

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Marielle Rezende de Andrade

Balanco hidroenergético de sistema de distribuição de água aplicado a um setor do município de Cambuí - MG.

ITAJUBÁ, 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

MARIELLE REZENDE DE ANDRADE

**BALANÇO HIDROENERGÉTICO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA
APLICADO A UM SETOR DO MUNICÍPIO DE CAMBUÍ - MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Energia e Meio Ambiente - ESMA

Orientador: Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva

Maio de 2016

Itajubá - MG

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais, minhas irmãs, minha sobrinha, meu companheiro, aos colegas de trabalho, aos ambientalistas que servem de exemplo pela busca por soluções por um mundo melhor e a todos que de alguma maneira já passaram por períodos de escassez de água.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos os santos que sempre nos guiam, nos protegem, nos dão forças para alcançar os objetivos e nos confortam em todos os momentos.

Ao professor e orientador Dr. Fernando das Graças Braga da Silva, pela confiança e pelo empenho em atender e buscar soluções para os novos desafios.

Aos meus parceiros de trabalho Thaisa Dias de Castro Goulart, Lucas Ribeiro Fortes e Fernando Soares que sempre se mostraram dispostos e alegres para resolver todos os problemas. A todos os integrantes da REDECOPE / FINEP - Desenvolvimento de tecnologias e procedimentos eficientes para a gestão hidroelétrica em sistemas de abastecimento de água - 983-10, que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho. À FINEP, CAPES e FAPEMIG pelas bolsas de estudos concedidas durante o período do mestrado, financiamento de equipamentos e apoio a eventos educacionais.

Ao SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de Cambuí (MG), em especial ao ex-diretor do SAAE Alex Manólio e ao atual diretor Luiz Paulo, que disponibilizaram tempo e equipe para colaborar na coleta de dados e ensaios de campo. Menção especial ao técnico do SAAE Marcos (Marquinho), que não poupou esforços para atender todas as demandas do grupo de pesquisa e aos demais colaboradores envolvidos, em especial Vânia, Gabriela, Décio, Lucas e Letícia.

Aos professores do curso de pós-graduação em Engenharia de Energia pela experiência e conhecimentos repassados durante as disciplinas ministradas.

À UNIFEI, instituição de renome por permitir estudos através de sua estrutura, em específico ao NUMMARH - Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos, além dos técnicos dos laboratórios, que disponibilizaram equipamentos e tempo para esclarecimentos.

Aos meus pais Miguel e Marta que me deram suporte e estrutura para finalizar o trabalho, além de minhas irmãs Maira, Marcela e Marissa pela ajuda financeira e psicológica nos estudos, nos perrengues e nas alegrias. Agradeço também a minha querida sobrinha Maria Eduarda pelos momentos de descontração. Ao Diego Toledo Bonillo Fernandes pela parceria e paciência de sempre. Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

RESUMO

Os sistemas de abastecimento de água são colocados à prova constantemente, principalmente em condições climáticas extremas. A gestão adequada dos recursos hídricos e a implementação de planos de saneamento no Brasil são necessidades crescentes e emergenciais. Os desafios enfrentados pelas concessionárias se tornam evidentes e a aplicação de melhorias se faz imprescindível para garantia da continuidade do abastecimento. O objetivo deste trabalho é apresentar e avaliar o balanço hidroenergético de um setor da rede de distribuição de água do município de Cambuí-MG, visando a otimização do sistema e redução do consumo de energia. Foram coletadas informações junto à concessionária local e também dados de campo, que abasteceram o trabalho e proporcionaram a aplicação da metodologia de balanço hídrico proposta pela *International Water Association - IWA*. O balanço energético foi estimado a partir da adaptação da metodologia de Cabrera *et al.* (2010) e os resultados obtidos permitiram uma avaliação da realidade do sistema. O setor em estudo apresentou 28,42% de perdas totais e um consumo de energia de 0,6481kWh/m³.

Palavras-chave: Sistemas de abastecimento de água, perdas de água, eficiência hídrica e energética, balanço hidroenergético.

ABSTRACT

The water system supplies are constantly being stretched to the limit, mainly in extreme climate conditions. The appropriate water resources management and sewerage implementation in Brazil are in critical need of development. The challenges being faced for the concessionaires to become evident and the application of improvements make itself indispensable for water supply sustainability. The purpose of this project is to present and evaluate a hydro energetic solution for a sector water distribution network in the city of Cambuí-MG, looking for system optimization and a sustainable cost reduction for consumers. Information was being compiled for the local concessionaire which applied for the project and provided the application for the International Water Association - IWA hydric balance methodology. The energy balance was estimated from the methodology adaptation of Cabrera *et al.* (2010) and the results revealed data of a real system. The study sector showed a 28,42% of total leakages and the energy consumed was 0,6481kWh/m³.

Key words: Water distribution system, water losses, hydraulic efficiency and energy, hydro energetic balance

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de um sistema de abastecimento de água (Fonte: SOARES, 2004 <i>apud</i> MOTTA, 2010).....	18
Figura 2 - Perdas no sistema de abastecimento de água (adaptado de SILVA E CONEJO, 1998 <i>apud</i> CHEUNG, 2004).....	20
Figura 3 - Estratégia de controle de perdas de água. (Baseado em: LAMBERT e HIRNER, 2000 <i>apud</i> MORAIS, CAVALCANTE e ALMEIDA, 2010).....	21
Figura 4 - Volume de controle de uma rede de água dentro dos termos de balanço energético (Fonte: Baseado em Cabrera <i>et al.</i> , 2010).....	31
Figura 5 - Localização do município de Cambuí-MG (Fonte: Google Mapas, 2015) ...	37
Figura 6 - Vista panorâmica do município de Cambuí-MG.....	38
Figura 7 - Dados do município de Cambuí. (Fonte: ANA, 2010).....	39
Figura 8 - Croqui do sistema de água de Cambuí-MG. (Fonte: ANA, 2010).....	40
Figura 9 - Córrego Rio do Peixe (ou Usina Cachoeira Cinco Irmãos), ETA e Rio das Antas (Fonte: Google Earth, 2015).....	41
Figura 10 - ETA de Cambuí. (Foto: SAAE, Cambuí).....	42
Figura 11 - Setor de estudo em Cambuí-MG (Fonte: Google Earth, 2015)......	42
Figura 12 - Reservatórios também abastecidos por R3, mas que não fazem parte do setor de estudo (Fonte: Google Earth, 2015).....	43
Figura 13 - Reservatório R3 e sucção das bombas.....	44
Figura 14 - Reservatório retangular em R4.....	44
Figura 15 - Reservatório cilíndrico em R4 e dados do reservatório fornecidos pelo fabricante (Fonte: Agrometal, 2015).....	45
Figura 16 - Diagrama reservatório R4 (Fonte: GOULART, 2014).....	45
Figura 17 - Esquema do setor de estudo de Cambuí (Fonte: Adaptado de materiais da REDECOPE / Autoria Fernando Soares).....	46
Figura 18 - Diâmetro das tubulações do setor de estudo (Fonte: GOULART, 2014)....	47
Figura 19 - Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	47
Figura 20 - Reunião com a equipe do projeto REDECOPE - Itajubá (abril/2014).....	48
Figura 21 - Teste de bancada e configuração do medidor de vazão ultrassônico.....	49
Figura 22 - Testes de calibração dos medidores de pressão.....	49
Figura 23 - Caixa para alocação dos medidores em R3 (a) e em R4 (b).....	50
Figura 24 - Equipe multidisciplinar UNIFEI e responsáveis do SAAE Cambuí.....	50
Figura 25 - Coleta de dados geográficos em Cambuí: a) base e b) rede de estudo (junho de 2014).....	51
Figura 26 - Medidores vazão (ultrassônicos) e de pressão instalados em R4.....	51
Figura 27 - Medidor de pressão instalado em uma das residências monitoradas.....	52
Figura 28 - a) Medição do cavalete até ao centro da rua; b) medição do centro da rua até o local de coleta de dados topográficos, em Cambuí, MG (outubro/2014).....	52
Figura 29 - Medidores de vazão (ultrassônicos) e de pressão instalados em R3.....	53
Figura 30 - Medidor de parâmetros de energia instalado na casa de bombas no R3.....	53
Figura 31 - a) Transdutor de nível submerso instalado no reservatório retangular (R4); b) transdutor de nível instalado na parede do reservatório cilíndrico (R4).....	54

Figura 32 - Medidores de vazão ultrassônicos em R3.....	55
Figura 33 - a) Equipamentos protegidos com plástico e caixote de madeira; b) Reforço da segurança nos locais de instalação dos medidores de vazão e pressão.....	55
Figura 34 - a) Reparo do vazamento na Rua Xavantes, dia 13/10/2014; b) Equipe do SAAE Cambuí responsável pelo reparo	56
Figura 35 - a) Coleta de dados geográficos no registro do bairro Vale das Montanhas; b) Teste de abertura do registro no Bairro Vale do Sol (outubro/2014)	57
Figura 36 - Localização dos medidores de pressão e registros nos bairros Água Branca, Vale do Sol e Vale das Montanhas	58
Figura 37 - Localização dos medidores de pressão e registros no bairro Vila Mariana. 59	
Figura 38 - a) Receptor GPS utilizado para coleta de dados; b) Coleta de dados geográficos com o receptor GPS e a antena (ao fundo um reservatório)	59
Figura 39 - a) Coleta de dados geográficos na Cachoeira 5 Irmãos; b) Trajeto de acesso a captação na Cachoeira 5 Irmãos	60
Figura 40 - Ponto de captação no Rio das Antas.....	60
Figura 41 - Rio das Antas e ponto de captação vistos da Rodovia Fernão Dias	60
Figura 42 - a) Medidores de pressão e vazão instalados na entrada do sistema; b) Equipe de trabalho durante ensaio da madrugada (maio/2015).....	61
Figura 43 - a) Medidor de vazão ultrassônico; b) Medidor de pressão	61
Figura 44 - Bombas do sistema de abastecimento e placa de modelo das bombas.....	62
Figura 45 - Painel de comando dos motores.....	63
Figura 46 - Medidas realizadas no conjunto motobomba.....	65
Figura 47 - Local de instalação dos transdutores	65
Figura 48 - Transdutores de pressão instalados.....	66
Figura 49 - Monitoramento de pressão nos nós: a) 141 e b)153 (dia 09/10/2014).....	71
Figura 50 - Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão, gerado pelo EPANET (Baseado em: Goulart, 2015)	73
Figura 51 - Variação de vazão ao longo dos 7 dias de monitoramento.....	76
Figura 52 - Variação de vazão na entrada do setor, durante o dia 09/10/2014	76
Figura 53 - Consumo de água ao longo do ano no setor de estudo	79
Figura 54 - Perdas reais do setor estimadas a partir de diferentes métodos	84
Figura 55 - Demanda de potência elétrica do R3 durante o dia 10/10/2014	86
Figura 56 - Consumo mensal de energia elétrica em R3 (dados do SAAE)	88
Figura 57 - Consumo diário de energia elétrica em R3 (dados medidos em campo).....	89
Figura 58 - Consumo de energia elétrica e reagentes por m ³ relativos ao setor de estudo	94
Figura 59 - Contribuições do sistema de água e da ETA nas despesas do SAAE	95
Figura 60 - Relação entre despesas orçamentárias e energia elétrica do sistema de distribuição de água de Cambuí-MG.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índice de perdas na distribuição de água dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2014	20
Tabela 2: Fraudes em ligações de água na África do Sul e porcentagem de perdas aparentes, conforme a Universidade Loughborough	23
Tabela 3: Variação do coeficiente N_l em relação ao tipo de tubulação	25
Tabela 4: Componentes da vazão mínima noturna.....	25
Tabela 5: Gestão estratégica de perdas.....	26
Tabela 6: Tipos de perdas e sua contribuição (em porcentagem) relativa às perdas totais na cidade de Arequipa, Peru	30
Tabela 7: Consumo de energia associado a sistemas de abastecimento de água	32
Tabela 8: Balanço de energia do município de Denia, Espanha	32
Tabela 9: Vazão de água fornecida por fontes distintas, em condições normais.	39
Tabela 10: Localização dos registros no setor de estudo	58
Tabela 11: Dados nominais das bombas	62
Tabela 12: Dados nominais dos motores.....	63
Tabela 13: Balanço Hídrico.....	67
Tabela 14: Balanço energético para rede de distribuição de água.....	69
Tabela 15: Médias horárias de pressão (mca) e Fator Noite/Dia (<i>FND</i>).....	74
Tabela 16: Vazão bombeada por R3 até R4 (abastece setor e outros bairros)	75
Tabela 17: Dados de vazão obtidos durante a campanha de campo.....	77
Tabela 18: Representatividade do setor de estudo na rede de distribuição de Cambuí..	77
Tabela 19: Balanço hídrico do setor em estudo, em Cambuí, MG.....	78
Tabela 20: Consumo real (água faturada) e número de ligações.....	79
Tabela 21: Vazão de entrada, água faturada e não faturada referentes a out./2014	80
Tabela 22: Dados utilizados para o cálculo da vazão de perdas, através do MMN	81
Tabela 23: Vazão de entrada e perdas reais, calculados pelo MMN.....	82
Tabela 24: Comparação entre vazões mínimas de outubro/2014 e maio/2015	83
Tabela 25: Comparação das perdas totais estimadas via diferentes metodologias.....	84
Tabela 26: Comparação dos ensaios das bombas de R3 (campo x laboratório).....	87
Tabela 27: Comparação de dados de consumo de energia elétrica em R3.....	89
Tabela 28: Consumo de energia em R3, na captação, na ETA e proporcional ao setor. 90	
Tabela 29: Balanço de energia do setor em estudo, em Cambuí-MG.....	91
Tabela 30: Consumo de reagentes utilizados na ETA e estimativa de perdas	93
Tabela 31: Estimativas de custo de água do SAAE (baseado em dados reais)	96
Tabela 32: Despesas estimadas relativas às perdas no setor de estudo	96
Tabela 33: Estimativas de despesas com energia elétrica, proporcionais ao setor.....	98
Tabela 34: Valor monetário da energia elétrica em comparação com as despesas orçamentárias do sistema de distribuição de água de Cambuí-MG	99

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Informações complementares sobre os mananciais de abastecimento (Fonte: SAAE, 2015).....	112
ANEXO B - Rugosidades, vazões e perdas de carga simuladas por Goulart (2015) utilizadas para estimativa da perda de energia por atrito.....	112

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ADM	Administração
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DTA	Documento Técnico de Apoio
E.A.B.	Elevatória de Água Bruta
EPANET	Simulador Hidráulico - <i>Environmental Protection Agency Software</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
<i>FND</i>	Fator Noite/Dia
fofo	Ferro fundido
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPA	Índice de Perda de Água
IWA	<i>International Water Association</i> (Associação Internacional de Água)
MMN	Método do Mínimo Noturno (Vazões Mínimas Noturnas)
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NUMMARH	Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos
pba	Ponta bolsa anel
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PNCDA	Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água
PVC	Cloreto de Polivinila
R3	Reservatório 3
R4	Reservatório 4
REDECOPE	Rede Cooperativa de Pesquisas
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SAAE	Sistema Autônomo de Água e Esgoto
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

