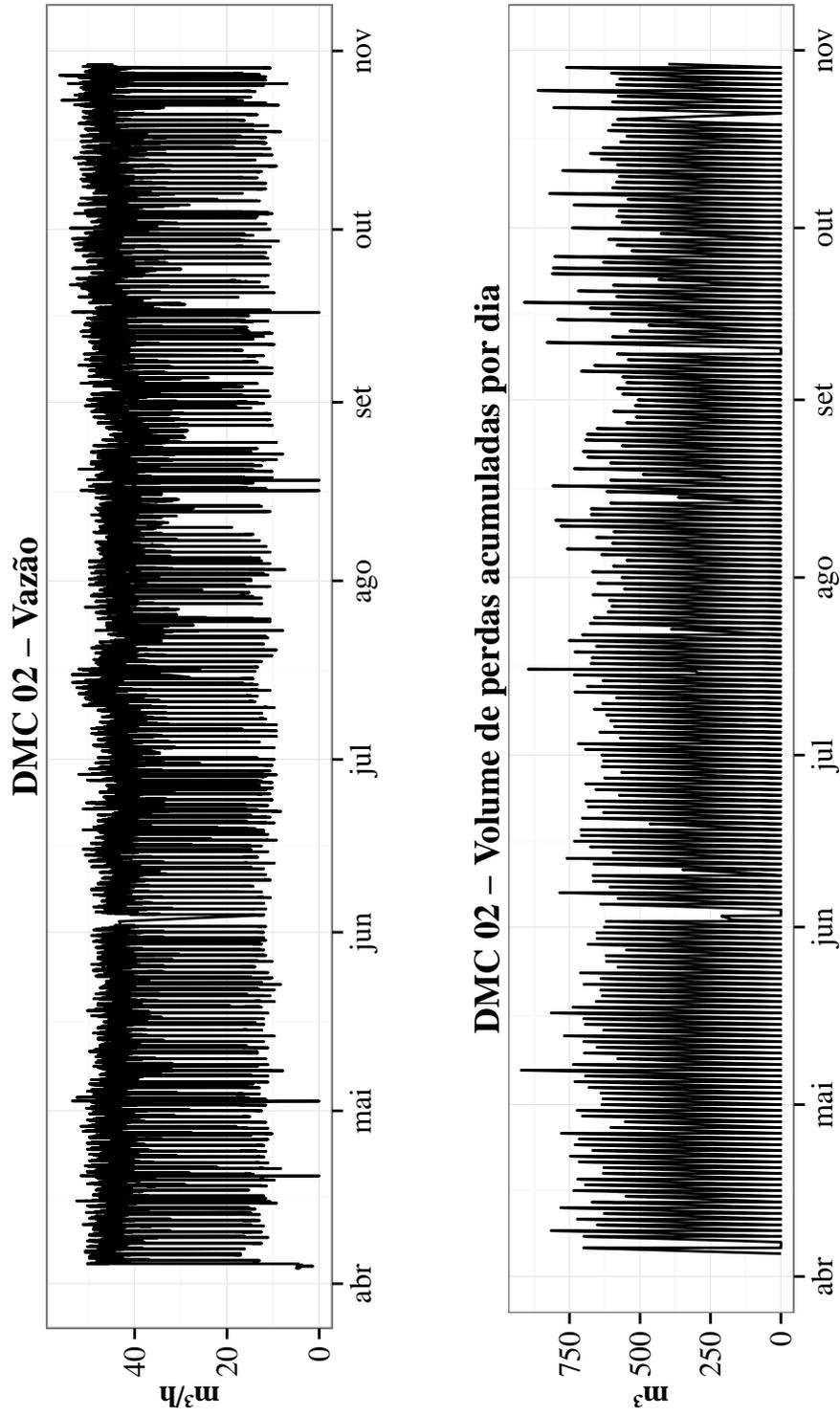


Figura A.12: DMC 02 - Vazão e Perdas estimadas