LISTA DE SÍMBOLOS

B1	Bomba 1
B2	Bomba 2
D	Diâmetro interno da tubulação
DN	Diâmetro nominal
E_{atr}	Energia perdida devido a atritos
E_{bomb}	Energia das bombas
E_{dissip}	Energia dissipada
E_{ent}	Energia de entrada
E_{perd}	Energia relativa às perdas
E_{nat}	Energia natural
$E_{saíd}$	Energia de saída
E_{usu}	Energia entregue aos usuários
f	Fator de atrito, obtido através do diagrama de Moody
g	Aceleração da gravidade
H_p	Perdas de carga
Δh_i	Perda de carga de cada trecho do setor
L	Comprimento da tubulação
n	Número de nós do setor
η	Rendimento do equipamento
N_1	Fator adimensional que correlaciona pressão e vazamento
P	Pressão
P_{i24h}	Pressão horária ao longo de 24h
P_{mn}	Pressão no horário de mínimo noturno
Pot	Potência
Q	Vazão
Q_1	Vazão legítima de consumo noturno
q_i	Vazão de cada trecho do setor
Q_{mn}	Vazão mínima noturna
Q_{perdas}	Vazão de perdas reais
t	Tempo
Δt	Intervalo de tempo
v	Velocidade de escoamento
γ	Peso específico da água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivos Gerais	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Sistemas de distribuição de água	18
3.2. Perdas de água	19
3.2.1. Controle de perdas físicas.....	21
3.2.2. Perdas não físicas ou aparentes	22
3.3. Metodologias para estimativa de perdas	23
3.3.1. Método das vazões mínimas noturnas	24
3.4. Gestão estratégica de perdas	26
3.5. Pressão do sistema	27
3.6. Setorização do sistema.....	27
3.7. Balanço hídrico	28
3.8. Balanço energético.....	30
3.9. Eficiência hidroenergética de um sistema de distribuição de água	33
3.10. Indicadores de desempenho	35
3.11. Fiabilidade e exatidão dos dados.....	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
4.1. Descrição do sistema	37
4.1.1. Município de Cambuí-MG	37
4.1.2. Abastecimento de água no município de Cambuí-MG	38
4.1.3. Setor de estudo e interesse.....	42
4.2. Sistemática de trabalho	47
4.2.1. Gestão das atividades.....	48
4.2.2. Ensaio de bancada.....	48
4.2.3. Visitas de campo para coleta de dados	49
4.3. Instrumentalização do sistema	62
4.3.1. Adequação dos pontos de medição.....	64
4.3.2. Ensaio de rendimento	64
4.3.3. Medições de pressão	65

4.4.	Estimativa de perdas e balanço hídrico.....	66
4.5.	Balanço energético.....	68
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1.	Pressão	71
5.2.	Vazão	75
5.3.	Balanço Hídrico	77
5.4.	Perdas reais - Método Vazões Mínimas Noturnas.....	81
5.5.	Comparação entre valores obtidos de perdas reais	82
5.6.	Análise energética do sistema.....	85
5.6.1.	Qualidade da energia	85
5.6.2.	Demanda de potência elétrica em R3	86
5.6.3.	Avaliação das bombas em R3.....	87
5.6.4.	Consumo de energia elétrica no setor.....	88
5.6.5.	Balanço de energia.....	91
5.7.	Consumo de reagentes	92
5.8.	Análise geral do sistema	94
5.9.	Balanço monetário do sistema	95
5.9.1.	Despesas com energia.....	97
6.	CONCLUSÕES.....	100
7.	RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS PESQUISAS	104
8.	REFERÊNCIAS	105

1. INTRODUÇÃO

A eficiência na gestão dos recursos hídricos e energéticos é um assunto que requer mais atenção e investimentos a cada dia. Uma administração adequada garante abastecimento de água para toda a população urbana, prevê ampliação do sistema se necessário, planeja ações de contingência em casos extremos e ainda garante a vitalidade dos mananciais de abastecimento.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997) em consonância com a Lei do Saneamento Básico (Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007) visa assegurar disponibilidade de água às gerações atuais e futuras, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos e também prevê a elaboração dos planos de saneamento básico, onde são enquadrados o prognóstico, o planejamento e o monitoramento de ações relacionadas aos sistemas hídricos urbanos, esgotamento sanitário, resíduos sólidos e rede de drenagem pluvial.

Para garantir qualidade de vida, o investimento em saneamento básico é essencial, mas não se pode esquecer dois fatores primordiais: a disponibilidade de água e energia. O consumo mundial de energia nas redes de distribuição de água representa em torno de 7% da energia global e, por este motivo, aliado às preocupações relativas ao desenvolvimento sustentável, a melhoria da eficiência energética no sistema de abastecimento de água deve ser digna de mais atenção e estudos (COELHO e CAMPOS, 2014).

Segundo a definição do Ministério do Meio Ambiente (2014), eficiência energética é a relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. Otimização das transformações, do transporte e do uso dos recursos energéticos, desde suas fontes primárias até seu aproveitamento, são ações que promovem a eficiência energética.

Os consumos de energia relacionados à captação, tratamento e adução da água implicam em uma enorme quantidade de custos. As perdas de água nos sistemas de distribuição são proporcionais às perdas de energia e reagentes utilizados nos processos. Inúmeros fatores podem contribuir para essas perdas no sistema como: estações de bombeamento ineficientes, projetos mal dimensionados, manutenções inadequadas, tubulações antigas, pressões elevadas, dentre outros.

As atividades implementadas para economizar energia e água podem ter maior impacto se planejadas de forma conjunta, ou seja, devem buscar a integração da gestão

de recursos hídricos e energéticos com objetivos de diminuir impactos ambientais, reduzir custos operacionais e incentivar o uso eficiente de recursos, de modo a prover a universalização do atendimento à população (RODRIGUES, 2012).

A redução das perdas leva à diminuição na necessidade de produção de água que, por sua vez, faz com que a energia consumida caia e assim ocorra uma redução nos custos de energia, criando um cenário positivo em todos os aspectos. De acordo com ABES (2013), cada R\$ 1,00 gasto em conservação de energia, evita R\$ 8,00 em investimentos na geração.

Todo sistema de abastecimento e distribuição de água pode ser considerado único e complexo, pois cada instalação possui especificidades locais e fatores que interferem no funcionamento do sistema. Tipo de solo, qualidade da água, tecnologia e materiais utilizados na construção da rede, operação da pressão, idade do sistema, relevo, localização, clima, regime de chuvas, dentre outros fatores podem influenciar na gestão da rede de distribuição e no controle de perdas de água.

Dentre os fatores intervenientes no sistema de abastecimento e distribuição de água, um dos mais relevantes pode ser a disponibilidade hídrica local. A variabilidade do regime de chuvas, o crescimento populacional e o forte desenvolvimento econômico requerem um eficiente gerenciamento sobre o abastecimento e demanda de água.

Neste trabalho é avaliado um setor da rede de distribuição de água do município de Cambuí, MG e levantados os consumo de água e energia baseados em dados reais, coletados em campanhas de campo e em registros na concessionária de água local (SAAE Cambuí). O balanço hidroenergético desenvolvido se mostrou adequado e coerente com as condições do sistema e através disso foi possível apontar melhorias para o local de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

O objetivo do presente trabalho é apresentar o balanço hidroenergético de um setor da rede de distribuição de água do município de Cambuí, MG.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar os atuais cenários relativos à vazão e pressão do setor de estudo;
- Mensurar as perdas de água e energia relativas ao setor de estudo, através de balanços hídrico e energético;
- Realizar uma avaliação preliminar quantitativa e monetária proporcionais às atividades executadas no sistema de distribuição de água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sistemas de distribuição de água

Um sistema de distribuição de água possui diversas características e especificidades que tal assunto se torna um grande desafio para pesquisadores e estudiosos. Sua concepção é bem variada em função do porte da cidade, topografia, investimentos envolvidos, entre outros fatores.

Os sistemas de distribuição de água são constituídos por estruturas necessárias para levar a água desde o local da captação até os locais de consumo (TSUTIYA, 2005). De modo geral, estas estruturas podem ser representadas pelo manancial de captação, estação de tratamento de água, rede adutora, reservatório, rede de distribuição, bomba e ramal domiciliar, conforme ilustrado na Figura 1.

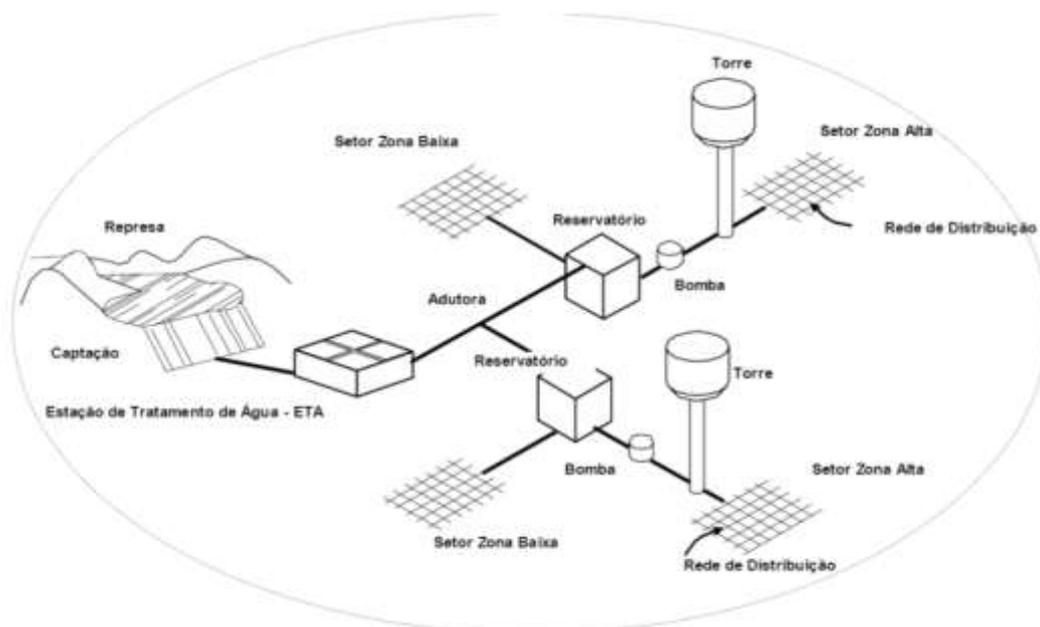


Figura 1 - Esquema de um sistema de abastecimento de água (Fonte: SOARES, 2004 *apud* MOTTA, 2010)

Segundo Porto (2006), um sistema de distribuição de água tem a finalidade de atender a população em qualidade e quantidade suficientes, respeitando as condições convenientes aos diversos pontos de consumo do sistema.

O sistema de abastecimento e distribuição de água está diretamente ligado à disponibilidade deste recurso no local. Sendo assim, a vantagem de se reduzir a quantidade de água utilizada em qualquer função específica é imprescindível. A variabilidade do regime de chuvas, o crescimento populacional e o forte

desenvolvimento econômico requerem um eficiente gerenciamento sobre o abastecimento e demanda de água (BRITTON, STEWART e O'HALLORAN, 2013).

Atualmente, um dos grandes desafios dos municípios e órgãos relacionados aos recursos hídricos é o gerenciamento eficaz da rede de distribuição de água. Existem inúmeros trabalhos que revelam tecnologias e metodologias para ajudar nesta missão, mas o grande problema são as características únicas de cada sistema e o investimento requerido para colocar as ações em prática e mantê-las funcionando.

3.2. Perdas de água

A principal origem das perdas físicas de água em um sistema público de abastecimento está nas redes de distribuição e nos ramais prediais. As redes de distribuição apresentam as maiores dificuldades operacionais do sistema de abastecimento, justamente por serem obras enterradas e estarem espalhadas por grandes áreas urbanas (MORAIS, CAVALCANTE e ALMEIDA, 2010).

As perdas de água também podem estar relacionadas com o tipo de solo, idade do sistema, situação das vias (asfaltadas, calçadas ou de terra), tráfego de veículos pesados, tecnologias e materiais utilizados na construção, profundidade da rede, tipo de relevo, clima, qualidade da água, pressão, dentre outros fatores.

Para minimizar as perdas de água, é necessário um adequado planejamento de atividades técnicas e serviços que objetivem manter a infraestrutura de abastecimento em uma capacidade de desempenho desejada ou para restabelecer a capacidade projetada.

A perda de água estimada em países em desenvolvimento é de aproximadamente 40% do volume de entrada do sistema. Os principais fatores que contribuem para expressivos valores de perdas de água são: inadequada gestão, práticas de operação e manutenção insatisfatórias, medições insuficientes e inadequadas, usos não autorizados, dados operacionais inadequados para balanço padrão, ausência de terminologias padrões e indicadores de desempenho e má administração (MUTIKANGA *et al.*, 2009).

No Brasil, segundo dados do SNIS (2014), o índice médio de perdas no ano de 2013 foi de 36,7%, com percentuais que variam para cada região do país, conforme apresentado na Tabela 1. Em 2013 e 2012 este índice não sofreu variação significativa, chegando em 38,8% nos anos de 2011 e 2010 (SNIS, 2011; SNIS, 2013).

Tabela 1: Índice de perdas na distribuição de água dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2014

Regiões	Total (%)
Norte	47,9
Nordeste	46,9
Sudeste	32,6
Sul	33,4
Centro-Oeste	34,2
Brasil	36,7

Fonte: Baseado em SNIS, 2014

As perdas de água em sistemas públicos de abastecimento são calculadas como sendo a diferença do volume produzido pelo volume faturado. Tais perdas são classificadas em físicas e não físicas (aparentes). As perdas físicas são referentes à parcela de água que não chega aos consumidores devido às falhas que ocorrem no sistema, já as perdas não físicas são referentes ao subfaturamento e estão relacionadas à parcela de água consumida, porém não contabilizada para efeito de tarifa, conforme mostrado na Figura 2 (CHEUNG, 2004).

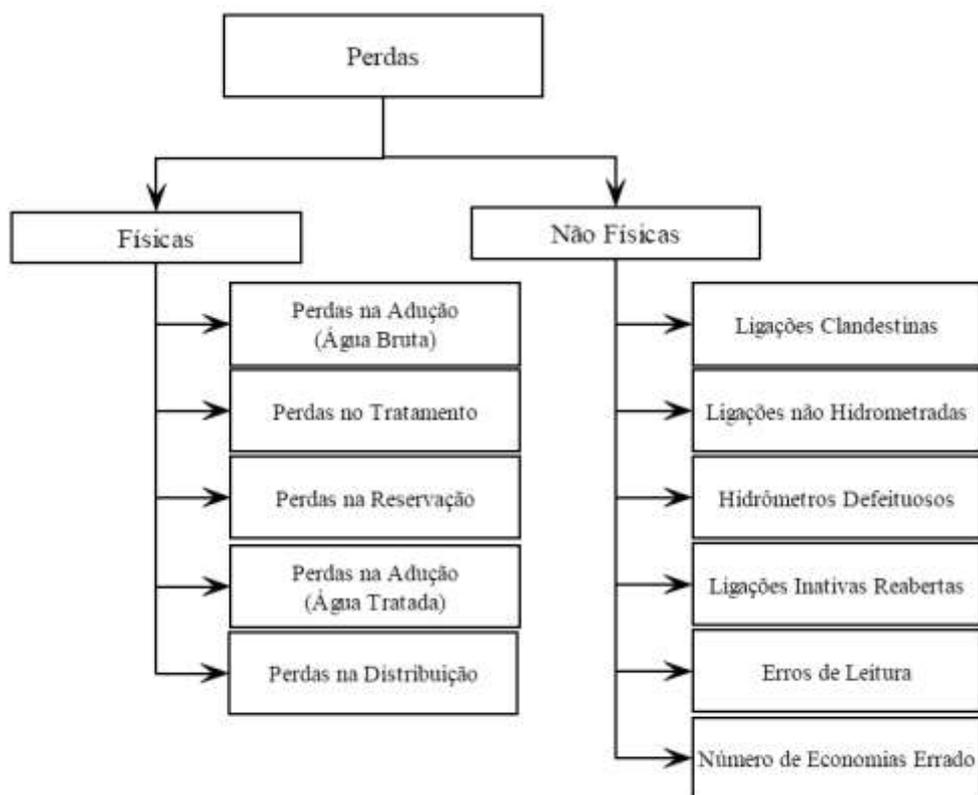


Figura 2 - Perdas no sistema de abastecimento de água (adaptado de SILVA E CONEJO, 1998 *apud* CHEUNG, 2004)

3.2.1. Controle de perdas físicas

Lambert e Hirner (2002) constataram que o efetivo controle de perdas físicas é realizado por meio de quatro atividades complementares, conforme mostrado na Figura 3 e citadas a seguir:

- Gerenciamento de pressão: objetiva minimizar os excessos de pressões do sistema e a faixa de duração de pressões máximas;
- Controle ativo de vazamentos: pesquisa de vazamentos não visíveis, realizada por meio da escuta do solo (através geofones mecânicos ou eletrônicos e correlacionadores);
- Velocidade e qualidade dos reparos: tempo gasto desde a detecção de um vazamento até sua localização e reparo com qualidade. Baixa qualidade no serviço pode causar reincidência de vazamentos;
- Gerenciamento da infraestrutura: as três atividades mencionadas acima já trazem melhorias à infraestrutura. Portanto, deve-se estar atento à substituição de trechos quando necessário e após análises profundas.

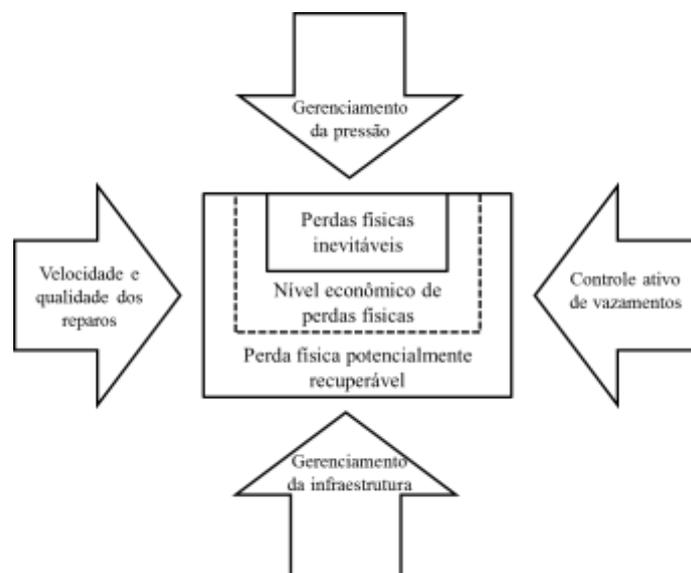


Figura 3 - Estratégia de controle de perdas de água. (Baseado em: LAMBERT e HIRNER, 2000 *apud* MORAIS, CAVALCANTE e ALMEIDA, 2010)

Silva (2005 *apud* SILVA *et al.* 2008) ainda complementa que dentre os procedimentos para redução de perdas físicas devem estar inclusos:

- Atualização do cadastro de redes e reservatórios: levantamento de traçados, localizações, características e condições;

- Detecção e eliminação de vazamentos em reservatórios: pesquisa em torneiras de boia e extravasores, podendo-se proceder à regulagem, troca de torneiras de boia e/ou eliminação de vazamentos. Testes de estanqueidade devem ser incluídos.

Segundo Islam e Babel (2013), o componente mais importante de uma estratégia de controle de vazamentos é a definição de objetivos em termos do nível econômico de vazamentos. O nível econômico de vazamentos é uma indicação que depende das condições das redes de distribuição, do sistema operacional de pressão, dos padrões de demanda, dos custos da água e das práticas operacionais.

Em seus estudos, Islam e Babel (2013) discutiram os aspectos econômicos de vazamentos em um distrito piloto em Bancoque, na Tailândia. Foram desenvolvidos gráficos relacionando custo de controle de vazamento, pressão operacional e nível de vazamento no sistema de distribuição de água e mostrando a relação entre sistema operacional de pressão e custo da água. Foi utilizado o EPANET para simular diferentes cenários. Como resultado, foi encontrado o valor adicional de US\$ 0.015/m³ que deve ser investido para redução de perdas de água. O sistema de distribuição de água pode ser operado com maior eficiência se aumentado o investimento em atividades de redução de perdas.

3.2.2. Perdas não físicas ou aparentes

As perdas aparentes, relativas a consumos não autorizados e a erros de medição, podem ter origem e causas relacionadas a diferentes fatores. Os principais tipos de perdas não físicas são apresentados a seguir.

- Erros de medição: segundo alguns autores como Coelho (2009) e Rech (1999) os erros relacionados à medição (equipamentos e técnicas) podem ser estimados em 2% do volume faturado.

Segundo Alegre *et al.* (2005), as perdas aparentes relativas a erros de medição contemplam:

- Erros de medição dos contadores em condições normais de medição;
- Erros de medição por dimensionamento inadequado ou instalação;
- Erros de leitura ou registo;
- Erros de medição por falhas (“naturais” ou por violação do equipamento);

- Ausência de leituras, por dificuldades de acesso aos contadores (dentro das habitações).

- Usos não autorizados (fraudes): é sempre um grande desafio estimar a quantidade dos usos não autorizados, pois normalmente são ligações clandestinas ou manobras na rede que inibem o real consumo.

De acordo com Thornton, Sturm e Kunkel (2008), há uma grande variação de situações e conhecimentos necessários para estimar este componente. Os consumos não autorizados podem incluir:

- Ligações ilegais;
- Fraudes em sistemas de combate a incêndios, por exemplo, uso não autorizado da água do hidrante durante construções;
- Vandalismo ou adulterações em medidores de consumo;
- Abertura de válvulas para sistemas de distribuição externos (exportação de água desconhecida).

Em pesquisas realizadas pela Sabesp, estima-se que 13% das perdas aparentes são devido às fraudes (TOMAZ, 2009). Este valor é confirmado por outros autores como Alegre *et al.* (2005) em seus estudos de caso. Tomaz (2009) ainda traz algumas referências de fraudes baseadas nas perdas aparentes, apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Fraudes em ligações de água na África do Sul e porcentagem de perdas aparentes, conforme a Universidade Loughborough

Fraudes nas ligações	Porcentagem de perdas aparentes
Muito alta	10%
Alta	8%
Média	6%
Baixa	4%
Muito baixa	2%

Fonte: Tomaz, 2009

3.3. Metodologias para estimativa de perdas

As perdas reais em sistemas de distribuição de água podem ser estimadas por meio de procedimentos computacionais (simulações) ou pesquisa de campo.

De acordo com Alegre *et al.* (2005), encontra-se disponível no mercado especializado uma grande variedade de programas computacionais para modelação de sistemas de abastecimento de água. A abrangência desses programas oferece suporte perfeitamente adequado e muito semelhante à realidade em termos da obtenção dos

principais parâmetros hidráulicos ou em aspectos ligados à interface gráfica e ao processamento dos dados.

Uma das ferramentas computacionais mais utilizadas é o EPANET, software para simulação de sistemas de distribuição de água, desenvolvido pela U. S. Environmental Protection Agency (USEPA).

Dentre as metodologias que auxiliam a análise dos dados obtidos em campo, destaca-se o método das vazões mínimas noturnas.

3.3.1. Método das vazões mínimas noturnas

O Método das Vazões Mínimas Noturnas ou Método do Mínimo Noturno (MMN) define que as vazões mínimas de água registradas durante a madrugada (normalmente entre 2h e 4h) correspondem aos vazamentos, ou seja, as perdas reais. Tal metodologia é baseada na variação dos consumos ao longo do dia e parte do pressuposto que no período da madrugada o consumo é mínimo e as caixas d'água já estão completas (CHEUNG *et al.*, 2009).

Segundo Cheung *et al.* (2009), a estimativa do volume de vazamentos diários poderia ser obtida pela multiplicação da vazão mínima noturna pelo número de horas do dia (24h). Como os vazamentos são sensíveis à pressão, o resultado obtido poderia supervalorizar os volumes perdidos. Para solucionar esse erro, foi criado o Fator Noite/Dia (*FND*), expresso em horas por dia, que, multiplicado pela Vazão Mínima Noturna (Q_{mn}) (excluindo a Vazão Legítima de Consumo Noturno (Q_l), por exemplo, consumo de indústrias durante a madrugada) resulta na Vazão de Perdas Reais (Q_{perdas}), ou seja, os vazamentos. Na Equação 1 é apresentada tal relação.

$$Q_{perdas} = FND \times (Q_{mn} - Q_l) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo Q_{perdas} obtido em m³/dia, *FND* dado em h/dia, Q_{mn} e Q_l dadas em m³/h.

O *FND* é determinado através do somatório de pressão ao longo do dia, dividido pelas pressões durante o horário de consumo mínimo noturno, conforme apresentado na Equação 2.

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

Onde:

$P_{i_{24h}}$ = Pressões horárias ao longo de 24 horas (mca);

P_{mn} = Pressões no horário de mínimo noturno (mca);

N_I = Fator adimensional, que correlaciona pressão e vazamento e varia de acordo com o tipo de material da tubulação.

De acordo com Gonçalves e Lima (2007), os valores de N_I podem variar de 0,5 a 1,5, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Variação do coeficiente N_I em relação ao tipo de tubulação

N_I	Características
0,5	Seção do tubo não se altera com vazamentos (ex: ferro fundido e aço)
1,0	Avaliação simplificada (ex: na redução de 1% na pressão de um sistema, haverá redução de 1% no vazamento)
1,15	Condições gerais da rede de distribuição de água composta de diferentes materiais (ferro fundido, PVC, aço, PEAD, etc)
1,5	Seção do tubo se altera com vazamentos (ex: PVC e PEAD)

Fonte: Baseado em Gonçalves e Lima, 2007

Segundo Farley (2001), para aplicação do método dos mínimos noturnos é necessário conhecer também os consumos legítimos durante este período, que pode ser de origem residencial, não residencial, excepcional e perdas noturnas após hidrômetro, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Componentes da vazão mínima noturna

Vazão mínima noturna (medida)	Vazão distribuída aos consumidores	Uso noturno pelos consumidores	Consumo excepcional (>500 l/h)	
			Consumo noturno estimado	Uso não residencial
		Uso residencial		
	Vazamentos (perdas no sistema)	Perdas no abastecimento noturno	Total de vazamentos noturnos (perdas no sistema)	
		Vazamentos nas conexões		
		Vazamentos na rede de distribuição		
		Vazamentos nos reservatórios		

Fonte: Baseado em Farley, 2001

Lamoglia (2013) determinou as perdas de água no sistema e os custos dos volumes perdidos em um setor da cidade de São Lourenço - MG. Para isso, foram usados dados das vazões mínimas noturnas, do consumo, das perdas e dos custos de

produção e bombeamento de água. Foi obtida a correlação entre perdas de água e energia no sistema (correlação que pode servir de modelo para gerenciamento de dados) e valores de perdas entre 25% e 28% para o setor estudado.

3.4. Gestão estratégica de perdas

Em qualquer unidade gestora de redes de distribuição de água, o grande desafio é desenvolver e manter um eficiente sistema de gestão estratégica de perdas e operações, visando a redução de custos e incremento das receitas. Segundo Farley (2001), é necessária a utilização de ferramentas de gestão que se iniciam com algumas questões básicas como “quanto de água se perde?”, “onde?”, “por quê?”, “como melhorar?” e “como manter a estratégia?”, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Gestão estratégica de perdas

Elementos	Ferramentas
Quanto é perdido?	Auditorias <ul style="list-style-type: none"> - Medir componentes - Checar produção e consumo - Recalcular balanço de água - Revisar dados e procedimentos
Onde isto acontece?	Estudos Pilotos <ul style="list-style-type: none"> - Quantificar as perdas totais - Quanto é perdido em cada etapa? - Quanto é perdido por erros de medição?
Porque ocorrem perdas de água?	Investigação <ul style="list-style-type: none"> - Razões históricas - Práticas ineficientes - Materiais e infraestruturas inadequadas - Influências locais - Fatores culturais, financeiros, sociais, políticos
Como melhorar?	Planos de Ação / Estratégias <ul style="list-style-type: none"> - Atualizar dados do sistema - Inserir zonas de medição e controle - Monitorar perdas de água e vazamentos - Detectar vazamentos e perdas não físicas - Iniciar reparos e políticas de melhorias
Como manter a estratégia?	Treinamentos / Conscientização <ul style="list-style-type: none"> - Melhorar motivação e conscientização - Transferir habilidades entre os colaboradores - Introduzir práticas e tecnologias apropriadas - Monitorar planos de ação - Envolver comunidades - Manter políticas de gerenciamento

Baseado em Farley, 2001

3.5. Pressão do sistema

Dentre os fatores que acarretam perdas de água na rede de distribuição, pode-se destacar a variação de pressão nas tubulações que levam água aos consumidores ao longo da cidade ou setor. Segundo Lambert e Hirner (2002) o controle de pressão possibilita:

- Reduzir o volume perdido em vazamentos, economizando água e recursos associados;
- Reduzir a frequência de rompimentos de tubulações e consequentes danos;
- Prover ao consumidor um serviço com pressões mais estabilizadas, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários até a caixa d'água (tubulações, registros e boias);
- Reduzir os consumos relacionados com as altas pressões da rede.

Segundo a Norma Técnica NBR nº 12.218/1994, da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 500 kPa (50 mca), e a pressão dinâmica mínima, de 100 kPa (10 mca). Valores fora dessa faixa podem ser aceitos desde que justificados técnica e economicamente.

Ainda com relação aos limites de pressão, qualquer situação fora da normalidade representa potencial zona de perdas a serem consideradas. Sendo assim, a avaliação da alternativa nesse critério deverá se resumir na identificação da existência, ou não, de trechos com pressão fora da normalidade (VIEGAS, GASTALDINI e BARROSO, 2005). Vale ressaltar que tais valores variam de acordo com o relevo local, reforçando a necessidade de conhecimento prévio das condições da rede e especificidades locais.

3.6. Setorização do sistema

Como já mencionado, as especificidades de cada sistema de distribuição de água tornam a avaliação e detecção de falhas um processo longo, demorado e oneroso. A setorização de redes de abastecimento é normalmente utilizada em pesquisas por proporcionar o conhecimento das entradas e saídas de volumes de água, úteis nos processos de balanço hidroenergético. Tal setorização e divisão da área de estudo facilita a aplicação de modelos de gestão de redes de distribuição de água e pode gerar resultados mais próximos a realidade.

Como exemplo de divisão da área de estudo, Ramos (2011) desenvolveu um modelo de automação aplicado à setorização da rede de abastecimento hídrico no município de São Vicente, SP. O processo consistiu em separar o município em nove distritos denominados zonas pitométricas com o intuito de estabelecer um controle mais efetivo das pressões e das vazões dessas áreas. A setorização apresentou-se como um fator determinante na redução de perdas, um controle mais eficiente nas redes de abastecimento e maior eficácia nas intervenções de manutenção.

Li *et al.* (2011) desenvolveram um sistema integrado para detecção, alerta e controle de vazamentos de água em áreas selecionadas de Pequim. As áreas foram divididas em distritos de medição (setorização do sistema) e foram aplicadas tecnologias utilizando Sistema de Informações Geográficas (SIG).