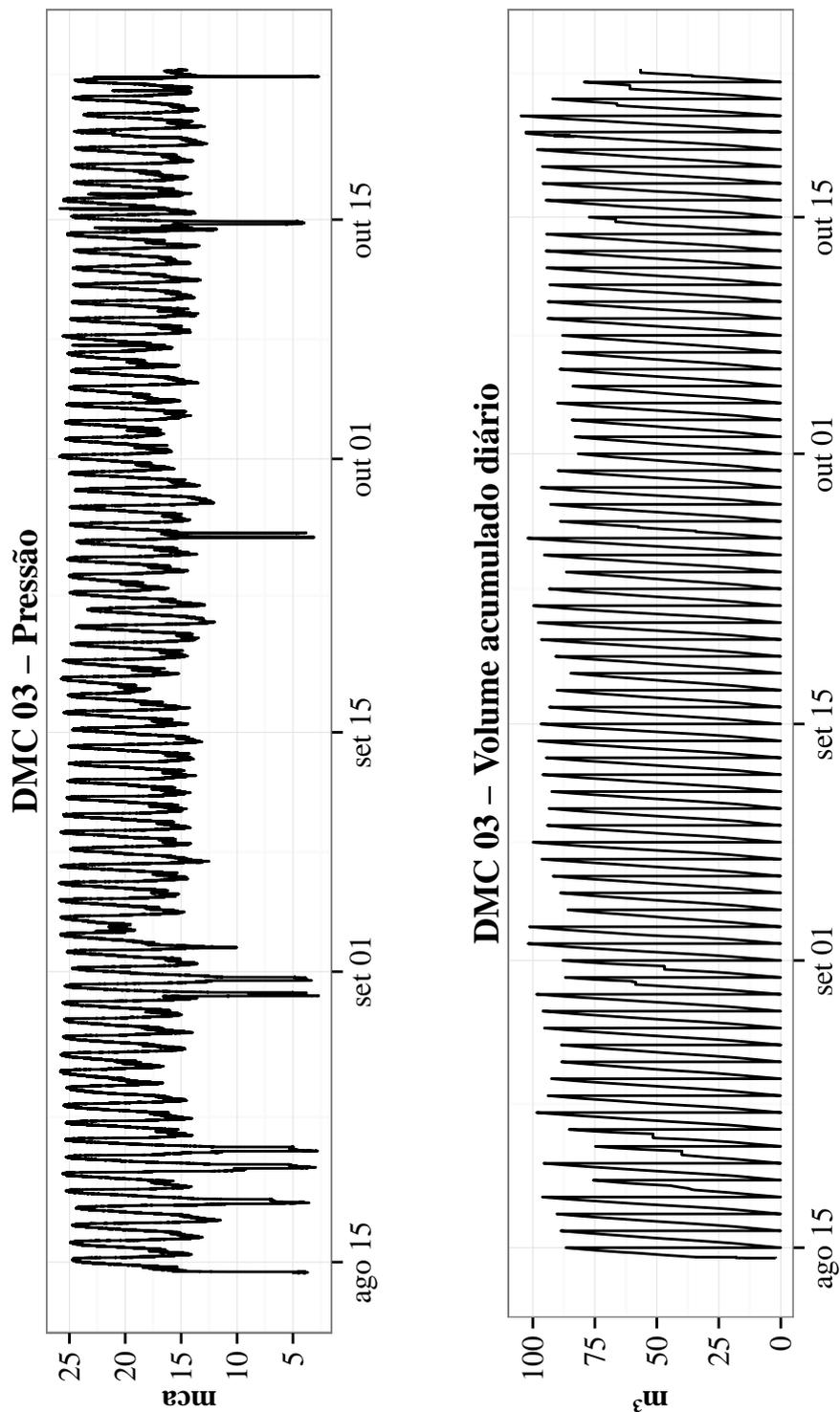


Figura A.13: DMC 03 - Pressão e volume