Já Gouveia (2012) aplicou a setorização dividindo a rede em três zonas de pressão: alta, média e baixa, visando desenvolver uma metodologia para minimizar os desperdícios de energia elétrica, com ênfase na eficiência hidráulica, energética e econômica. Para atender as diferentes zonas de pressão, foram propostas alternativas customizadas para cada caso.

Motta (2010) descreveu em seu trabalho a importância da setorização adequada para combate às perdas reais de água de abastecimento público, com estudos de casos em São Paulo - SP e Araraquara - SP. Foram implantadas válvulas redutoras de pressão em alguns trechos, com implantação de subsetores de medição e também reformulação da setorização existente, visando a melhoria e adequação do sistema.

3.7. Balanço hídrico

A Associação Internacional de Água (*International Water Association - IWA*) padronizou a aplicação dos usos da água em sistemas de abastecimento através de uma matriz que representa o balanço hídrico. Segundo Alegre *et al.* (2005), esta metodologia de balanço esquematiza os processos pelos quais a água pode passar desde o momento em que entra no sistema. De acordo com Cheung *et al.* (2009), a maior concentração das perdas de água ocorre na distribuição, ou seja, ao longo das redes de distribuição de água, particularmente nos ramais prediais.

Alegre *et al.* (2005) recomendam que o balanço hídrico seja calculado para um período de 12 meses, de modo a minimizar os efeitos de possíveis intervalos de leituras dos diversos medidores de vazão.

Algumas adequações são necessárias para a aplicação deste balanço hídrico ao caso brasileiro, visto não haver distinção entre volumes consumidos e volumes faturados. No Brasil, na maioria dos casos, estes volumes são diferentes, particularmente nas faixas de menor consumo, onde a tarifa mínima corresponde a um volume mínimo ($10 \text{ m}^3/\text{mês}$) normalmente não consumido na íntegra (PNCDA, 2003).

Soares (2010) realizou um estudo de perdas de água em rede de abastecimento através de metodologia de balanço hídrico, utilizando o software desenvolvido pelo Banco Mundial (W-B EasyCalc -v1.17). O estudo foi realizado em São Paulo, nos setores Mooca, Paulista e Jardim São Pedro / Jardim Conquista e concluiu que a metodologia utilizada em seu trabalho mostrou-se acessível, fácil e simples de ser utilizada.

Viegas, Gastaldini e Barroso (2005) avaliaram e compararam três metodologias para estimar perdas de água em rede de abastecimento num setor de Santa Maria - RS: o “Balanço de Água”, o modelo EPANET e o método empírico “FND Noite-Dia”. O programa de redução de perdas de água utilizado no estudo foi baseado no indicador IPA (Índice de Perda de Água) determinado pelo método “Balanço Anual de Água”. O EPANET foi utilizado para determinar as perdas físicas de água a partir da calibração das vazões e pressões. O método empírico FND determina a perda física diária a partir da perda noturna e utiliza um fator multiplicador, o FND. Concluiu-se que o modelo EPANET apresentou boa performance na estimativa de vazamentos e de demandas e seus resultados estão em conformidade com o método FND Noite-Dia e Balanço Anual de Água, indicando ser uma ferramenta importante para a tomada de decisão sobre as ações destinadas ao combate de perdas de água.

Coelho e Campos (2014) forneceram uma revisão sobre medidas e métodos para obter eficiência em sistemas de abastecimento de água, acompanhada de comparações de estudos anteriores, com o intuito de fornecer o estado da arte ao leitor. Os autores também exploraram o uso da simulação hidráulica e estratégias de otimização nos sistemas de abastecimento de água, que envolveram tópicos como previsão de demanda, projetos da rede, operações das bombas, operações em tempo real e produção de energia renovável. Apesar dos grandes avanços na área, existem metodologias não exploradas que podem ser testadas e aplicadas em um grande número de sistemas de abastecimento, bem como questões que devem ser consideradas com o intuito de atender requisitos específicos da indústria da água.

Uma das grandes lacunas nos sistemas de gestão de água em países em desenvolvimento é o controle e monitoramento dos dados. Nos casos onde não se tem informações históricas é necessário estimar algumas parcelas a partir de referências bibliográficas. Farley (2001) apresenta alguns casos de balanço hídrico, por exemplo, Hanoi, no Vietnã, apresenta 32% de água faturada e 68% de água não faturada (43% consumo não faturado, 20% perdas e 5% uso da companhia). Já na cidade de Arequipa, Peru (país em desenvolvimento) foram estimados alguns valores de componentes das perdas totais em sistemas de distribuição de água, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Tipos de perdas e sua contribuição (em porcentagem) relativa às perdas totais na cidade de Arequipa, Peru

Tipos de perdas	Porcentagem relativa às perdas totais
Perdas no reservatório	0,0%
Perdas na adutora	3,3%
Perdas na distribuição	68,7%
Derramamento de reservatório	6,3%
Erros de medição	15,3%
Lavagem de filtros	2,8%
Outras perdas no tratamento	1,5%
Caminhões tanques	2,1%
Perdas Totais	100%

Fonte: Farley, 2001

3.8. Balanço energético

Cabrera *et al.* (2010) apresentaram um modelo de balanço energético de uma rede de distribuição de água, obtido a partir da equação da energia na forma integral e sua interação ao longo de um determinado período de tempo (dia, mês ou ano). A análise permite representar toda a energia no sistema, mostrando que o equilíbrio de energia é mantido.

De acordo com Cabrera *et al.* (2010), a novidade mais relevante do balanço energético é a avaliação dos usos finais da energia injetada no sistema e, especificamente, as perdas de energia associadas aos vazamentos. Os resultados da perda de energia podem ser originários de duas diferentes causas: uma associada ao vazamento de água para fora da rede e outra relacionada com a energia dissipada através das perdas por atrito em casos extremos.

A equação de energia pode ser aplicada a um volume de controle com quantidades conhecidas de água e energia que flui através de seus limites. Isto implica resolver o balanço hídrico e o modelo matemático de um sistema inserido dentro de um volume de controle definido para o estudo. As fronteiras do sistema definem quais elementos são externos (contribuem para o fluxo de energia) ou internos (armazenam ou dissipam energia). Na Figura 4 são apresentados o volume de controle e as contribuições de entrada e saída do sistema (CABRERA *et al.*, 2010).

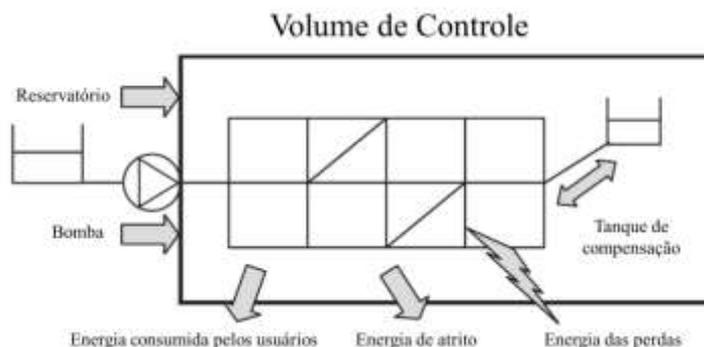


Figura 4 - Volume de controle de uma rede de água dentro dos termos de balanço energético (Fonte: Baseado em Cabrera *et al.*, 2010).

O consumo de energia elétrica de cada sistema de distribuição de água pode variar muito, a depender do relevo, da gestão operacional, da experiência dos colaboradores, da manutenção dos equipamentos, dentre outros fatores. Vicentini (2012) cita em seu trabalho referências de consumo de energia elétrica em sistemas operados pela SABESP que variam de 0,6 kWh/m³ (TSUTYIA, 2001) a 0,66 kWh/m³ de água produzida (SNIS, 2011).

Vilanova e Balestieri (2014) apresentaram em seu artigo uma relação de trabalhos que indicam consumo de energia por m³, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Consumo de energia associado a sistemas de abastecimento de água

Autores	Região	Descrição	Consumo
Racoviceanu <i>et al.</i>	Canadá, Toronto	Operação e tratamento de água	0,68 kWh/m ³
Mo <i>et al.</i>	EUA, Flórida	Operação e manutenção (captação superficial com uso direto de energia)	1,33 kWh/m ³
	EUA, Michigan	Operação e manutenção (captação subterrânea com uso direto de energia)	1,69 kWh/m ³
Scott <i>et al.</i>	EUA, Arizona	Bombeamento de água no Projeto Central Arizona	1,24 a 2,55 kWh/m ³
Venkatesh e Brattebø	Noruega, Oslo	Operação e manutenção	0,39 a 0,44 kWh/m ³
Indicadores SNIS	Brasil	Consumo médio nas grandes companhias regionais	0,69 kWh/m ³
Plappally e Lienhard (revisão de literatura)	Canada, Ontário	Extração de poços de água	0,25 a 3,02 kWh/m ³
	EUA, Califórnia	Distribuição de água	1,6 a 2,6 kWh/m ³
	México, Tijuana	Distribuição de água	4,5 kWh/m ³

Fonte: Baseado em Vilanova e Balestieri (2014)

Hernández *et al.* (2010) aplicaram a metodologia de Cabrera *et al.* (2010) em um estudo de caso real, no município de Denia, Espanha. Os dados obtidos são apresentados na Tabela 8, destacando-se o fato de que a energia dissipada através de atritos é relativamente elevada, chegando a valores médios de 45%.

Tabela 8: Balanço de energia do município de Denia, Espanha

Energia		Caso A	Caso B
		Simulação diária [kWh/dia]	Simulação mensal [MWh/mês]
E_{entrada}	E_{natural}	2.213,21 (16,2%)	67,15 (18,5%)
	E_{bomba}	11.486,70 (83,8%)	296,53 (81,5%)
$E_{\text{saída}}$	$E_{\text{usuários}}$	3.862,12 (28,3%)	120,62 (33,2%)
	E_{perdas}	2.095,23 (15,3%)	64,43 (17,7%)
	$E_{\text{compensação}}$	1.362,56 (10,0%)	2,03 (0,6%)
$E_{\text{dissipada}}$	E_{atrito}	6.132,51 (44,9%)	169,94 (46,7%)
	$E_{\text{válvulas}}$	201,14 (1,5 %)	6,49 (1,8%)

Fonte: Baseado em Hernández *et al.* (2010)

Vilanova *et al.* (2010) realizaram um balanço hidroenergético simplificado do sistema de abastecimento de água no município de Lavras-MG, onde o volume de perdas foi estimado subtraindo os volumes micromedidos nas residências do volume macromedido nas captações. As perdas energéticas relativas ao volume de água foram obtidas multiplicando pelo consumo específico de energia elétrica (kWh/m³). Foram obtidos a média de 28% de perdas e o consumo específico médio de energia elétrica de

1,10 kWh/m³. Em termos energéticos, o volume perdido corresponde à ordem de 1.959 MWh, e, sobre o ponto de vista monetário, foi estimado um custo energético anual de R\$ 722.000,00 decorrentes das perdas de água. Tal valor foi obtido considerando-se a tarifa B3 da CEMIG em novembro de 2009, de R\$ 0,36859 por kWh.

3.9. Eficiência hidroenergética de um sistema de distribuição de água

Melhorar a eficiência de um sistema de distribuição de água é quase sempre uma opção de custo mais baixo do que a construção de uma infraestrutura de abastecimento de água que demanda muito capital (BRITTON, STEWART e O'HALLORAN, 2013).

Os consumos de energia relacionados à captação, tratamento e adução da água implicam em uma enorme quantidade de custos. Múltiplos fatores contribuem para essas perdas de energia no setor como: estações de bombeamento e operações ineficientes; projetos, instalações e manutenções inadequadas; tubulações antigas; gargalos nas redes; pressões excessivas; dentre outros (COELHO e CAMPOS, 2014).

As atividades implementadas para economizar energia e água podem ter maior impacto se planejadas de forma conjunta, ou seja, devem buscar a integração da gestão de recursos hídricos e energéticos com objetivos de diminuir impactos ambientais, reduzir custos operacionais e incentivar o uso eficiente de recursos, de modo a prover a universalização do atendimento à população (RODRIGUES, 2012).

O relatório da ABES (2013) destaca a sinergia nas ações de redução de perdas de água e eficiência energética. A redução das perdas leva à diminuição na necessidade de produção de água que, por sua vez, faz com que a energia consumida caia e assim ocorra uma redução nos custos de energia, criando um cenário positivo em todos os aspectos. De acordo com ABES (2013), cada R\$ 1,00 gasto em conservação de energia, evita R\$ 8,00 em investimentos na geração.

De acordo com Lamoglia (2013), na cidade de São Lourenço-MG, o horário de funcionamento das bombas nas unidades de captação, tratamento e estação elevatória de água reflete diretamente no consumo e custo de energia, que pode representar uma tarifa em torno de 10 vezes mais cara nos horários de ponta. Deve-se avaliar a eficiência das bombas e dos equipamentos elétricos e também o manejo adequado de reservatórios e estações elevatórias. Tais ações caracterizam economia, pois o valor que ultrapassa a demanda contratada representa uma tarifa duas vezes maior.

De acordo com Mutikanga *et al.* (2009), apenas equipamentos sofisticados de detecção de vazamentos não são suficientes para reduzir as perdas de água em países em desenvolvimento, além disso é necessária uma abordagem holística do problema. As perspectivas para estes países são grandes e incluem pesquisas e metodologias pilotos para o desenvolvimento adequado. No entanto, nada substitui um processo de auditoria para a efetiva gestão de água e energia. Cada consumidor deve tomar a iniciativa de realizar um controle, mesmo na ausência de dados detalhados e precisos.

De acordo com Feldman (2009), as principais atividades para implementar a eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água podem ser obtidas com:

- Melhorias nos projetos do sistema e das estações de bombeamento;
- Instalação de unidades de velocidade variável (bomba);
- Operações eficientes de bombas;
- Redução de vazamentos através da modulação de pressão.

Além disso, são listadas algumas medidas que melhoram a eficiência dos sistemas de distribuição de água, como (COELHO E CAMPOS, 2014):

- Substituição de um equipamento ineficiente;
- Escolha de uma tarifa de energia adequada;
- Incorporação de fontes de energia renováveis, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.

Dentre os itens listados, a substituição de um equipamento ineficiente por um sistema motobomba de alta eficiência pode fornecer uma economia de 10 a 30% da energia consumida (GELLINGS 2009 *apud* COELHO e CAMPOS, 2014).

Reduções nas perdas de carga também interferem na eficiência de um sistema e podem ser feitas a partir de:

- Escolha correta dos diâmetros da tubulação com o intuito de obter uma velocidade econômica da água (baixas velocidades reduzem perdas de carga);
- Limpeza ou revestimento dos tubos, reduzindo a rugosidade dos tubos (TSUTIYA 1997 *apud* COELHO e CAMPOS, 2014).

Vivas *et al.* (2014) realizaram um estudo de otimização energética em estações elevatórias de Portugal (empresa Águas do Noroeste, SA), com análise de alguns índices de consumo e a comparação entre eles. Foi diagnosticado que a caracterização da eficiência energética dos sistemas elevatórios deve passar por uma avaliação de dados reais de desempenho do sistema e deve basear-se na correta seleção de critérios,

que permitam distinguir de forma simples e certa quais os sistemas mais problemáticos e com maior potencial de redução de consumo de energia.

3.10. Indicadores de desempenho

Para reduzir os custos e maximizar as receitas, as entidades gestoras devem buscar elevados padrões de eficiência e de eficácia. Um indicador de desempenho é uma medida quantitativa do desempenho da entidade gestora ou do seu nível de serviço. É um instrumento de apoio ao monitoramento da eficiência e da eficácia do sistema, simplificando uma avaliação que de outro modo seria mais complexa e subjetiva (Alegre *et al.*, 2004).

Segundo Duarte, Alegre e Covas (2008), os indicadores de desempenho permitem quantificar a eficiência energética dos sistemas, determinar o potencial de poupança de energia e comparar cenários diferentes do mesmo sistema, facilitando a comparação de soluções de intervenção. Permitem ainda fazer comparações entre sistemas com condições de funcionamento diferentes.

Rodrigues (2012) propôs procedimentos para a gestão hidroenergética dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) do Município de Marabá - PA. Para isso foi necessário conhecer os indicadores de desempenho relacionados à produção de água e uso da energia elétrica nos SAA. Foi verificado que o volume total produzido da água de 15,8 milhões m³/ano utilizou 8.817 MWh/ano, resultando em despesa de R\$ 2 milhões/ano de energia elétrica, segundo maior item das despesas de exploração (32,2%) na COSANPA no município de Marabá. A despesa de energia elétrica por ligação foi de R\$ 9,32/lig.ano e R\$ 7,66/lig.ano nos dois sistemas estudados, com preço médio global de 0,22 R\$ por kWh consumido e despesa média de energia elétrica de 0,11 R\$ por metro cúbico de água produzido nos setores estudados, ocorrendo variação dos índices de intensidade energética (kWh/m³) nos SAA's.

3.11. Fiabilidade e exatidão dos dados

Segundo Farley (2001), os erros associados às estimativas de vazamentos dependem da qualidade dos dados e dos métodos utilizados para análise. Por este motivo é difícil levantar faixas de erros sobre os resultados obtidos. Ao melhorar os procedimentos de levantamento e gestão de dados pode ser possível uma avaliação mais confiável. Devem ser feitos esforços para desenvolver uma abordagem padrão e quantificar as estimativas de erros nos dados de perdas de água gerados por cada empresa ou concessionária responsável.

Os valores apresentados em um balanço hídrico anual são aproximados, devido à dificuldade em avaliar todos os componentes com a exatidão desejável e sobre a mesma base temporal. A fiabilidade dos dados tende a ser maior quando a entidade gestora possui um eficiente controle dos dados e equipamentos de macro e micromedições precisos e devidamente calibrados espalhados pela rede (ALEGRE *et al.*, 2005).

De acordo com a terminologia metrológica apresentada por Alegre *et al.* (2005), a exatidão é a aproximação entre o resultado da medição e o valor (convencionalmente) verdadeiro da grandeza medida. A exatidão contabiliza o erro relativo à aquisição e processamento dos dados, incluindo o erro decorrente de extrapolações entre medidas pontuais e valores globais fornecidos. Em geral não é viável ou aplicável conhecer com rigor o erro associado a cada dado, pois tal processo varia em cada situação.



Figura 6 - Vista panorâmica do município de Cambuí-MG

O município de Cambuí é caracterizado pelo intenso desenvolvimento industrial, devido a sua localização às margens da Rodovia Fernão Dias, BR 381, que liga São Paulo a Belo Horizonte. A população local é em torno de 26.488 habitantes e a área de 244,567 km² (IBGE, 2010).

4.1.2. Abastecimento de água no município de Cambuí-MG

A água que abastece a cidade de Cambuí é captada, em sua maioria, no Rio (ou Ribeirão) das Antas, afluente do Rio Itaim, que pertence à sub-bacia do Rio Sapucaí. O Córrego Rio do Peixe (ou Usina Cachoeira Cinco Irmãos) também fornece água para o sistema de abastecimento da cidade (mais informações sobre os mananciais de captação vide ANEXO A). Na Tabela 9 são apresentadas as contribuições de cada um dos provedores de água no município, considerando as condições de captação média e máxima.

Durante a campanha de campo, foi informado pelos responsáveis do SAAE Cambuí que não houve redução no fornecimento de água. Este fato foi uma preocupação durante a coleta de dados, pois a região passava por um período de escassez de chuvas atípico durante todo o ano de 2014. A redução no fornecimento de água ocorreu após a campanha de campo e durou em torno de 30 dias. Durante este período, as vazões de captação foram reduzidas em torno de 24%.

Tabela 9: Vazão de água fornecida por fontes distintas, em condições normais.

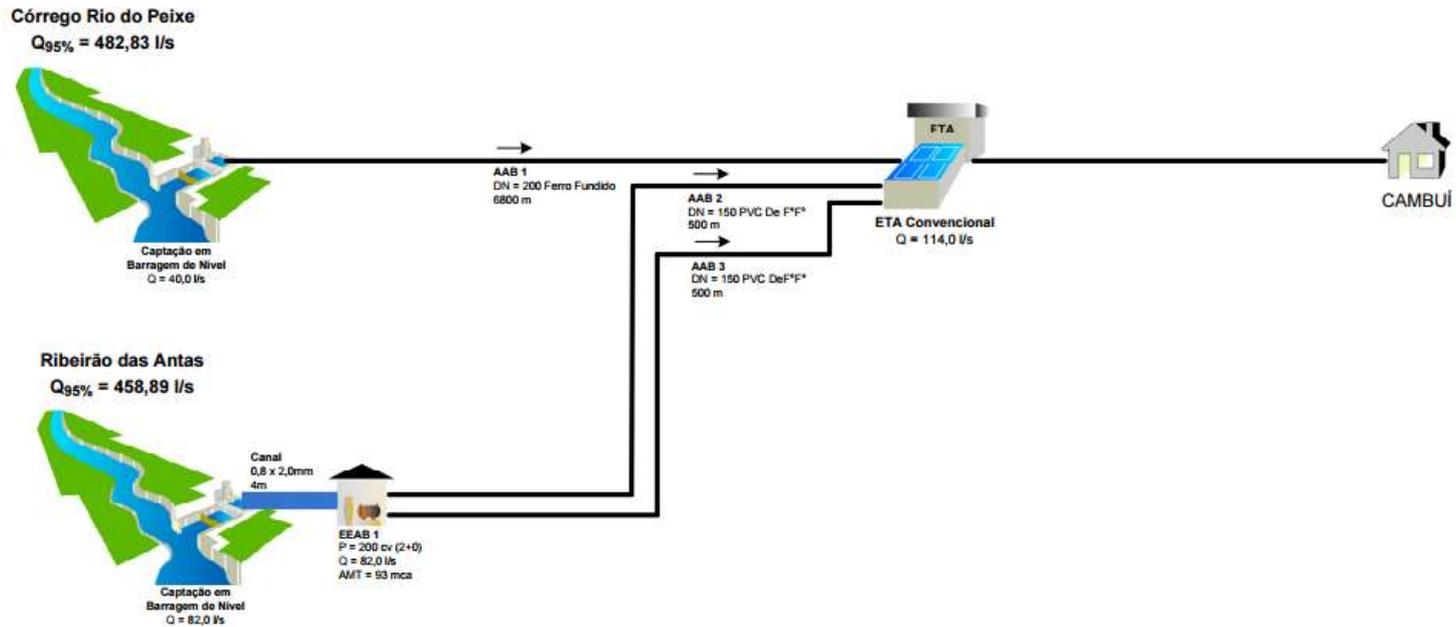
	Rio das Antas	Córrego Rio do Peixe	Total
Vazão média captada	60 L/s	25 L/s	85 L/s
Vazão máxima captada	75 L/s	35 L/s	110 L/s

A Agência Nacional de Águas - ANA possui em sua plataforma de dados virtuais o Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água, com dados dos sistemas de distribuição de água de todos os municípios brasileiros. Na Figura 7 e Figura 8 são apresentados os dados disponibilizados pela ANA relacionados ao município de Cambuí. Vale ressaltar que são dados obtidos no ano de 2010.

CAMBUÍ - MG					
Dados do Município					
Pop Urbana (2007):	19.252 habitantes	Demanda Urbana (Cenário 2015):	57 L/s		
Prestador de Serviços:	SAAE-Minas Gerais	Situação do Abastecimento (2015):	Abastecimento satisfatório		
Sub-bacia Hidrográfica:	SAPUCAÍ	Investimento Total em Água (2025):	0 milhões		
ver Croqui Sistemas Existentes:		ver Croqui Sistemas Propostos:			
Avaliação Oferta/Demanda de Água					
Mananciais	Sistema	Participação no abastecimento do município	Situação (até 2015)	Outros Municípios atendidos	
Córrego Rio do Peixe, Ribeirão das Antas	Isolado Cambuí	100 %	Satisfatória	---	
Soluções Propostas para Oferta de Água					
Mananciais	Sistema	R\$ mil (jul 2010)	Natureza das Obras	Observações	Outros Municípios atendidos
Nenhum sistema encontrado.					

Figura 7 - Dados do município de Cambuí. (Fonte: ANA, 2010)

ATLAS DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA

POPULAÇÃO URBANA (hab)	SISTEMA PRODUTOR	TIPOS DE CAPTAÇÃO	SITUAÇÃO	SISTEMA ISOLADO CAMBUÍ		Nº
<ul style="list-style-type: none"> Bairro/Distrito/Povoado De 50.000 a 250.000 Até 5.000 De 250.000 a 1.000.000 De 5.000 a 50.000 Mais de 1.000.000 	<ul style="list-style-type: none"> Adutora Estação Elevatória Estação de Tratamento de Água Dessalinizador Tratamento Filtros Reservatório Apoiado Reservatório Elevado Existente Projetado Em Obras 	<ul style="list-style-type: none"> Captação Fio d'Água/Tomada Direta Barragem/ Açude Poço Bateria de n poços Chafariz Carro-pipa 		SISTEMA ISOLADO CAMBUÍ Município: Cambuí Estado: MG Data: 12/04/2010		Nº 0000
				consórcio ENGECORPS <small>Grupo de Engenharia Consultoria Ltda.</small> cobrape		Fonte SAAE

Figura 8 - Croqui do sistema de água de Cambuí-MG. (Fonte: ANA, 2010)

O volume médio de água captada e tratada em Cambuí é em torno de 7 milhões de litros de água por dia. As águas provenientes do Rio das Antas e do Córrego Rio do Peixe (ou Usina Cachoeira Cinco Irmãos) recebem o mesmo tratamento na ETA e são misturadas na mesma rede adutora, o que pode representar perda de receitas, visto que a qualidade da água captada no Córrego Rio do Peixe é superior à do Rio das Antas. Na Figura 9 são mostradas as localizações dos pontos de captação e da ETA.

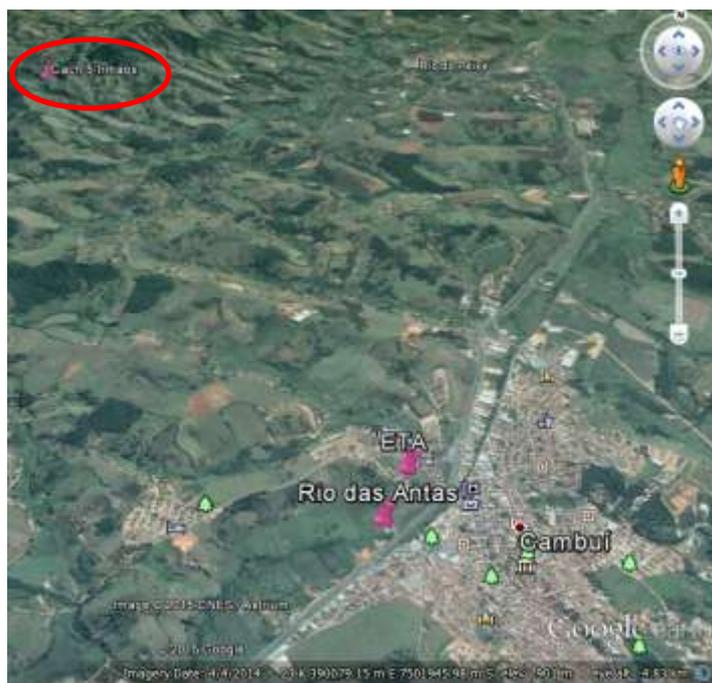


Figura 9 - Córrego Rio do Peixe (ou Usina Cachoeira Cinco Irmãos), ETA e Rio das Antas (Fonte: Google Earth, 2015)

Com relação às distâncias e o trajeto percorrido pelas tubulações dos pontos de captação até a ETA (Figura 10), foram obtidos junto ao SAAE Cambuí os seguintes dados:

- A partir do Córrego Rio do Peixe (ou Usina Cachoeira Cinco Irmãos), até a ETA são aproximadamente 6,5 km de tubulação, a sua maioria composta por tubos de ferro fundido de 200 mm de diâmetro. Existe também no trajeto aproximadamente 300 m de tubulação de PVC de 250 mm, do tipo pba (ponta bolsa anel);
- Com relação à captação no Rio das Antas, são 2 adutoras de aproximadamente 630 m de tubulação de PVC de 250 mm cada uma.



Figura 10 - ETA de Cambuí. (Foto: SAAE, Cambuí)

4.1.3. Setor de estudo e interesse

O setor de estudo compreende parte da área abastecida pelos reservatórios R3 e R4 (assim identificados no SAAE Cambuí) e contempla os bairros Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas, conforme apresentado na Figura 11. Foi escolhido este setor por se tratar de um setor isolado, onde é possível conhecer as entradas e saídas do sistema, facilitando o trabalho.



Figura 11 - Setor de estudo em Cambuí-MG (Fonte: Google Earth, 2015).

No R3 estão instaladas duas bombas iguais, uma utilizada para o bombeamento e abastecimento direto ao R4 (tubulação com diâmetro de 150 mm) e a outra utilizada

para o abastecimento de outros 3 reservatórios e bairros que não fazem parte do setor de estudo (tubulação com diâmetro de 110 mm), sendo eles: Cruzeiro do Sul (30 m³), Cléber ou Capitão Moraes (30 m³), Portal das Pedras (50 m³), conforme apresentado na Figura 12. A sobra do abastecimento destes bairros segue para o reservatório R4, mas durante a semana da campanha de campo esta sobra não foi contabilizada (válvula de contenção próxima ao R4 foi fechada).

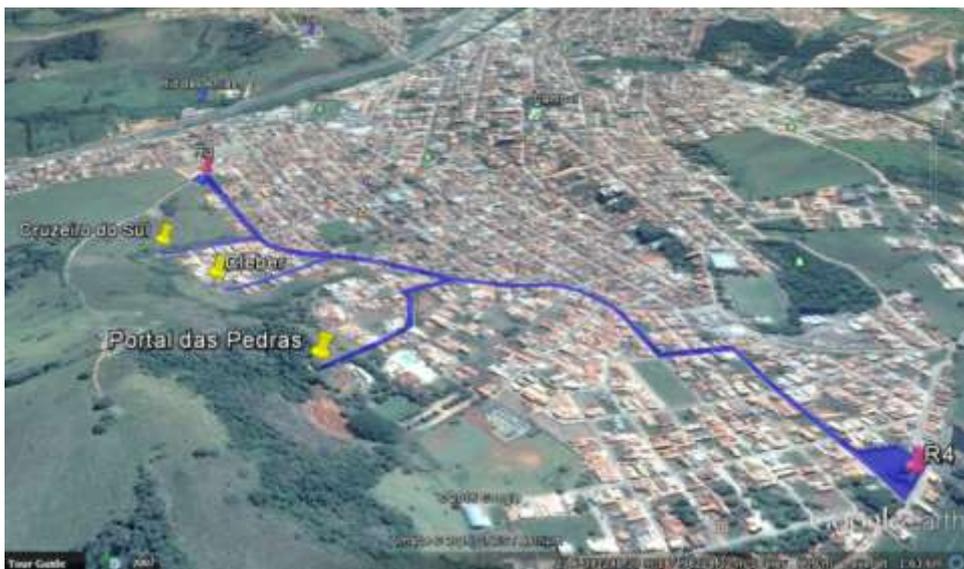


Figura 12 - Reservatórios também abastecidos por R3, mas que não fazem parte do setor de estudo (Fonte: Google Earth, 2015).