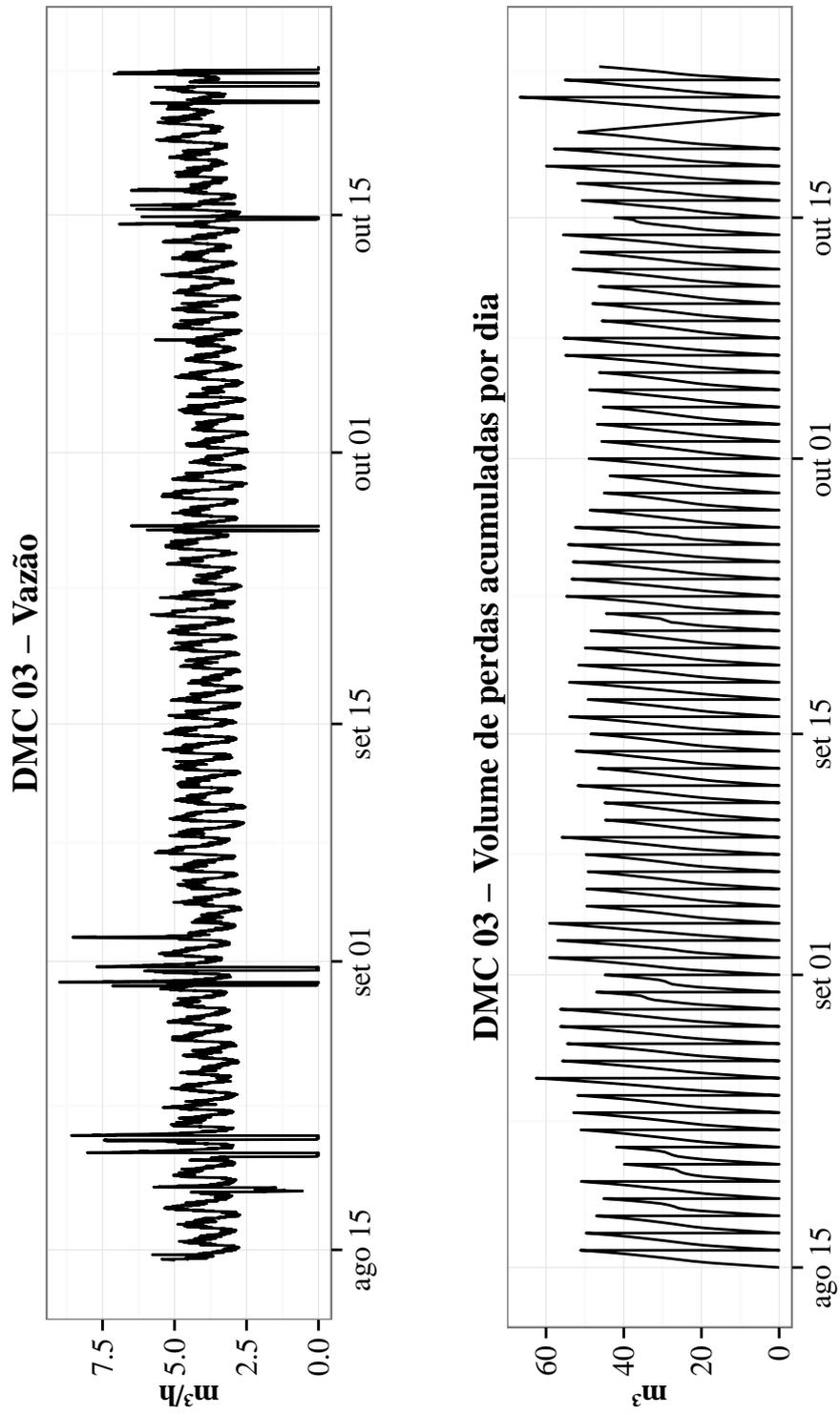


Figura A.14: DMC 03 - Vazão e Perdas estimadas