O setor de estudo se inicia em R3 (capacidade de 400 m³), onde a água é bombeada para R4 (com diferença de altitude de aproximadamente de 42 metros entre eles e distância de 1,41 km seguindo o trajeto da tubulação). A água que chega em R4 abastece primeiro um reservatório retangular com capacidade de 100 m³ de água, que é conectado a um reservatório tubular com capacidade de 50 m³ de água (enchido apenas após abastecer o retangular). Do reservatório retangular de R4 saem 3 tubulações: a primeira abastece o bairro Bela Vista e esta tubulação se interliga com o reservatório tubular de 50 m³ (existe uma válvula de retenção antes); a segunda abastece por bombeamento as caixas Gêmeas (dois reservatórios de 48 m³); e a terceira abastece por gravidade os bairros de interesse: Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas e esta tubulação também se interliga com o reservatório tubular (existe uma válvula de retenção antes).

Na Figura 13 é mostrado o R3, de onde as duas bombas succionam água para a distribuição (saídas do reservatório).



Figura 13 - Reservatório R3 e sucção das bombas

Com relação a R4, o reservatório retangular (Figura 14) possui dimensões de 10,4 m x 9,17 m x 1,20 m e altura máxima de nível de água de 0,73 m, resultando em um volume útil de 69,6 m³. Este reservatório possui sistema de controle de nível através de boia, transferindo o fornecimento de água para o reservatório cilíndrico quando o primeiro estiver cheio.



Figura 14 - Reservatório retangular em R4

O reservatório cilíndrico tem 3,20 m de diâmetro e altura total de 6,20 m. A altura do nível útil foi definida pela posição do sensor de máximo (5,92 m), resultando no volume útil total de 47,61 m³. Este reservatório possui sistema de monitoramento de nível para acionamento dos conjuntos motobombas. Este monitoramento é feito apenas do nível cheio ou vazio. Na Figura 15 é apresentado o reservatório cilíndrico em R4 e o esquema fornecido pelo fabricante.

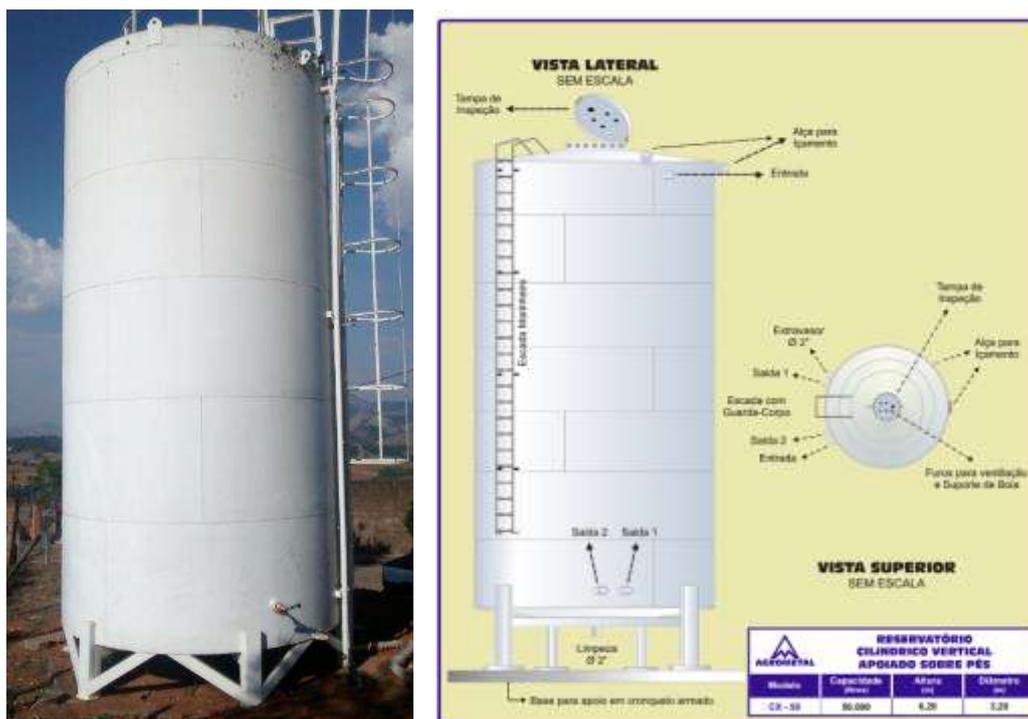


Figura 15 - Reservatório cilíndrico em R4 e dados do reservatório fornecidos pelo fabricante (Fonte: Agrometal, 2015)

Na Figura 16, é apresentado um desenho esquemático do sistema descrito.

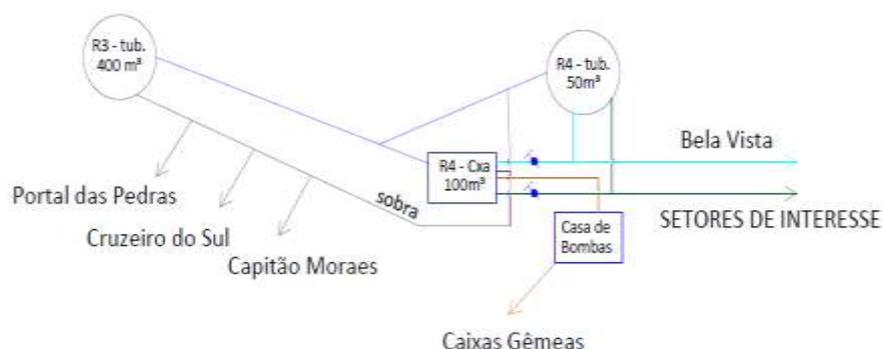


Figura 16 - Diagrama reservatório R4 (Fonte: GOULART, 2014)

Vale ressaltar que existem dois reservatórios antes de chegar ao Bairro Vila Mariana, abastecidos também pelo R4, mas a água destes reservatórios só é utilizada em dias de alto consumo, principalmente durante os fins de semana. Na semana da campanha de campo, a válvula de retenção que isola estes reservatórios permaneceu fechada, para isolar o setor. Na Figura 17 e Figura 18 são apresentados esquemas do setor.

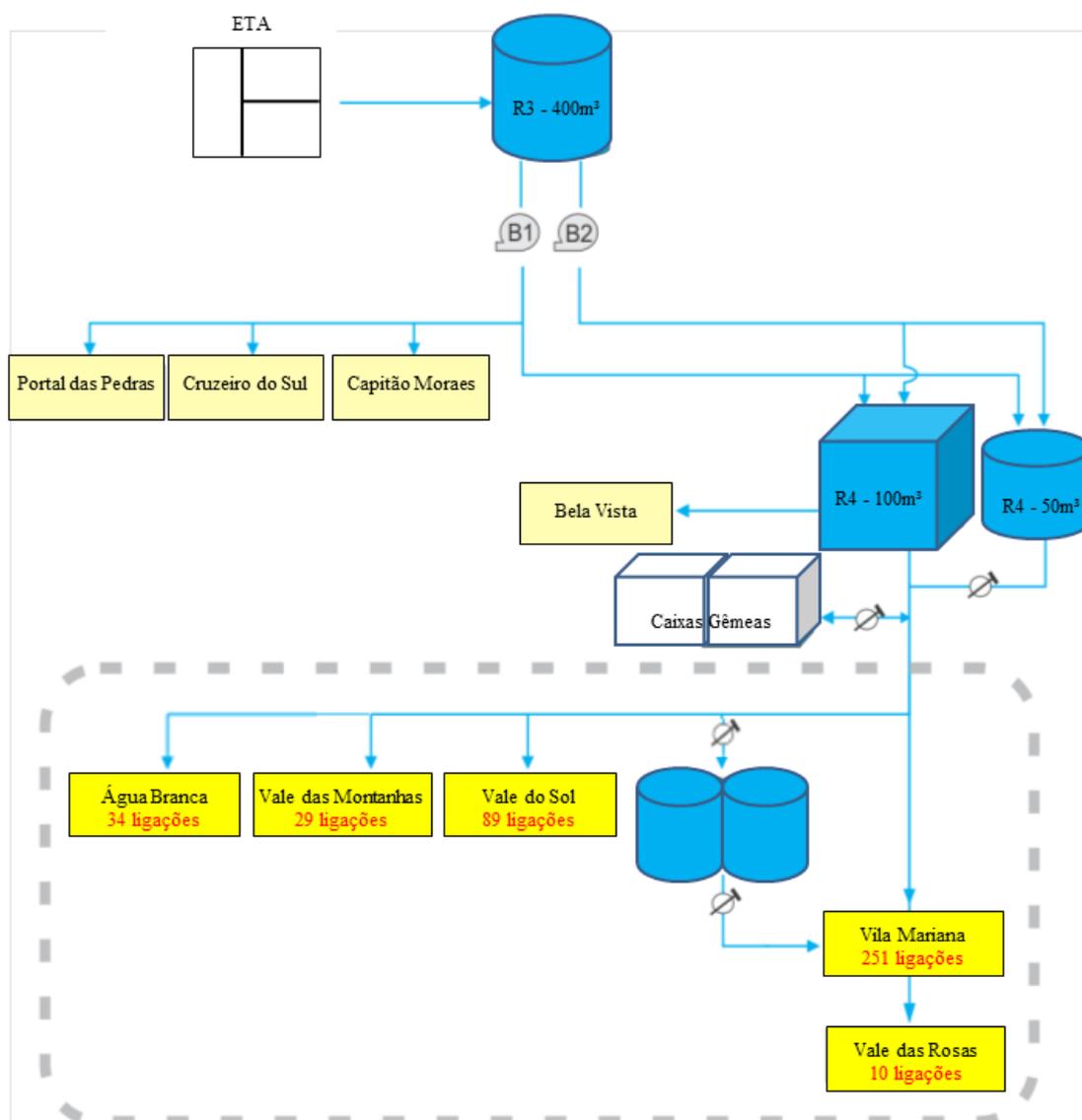


Figura 17 - Esquema do setor de estudo de Cambuí (Fonte: Adaptado de materiais da REDECOPE / Autoria Fernando Soares)

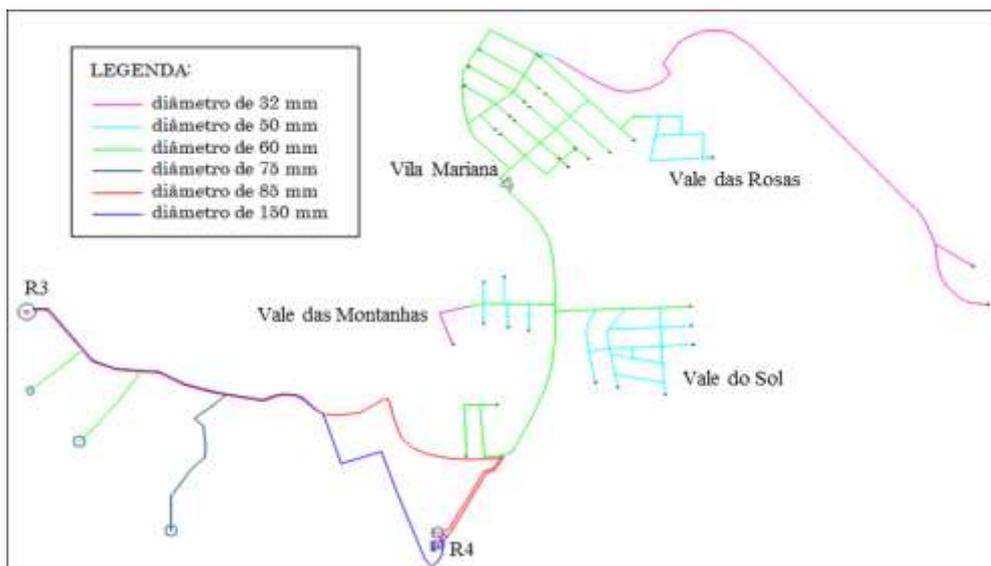


Figura 18 - Diâmetro das tubulações do setor de estudo (Fonte: GOULART, 2014)

4.2. Sistemática de trabalho

As atividades desenvolvidas ao longo do período foram divididas, conforme apresentado na Figura 19.

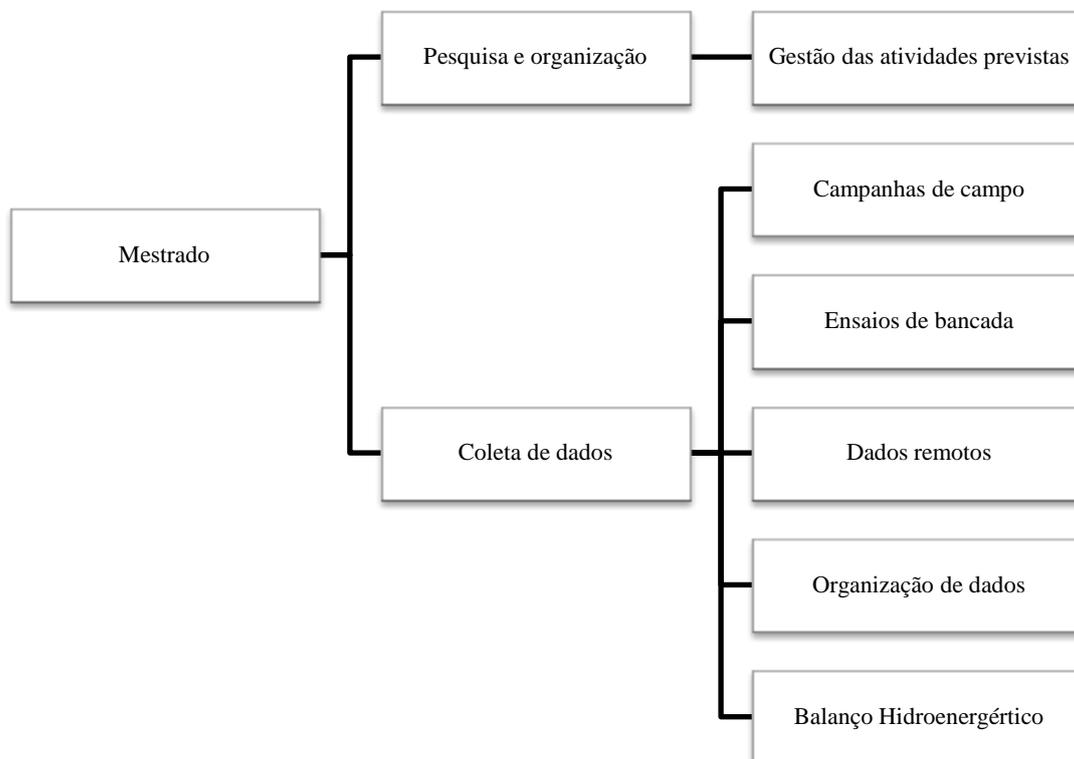


Figura 19 - Fluxograma das atividades desenvolvidas

4.2.1. Gestão das atividades

A equipe multidisciplinar responsável pelas atividades propostas para a cidade de Cambuí foi composta por 10 pessoas, dentre elas engenheiros ambientais, hídricos, de controle e automação e civil (mestrandos em Engenharia de Energia), graduandos nas modalidades acima mencionadas, além de sistema de informação e administração.

As atividades foram divididas de acordo com o produto a ser gerado e cada atividade foi designada a um grupo gerido por um líder, responsável por reunir as informações e trabalhos dos demais integrantes e apresentá-las em reuniões semanais, para aferição do andamento das atividades. Tal metodologia se mostrou eficaz devido à facilidade de acompanhamento das tarefas de cada um. Na Figura 20 é apresentada uma das reuniões.



Figura 20 - Reunião com a equipe do projeto REDECOPE - Itajubá (abril/2014)

4.2.2. Ensaios de bancada

Antes dos trabalhos de campo, foram realizados treinamentos em laboratório e ensaios de bancada para garantir a confiabilidade dos dados. Na Figura 21 e Figura 22 são mostrados os testes realizados no Laboratório de Simulações Hidráulicas da UNIFEI.



Figura 21 - Teste de bancada e configuração do medidor de vazão ultrassônico



Figura 22 - Testes de calibração dos medidores de pressão

4.2.3. Visitas de campo para coleta de dados

As visitas a campo aconteceram em diversos momentos com o objetivo de aquisição de relatórios internos do SAAE Cambuí (consumos de água, energia e reagentes), diâmetros das tubulações em estudo, mapa da rede, dentre outras informações. Durante as reuniões semanais, os dados já obtidos eram avaliados e o planejamento da campanha de campo era desenvolvido.

Foi diagnosticada a necessidade da construção de um poço de visita (caixa) nos reservatórios R3 e R4 para instalação dos medidores de vazão e pressão (Figura 23 a e b), além da coleta de dados sobre o consumo dos bairros de estudo, sobre o consumo de energia elétrica do sistema, reagentes utilizados na ETA, mapas, dentre outros dados. Na Figura 24 é mostrada a reunião com responsáveis do SAAE Cambuí.



Figura 23 - Caixa para alocação dos medidores em R3 (a) e em R4 (b)



Figura 24 - Equipe multidisciplinar UNIFEI e responsáveis do SAAE Cambuí

Após planejamento da equipe multidisciplinar, foi realizada campanha de campo para coleta de dados geográficos com o uso de equipamentos para georreferenciamento. Foram utilizados um receptor GPS e uma antena modelo: 110454 (equipamento opera utilizando as ondas portadoras L1) para obtenção exata da localização dos pontos para instalação dos medidores de pressão. O equipamento foi devidamente testado e descarregado os dados pelo técnico do Laboratório de Geoprocessamento da UNIFEI. Na Figura 25 a e b são mostradas fotos da coleta de dados geográficos.



Figura 25 - Coleta de dados geográficos em Cambuí: a) base e b) rede de estudo (junho de 2014)

Após definição do local de medição de pressão, do diagnóstico do sistema e do planejamento da campanha de campo, a equipe de pesquisadores se deslocou para a cidade de Cambuí com o objetivo de iniciar a coleta de dados durante sete dias consecutivos (08 a 14 de outubro de 2014). O local não possui população flutuante e as condições de consumo estavam dentro da normalidade, conforme afirmado por técnicos do SAAE Cambuí.

O primeiro passo foi instalar os medidores de vazão ultrassônicos e pressão em R4, sendo um na tubulação que chega do R3 com a vazão de sobra após abastecer bairros que não são do setor de estudo e outro na saída para o setor em estudo, conforme apresentado na Figura 26. A medição é baseada no tempo de trânsito de pulsos de ultrassom emitidos e recebidos pelos dois sensores acoplados externamente à tubulação.

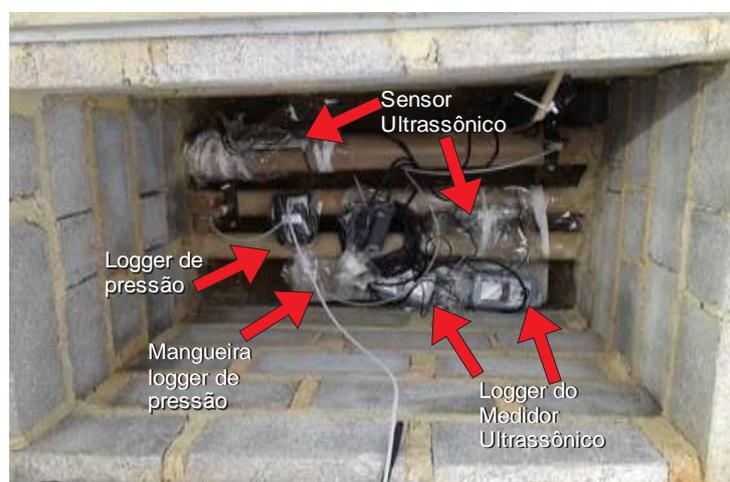


Figura 26 - Medidores vazão (ultrassônicos) e de pressão instalados em R4

Os equipamentos foram programados para iniciar a medição a partir das 0h do dia 08 de outubro de 2014. Nos dias anteriores a esta data, a equipe se deslocou às residências previamente cadastradas para instalação dos medidores de pressão (Figura 27). Concomitantemente, foram obtidas as distâncias do cavalete até o centro da rua e seu nível (nos locais onde foram instalados os medidores de pressão), para reduzir erros relacionados aos dados coletados de topografia do local, como apresentado na Figura 28 a e b.



Figura 27 - Medidor de pressão instalado em uma das residências monitoradas



Figura 28 - a) Medição do cavalete até ao centro da rua; b) medição do centro da rua até o local de coleta de dados topográficos, em Cambuí, MG (outubro/2014)

Os medidores instalados em R3 foram de responsabilidade técnica da empresa contratada (financiada pelo convênio REDECOPE / FINEP 983-10), que forneceu medidores de vazão na saída da bomba 1 e da bomba 2 e também a medição elétrica das bombas em questão (Figura 29 e Figura 30). A empresa contratada é prestadora de

serviços nas áreas de energia e saneamento e auxiliou na medição de parâmetros hídricos e elétricos no setor de estudo.



Figura 29 - Medidores de vazão (ultrassônicos) e de pressão instalados em R3



Figura 30 - Medidor de parâmetros de energia instalado na casa de bombas no R3

As grandezas elétricas foram medidas utilizando um analisador de energia modelo RE 6000, com exatidão de 0,50 %, no circuito de alimentação dos conjuntos motobomba monitorados. Além da demanda de potência e da energia elétrica consumida, o analisador registra outras grandezas como: níveis de tensão, corrente elétrica, fator de potência, frequência e distorções harmônicas. Estes dados foram monitorados durante uma semana, com intervalos de medição de 1 minuto.

O nível do reservatório retangular foi monitorado através de sensor hidrostático, com exatidão de 0,50 %, instalado internamente ao reservatório, obtendo a coluna d'água disponível (Figura 31a). Este sensor foi conectado ao *datalogger* para o monitoramento. O nível do reservatório cilíndrico foi monitorado através de um transdutor com exatidão de 0,50%, instalado externamente ao reservatório, obtendo a coluna d'água disponível (Figura 31b). Este sensor foi conectado ao *datalogger* para o monitoramento.

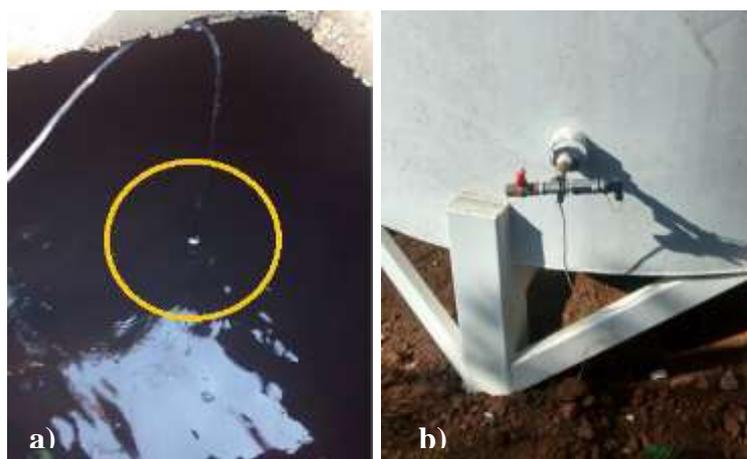


Figura 31 - a) Transdutor de nível submerso instalado no reservatório retangular (R4);
b) transdutor de nível instalado na parede do reservatório cilíndrico (R4)

Para a medição da vazão bombeada em R3, foram utilizados dois medidores de vazão ultrassônicos, com exatidão de 2%. Estes equipamentos foram instalados logo na saída das adutoras, ou seja, um deles mede a vazão do conjunto motobomba 1, enquanto que o outro a vazão do conjunto 2. Os valores foram registrados individualmente através de *dataloggers*, sincronizados com o restante das medições. Na Figura 32 são apresentados os medidores de vazão instalados junto às tubulações de saída dos conjuntos motobombas.



Figura 32 - Medidores de vazão ultrassônicos em R3

Durante a instalação dos equipamentos de pressão, foram colocados sacos plásticos para proteção contra chuva e caixote de madeira para reforçar a segurança. As caixas construídas em alvenaria para instalação dos equipamentos de vazão e pressão também passaram pelos procedimentos de segurança, com cadeados nas tampas das caixas e cobertura com lona, conforme apresentado na Figura 33 a e b.



Figura 33 - a) Equipamentos protegidos com plástico e caixote de madeira; b) Reforço da segurança nos locais de instalação dos medidores de vazão e pressão

Com os equipamentos em posição, instalados e configurados, foi iniciada a coleta dos dados por 7 dias seguidos e ininterruptos. Durante os dias da campanha de campo, um integrante da equipe estava de plantão em Cambuí para garantir o sucesso da operação em casos infortúnios como chuva excessiva ou danos nos equipamentos.

Durante o período de medição (dia 12/10/2014 em torno das 10h), foi encontrado na Rua Bento Jacinto, entre os bairros Vale do Sol e Vale das Montanhas, um veículo do SAAE que estava atendendo um pedido de falta de água no Bairro Vila

Mariana. O funcionário foi orientado para fechar um pouco o registro que controla a água dos bairros acima referidos para aumentar a vazão direcionada para o bairro Vila Mariana. A equipe de pesquisa da UNIFEI alertou sobre a importância de manter as mesmas condições durante todo o período de estudo e tal intervenção foi interrompida e não realizada.

Outro fato relevante ocorrido (dia 13/10/2014) foi um pedido de reparo devido a um vazamento no final da Rua Xavantes, no Bairro Vale do Sol, conforme apresentado na listagem das ordens de serviços fornecida pelo SAAE. Para realização do reparo, o registro que liga a rede ao bairro foi fechado no período das 13h às 16h, aproximadamente. Nas Figura 34 a e b são mostradas fotos do vazamento e reparo. Segundo moradores, o local apresenta vazamentos frequentes devido à localização das tubulações, que ficam a poucos metros de profundidade e pelo fato de algumas ruas serem de terra, sem calçamento.



Figura 34 - a) Reparo do vazamento na Rua Xavantes, dia 13/10/2014; b) Equipe do SAAE Cambuí responsável pelo reparo

Na listagem de ordem de serviços fornecida pelo SAAE são apresentadas algumas reclamações de falta de água dos moradores do Bairro Vila Mariana. Tais reclamações se justificam pelo fato de ter mantido fechado um registro que liga o bairro a dois reservatórios, que garante abastecimento em períodos de grande consumo.

Depois de finalizado o período de 7 dias consecutivos de medição, os equipamentos foram desligados e removidos dos locais, para assim prosseguir com o planejamento e descarregar os dados para tratamento das informações e análise.

Foi realizada mais uma visita de campo para coleta de dados geográficos dos locais onde foram instalados os medidores de pressão e também nos locais onde tem

registros para controle da vazão na rede de distribuição nos bairros. Na Figura 35a é mostrada a coleta de dados geográficos com o uso do DGPS no local de um registro, localizado entre os bairros Água Branco e Vale das Montanhas.

Foi investigado junto ao funcionário do SAAE Cambuí, Sr. Marcos, sobre a atual situação dos registros nos setores de estudo. Foi detectado que os registros que controlam a vazão de água dos bairros Vale das Montanhas e Vale do Sol se encontram em torno 30% aberto. Para levantamento de tal dado, o Sr. Marcos detectou que o registro fica totalmente aberto após 12 voltas consecutivas da chave de abertura e na situação atual, o registro estava em torno de três voltas e meia aberto. Os demais registros ficam todos abertos. Na Figura 35b é mostrado o Sr. Marcos fazendo o teste de abertura do registro localizado na Rua Guajajaras, no Bairro Vale do Sol e na Tabela 10 e Figura 36 e Figura 37 são relacionados os locais dos registros no setor de estudo.



Figura 35 - a) Coleta de dados geográficos no registro do bairro Vale das Montanhas; b) Teste de abertura do registro no Bairro Vale do Sol (outubro/2014)

Tabela 10: Localização dos registros no setor de estudo

Localização dos registros	Bairro	Situação	Obs
Rua João Pimentel, n° 10	Água Branca	Aberto	Controla vazão no Bairro Água Branca
Rua Guajajaras, esquina com Rua Bento Jacinto	Vale do Sol	30% aberto	Controla vazão no Bairro Vale do Sol
Av. João Lopes de Souza, esquina com Rua Bento Jacinto	Vale das Montanhas	30% aberto	Controla vazão no Bairro Vale das Montanhas
Av. Bento Jacinto, nos reservatórios gêmeos	Vila Mariana	Aberto	Controla vazão no Bairro Vila Mariana
Av. Mariana Ramos Ribeiro, n° 407	Vila Mariana	Aberto	Controla vazão no Bairro Vale das Rosas
Rua Herve de Campo Vargas (início da rua)	Vila Mariana	Aberto	Controla vazão na Rodovia Cristóvão Sheradia
Rua Rui Ferrer de Oliveira, esquina com Av. Dr. Afonso Ramos	Vila Mariana	Aberto e Inutilizável	Impossível localização exata, foi aterrado por obras
Rua Rui Ferrer de Oliveira, esquina com Av. Luiz Antônio Carvalho	Vila Mariana	Aberto e Inutilizável	Impossível localização exata, foi aterrado por obras



Figura 36 - Localização dos medidores de pressão e registros nos bairros Água Branca, Vale do Sol e Vale das Montanhas



Figura 37 - Localização dos medidores de pressão e registros no bairro Vila Mariana

Foi necessária nova visita a cidade de Cambuí para levantamento de algumas informações pendentes. Durante este período foi realizada a coleta de dados geográficos dos pontos de captação de água (Usina Cachoeira 5 Irmãos e Rio das Antas), da ETA e dos reservatórios que são abastecidos por R3 e que não fazem parte da rede de estudo. Na Figura 38, Figura 39, Figura 40 e Figura 41 são apresentadas as fotos durante a coleta de dados geográficos.