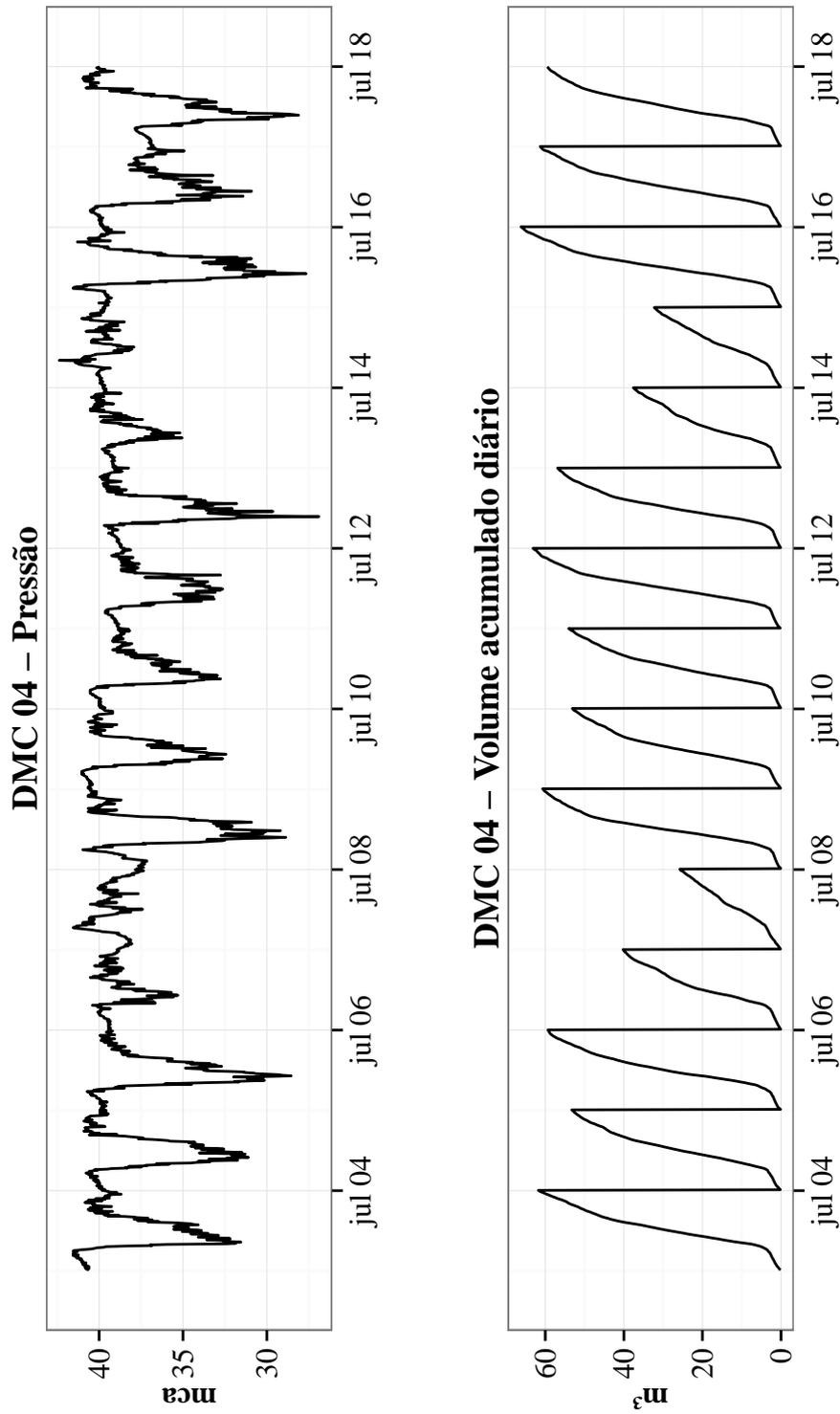


Figura A.15: DMC 04 - Pressão e volume

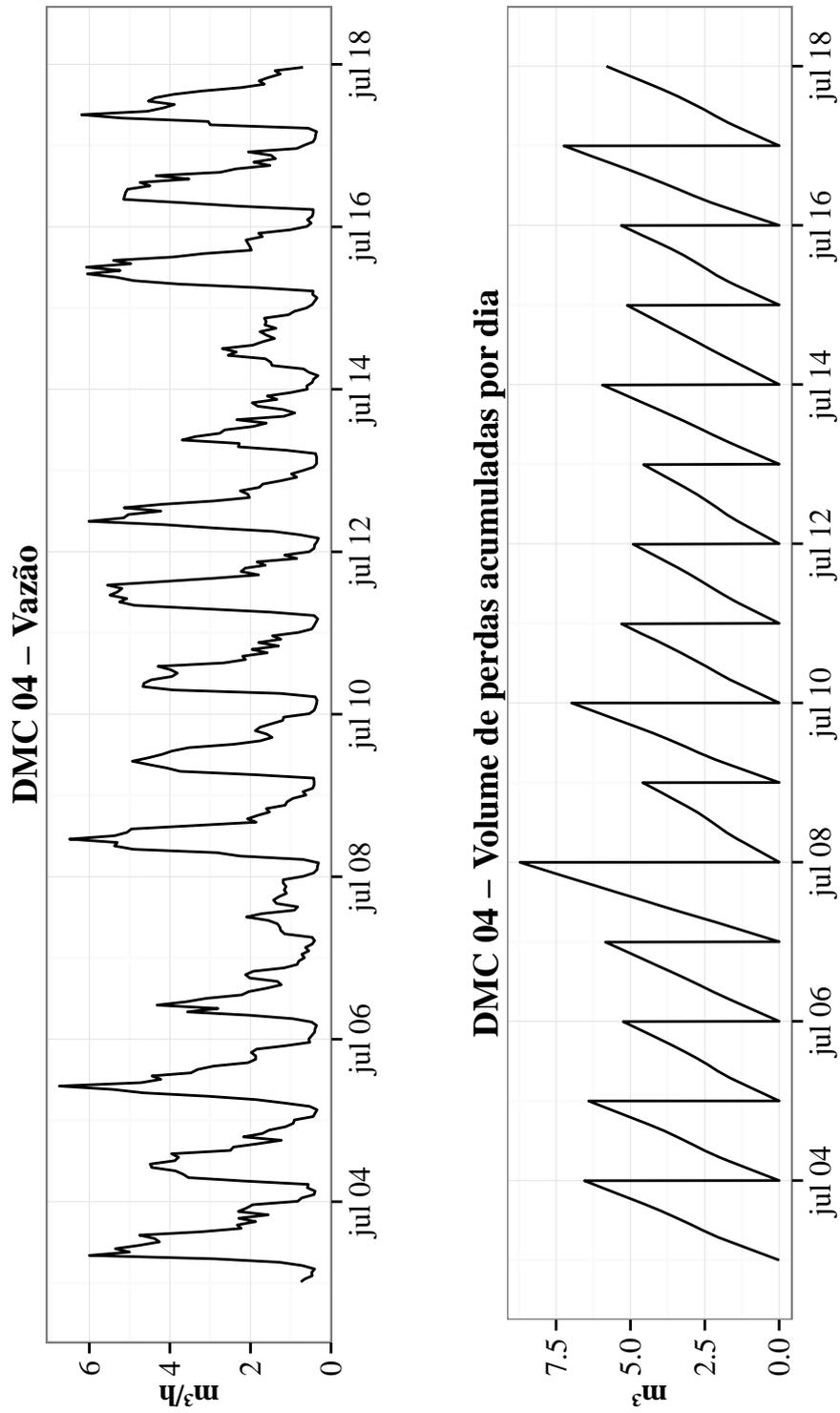


Figura A.16: DMC 04 - Vazão e Perdas estimadas