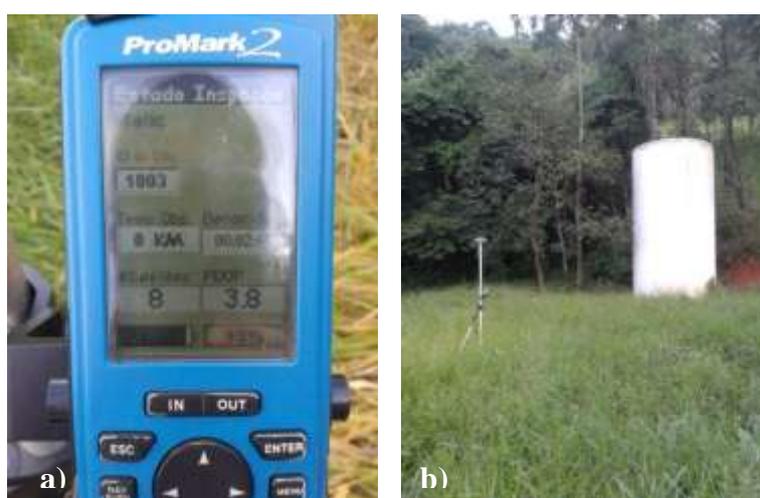


Figura 38 - a) Receptor GPS utilizado para coleta de dados; b) Coleta de dados geográficos com o receptor GPS e a antena (ao fundo um reservatório)



Figura 39 - a) Coleta de dados geográficos na Cachoeira 5 Irmãos; b) Trajeto de acesso a captação na Cachoeira 5 Irmãos



Figura 40 - Ponto de captação no Rio das Antas.



Figura 41 - Rio das Antas e ponto de captação vistos da Rodovia Fernão Dias

Foi realizada nova campanha de campo para ensaio no setor de estudo no período de menor consumo, durante a madrugada (maio/2015). Foram instalados

loggers de pressão nas mesmas casas onde houve a medição em outubro de 2014 (exceto onde foram registrados problemas ou falhas nos equipamentos), além do medidor de vazão e pressão em R4. O objetivo desta campanha de campo foi avaliar os patamares de variação de pressão, de acordo com a variação de vazão, controlada com o fechamento gradativo das válvulas que controlam o setor de estudo. Da mesma forma como ocorreu em outubro de 2014, foram isolados os reservatórios que abastecem o bairro Vila Mariana. Na Figura 42 e Figura 43 são apresentadas fotos de mais esta intervenção.



Figura 42 - a) Medidores de pressão e vazão instalados na entrada do sistema; b) Equipe de trabalho durante ensaio da madrugada (maio/2015)

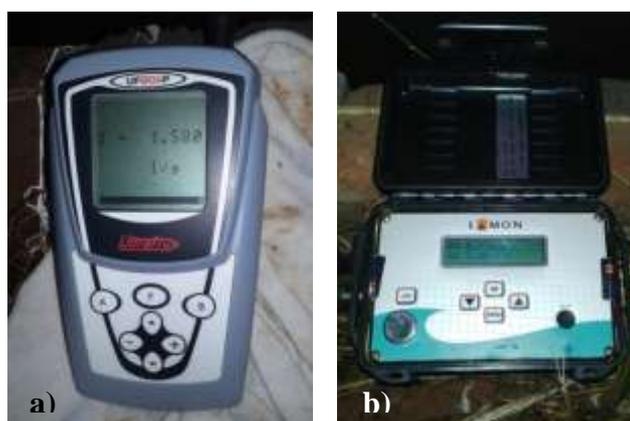


Figura 43 - a) Medidor de vazão ultrassônico; b) Medidor de pressão

4.3. Instrumentalização do sistema

Durante a campanha de campo, foram realizados monitoramentos em R3, onde está localizada a estação elevatória, e em R4, entrada do setor. A estação elevatória localizada em R3 possui um sistema automatizado de acionamento dos conjuntos motobomba, com monitoramento do nível do reservatório. O sistema é composto por dois conjuntos motobombas, de mesmo modelo (Figura 44 e Tabela 11), que alimentam duas linhas distintas, porém possuem um registro de ligação logo após a saída da casa de máquinas.



Figura 44 - Bombas do sistema de abastecimento e placa de modelo das bombas

Tabela 11: Dados nominais das bombas

	Bomba 1	Bomba 2
Fabricante	KSB	KSB
Modelo/ Série	ETA 50 20 / 231800	ETA 50 20 / 231801
Vazão nominal (m³/h)	40	40
Rotor (mm)	196	196
AMT (mca)	72	72

Nos dois conjuntos motobomba o acionamento é feito por motores de indução trifásicos com potência nominal unitária de 25cv. A partida dos motores é realizada com auxílio de *soft-starter*, como mostrado na Figura 45.



Figura 45 - Painel de comando dos motores

Na Tabela 12 são apresentados os dados nominais dos motores dos conjuntos motobombas.

Tabela 12: Dados nominais dos motores

	Motor 1	Motor 2
Fabricante	WEG	WEG
Modelo/ Série	160M / CC62140	160M / CC62137
Potência nominal (cv)	25	25
Potência nominal (kW)	18,5	18,5
Frequência (Hz)	60	60
Rotação nominal (rpm)	3525	3525
Fator de potência	0,88	0,88
Rendimento nominal	89,6	89,6
Fator de serviço	1,15	1,15

As tubulações de saída de R3 são de diferentes diâmetros, sendo uma de DN 100 mm (abastece outros três reservatórios pontuais que atendem bairros ao longo do percurso antes de chegar em R4) e uma de DN 150 mm (segue direto aos reservatórios em R4). Durante o período de medição, a ligação entre as duas saídas de R3 ficaram fechadas, tornando-os dois sistemas sem comunicação entre si.

4.3.1. Adequação dos pontos de medição

Para o correto monitoramento das grandezas elétricas e mecânicas foi necessário efetuar adequações nos pontos de medição, além das grandezas monitoradas no período de 7 dias.

Foram realizadas também medições pontuais nos conjuntos motobomba, com o intuito de obter o rendimento dos mesmos. Para isso foram feitas medições dos seguintes parâmetros:

- Vazão bombeada;
- Pressão de sucção e de recalque;
- Potência elétrica consumida;
- Rotação do motor.

Também foram coletados os dados no ponto de *shutoff* (válvula de recalque fechada), podendo assim determinar a curva da bomba através do método de interpolação de três pontos.

Todos os equipamentos de medição foram devidamente sincronizados, de forma a correlacionar as grandezas monitoradas ao longo do tempo.

4.3.2. Ensaio de rendimento

Para os ensaios dos conjuntos motobombas utilizou-se como base a norma DIN EN ISO 9906, de março de 2013. Para a determinação dos rendimentos dos conjuntos motobombas foram medidas as pressões na entrada e na saída das bombas, a vazão e a potência elétrica. Na Figura 46 são mostradas as medidas que foram realizadas no ensaio.

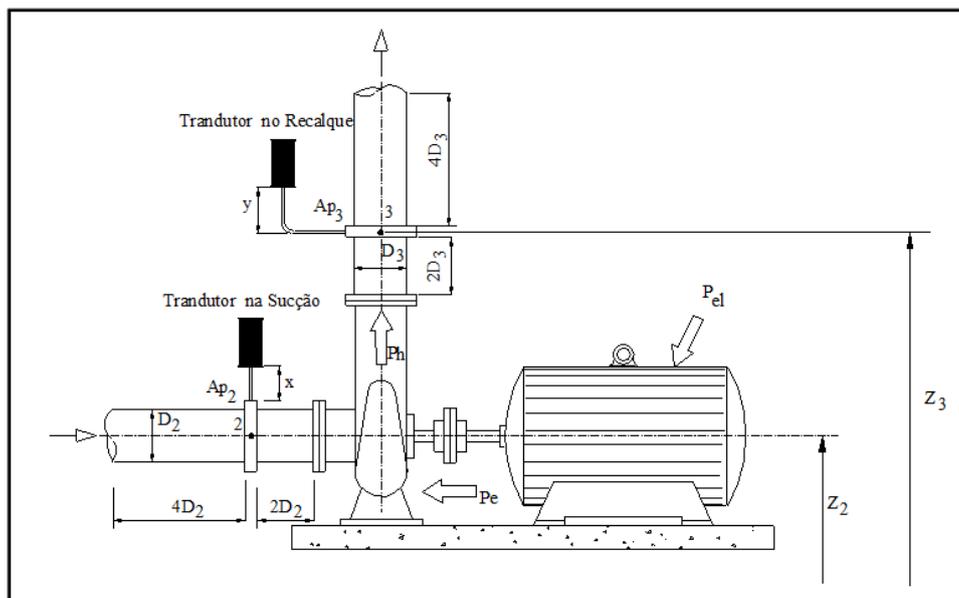


Figura 46 - Medidas realizadas no conjunto motobomba

4.3.3. Medições de pressão

As medições de pressão foram realizadas através de transdutores de pressão instalados na sucção e no recalque das bombas (Figura 47). Esses sensores foram ligados aos *dataloggers* para a aquisição e monitoramento dos dados.

Também foi feita a medição dos diâmetros de sucção e recalque das bombas, além da diferença de cotas entre os sensores.



Figura 47 - Local de instalação dos transdutores

As medidas de pressão na entrada e na saída das bombas durante os ensaios de rendimento foram feitas através de transdutores com exatidão de 0,50% (Figura 48),

conectados a um sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, supervisionado através do *software* Labview, com horário sincronizado. Na medição da sucção foram utilizados transdutores com faixa de operação de -10m a 10m e no recalque das bombas foram utilizados transdutores na faixa de 0 a 100m.



Figura 48 - Transdutores de pressão instalados

4.4. Estimativa de perdas e balanço hídrico

Para o desenvolvimento do balanço hídrico do setor em estudo, foi utilizada a metodologia do IWA, descrita por Alegre *et al.* (2005). Os passos para calcular a água não faturada e as perdas de água são descritos a seguir. Na Tabela 13 são apresentados os componentes do balanço hídrico que descrevem tal metodologia.

Tabela 13: Balanço Hídrico

A	B	C	D	E	
Água na entrada no sistema (m ³ /ano)	Consumo autorizado (m ³ /ano)	Consumo autorizado faturado (m ³ /ano)	Consumo faturado medido (incluindo água exportada) (m ³ /ano)	Água faturada (m ³ /ano)	
			Consumo faturado não medido (m ³ /ano)		
	Perdas de água (m ³ /ano)	Consumo autorizado não faturado (m ³ /ano)		Consumo não faturado medido (m ³ /ano)	Água não faturada (perdas comerciais) (m ³ /ano)
				Consumo não faturado não medido (m ³ /ano)	
		Perdas aparentes (m ³ /ano)		Uso não autorizado (m ³ /ano)	
				Erros de medição (m ³ /ano)	
		Perdas reais (m ³ /ano)		Perdas nos sistemas de adução e/ou distribuição (m ³ /ano)	
				Perdas e extravasamento nos reservatórios (m ³ /ano)	
			Perdas nos ramais (montante do ponto de medição) (m ³ /ano)		

Fonte: Alegre *et al.*, 2005

A aplicação prática da metodologia de balanço hídrico depende dos dados levantados (tanto em campo quanto estimativas baseadas em séries históricas), assim como o conhecimento da rede em estudo. A seguir, Alegre *et al.* (2005) descrevem os passos para utilização deste método de análise de consumo de água.

- Passo 0: definir os limites exatos do sistema (ou setor) de estudo e definir as datas de referência (período de estudo);
- Passo 1: determinar o volume de água na entrada no sistema e introduzi-lo na Coluna A;
- Passo 2: determinar o consumo faturado medido e o consumo faturado não medido e incluir na Coluna D. Introduzir o total destes como consumo autorizado faturado (Coluna C) e como água faturada (Coluna E);
- Passo 3: calcular o volume de água não faturada (Coluna E) subtraindo a água faturada (Coluna E) à água de entrada no sistema (Coluna A);
- Passo 4: definir o consumo não faturado medido e o consumo não faturado não medido na Coluna D. Registrar o total em consumo autorizado não faturado na Coluna C;

- Passo 5: somar os volumes correspondentes ao consumo autorizado faturado e ao consumo autorizado não faturado da Coluna C. Introduzir o resultado como consumo autorizado (Coluna B);
- Passo 6: calcular as perdas de água (Coluna B) como a diferença entre a água entrada no sistema (Coluna A) e o consumo autorizado (Coluna B);
- Passo 7: avaliar, usando os melhores métodos disponíveis, as parcelas do uso não autorizado e dos erros de medição (Coluna D), somá-las e registrar o resultado em perdas aparentes (Coluna C);
- Passo 8: calcular as perdas reais (Coluna C) subtraindo as perdas aparentes (Coluna C) às perdas de água (Coluna C);
- Passo 9: avaliar as parcelas das perdas reais (Coluna D) usando os melhores métodos disponíveis, somá-las e comparar com o resultado das perdas reais (Coluna C).

Para obtenção das parcelas apresentadas no Passo 7, os usos não autorizados foram estimados em 13% das perdas aparentes (TOMAZ, 2009; Alegre *et al.*, 2005) e os erros de medição estimados em 2% do volume faturado (COELHO, 2009; RECH, 1999). O SAAE Cambuí não possui dados relativos.

Com relação ao Passo 9, as perdas na distribuição foram estimadas em 68,7% das perdas totais e 3,3% como perdas na adutora (FARLEY, 2001), resultando em 72%. As perdas nos reservatórios foram estimadas em 6,3% das perdas totais (FARLEY, 2001) e as perdas nos ramais foram obtidas da subtração das componentes das perdas reais (perdas na adutora e distribuição e perdas nos reservatórios). O SAAE Cambuí não possui dados relativos e estes componentes.

As perdas reais também foram calculadas através do Método das Vazões Mínimas Noturnas e os resultados foram comparados com os valores estimados via matriz da IWA.

4.5. Balanço energético

Para estimativa do balanço energético do sistema, adotou-se uma metodologia mista para análise do setor. Foi utilizada como plano de fundo a metodologia de Cabrera *et al.* (2010), que foi adaptada pelos pesquisadores e gestores da REDECOPE, que

optaram por simplificar o processo a fim de atender a realidade da maioria dos municípios brasileiros e disseminar tal prática entre as concessionárias de água Brasil.

Parte da metodologia descrita por Cabrera *et al.* (2010), é apresentada na Tabela 14 e na Equação 3.

Tabela 14: Balanço energético para rede de distribuição de água

E_{ent} (energia de entrada)	E_{nat} (energia natural)	E_{usu} (energia entregue aos usuários)	$E_{saíd}$ (energia de saída)
	E_{bomb} (energia das bombas)	E_{perd} (energia relativa às perdas)	
		E_{atr} (energia perdida devido a atritos)	

Fonte: Baseado em Cabrera *et al.*, 2010.

$$E_{ent}(t) = E_{nat}(t) + E_{bomb}(t) = E_{usu}(t) + E_{perd}(t) + E_{atr}(t) = E_{saíd}(t) + E_{dissip}(t)$$

Equação 3

Onde os termos se referem às parcelas de energia apresentadas na Tabela 14 em função de um intervalo de tempo.

Cabrera *et al.* (2010) descrevem cada um dos termos da Equação 3 como sendo o somatório da vazão de cada trecho multiplicado pela carga piezométrica e pelo peso específico da água, em um determinado período de tempo. Para isso são necessários dados apurados e programas de simulações hidráulicas avançados.

Neste trabalho, a metodologia foi simplificada, baseando como entrada (E_{ent}) do balanço energético os consumos específicos de energia elétrica gastos para abastecimento do setor em estudo, relativos aos volumes de água bombeados. Os consumos relativos aos usuários (E_{usu}) e às perdas (E_{perd}) são proporcionais aos volumes estimados no balanço hídrico e a parcela de energia dissipada através do atrito (E_{atr}) foi estimada através de simulações realizadas no EPANET para obtenção da vazão e da perda de carga em cada trecho da rede, para assim aplicar a fórmula baseada em Cabrera *et al.* (2010), apresentada na Equação 4.

$$E_{atr}(t) = \gamma \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \left(\sum_{t_k=t_1}^{t_k=t} q_i(t_k) \cdot \Delta h_i(t_k) \right) \cdot \Delta t$$

Equação 4

Onde:

$E_{atr}(t)$ = Energia perdida devido a atritos ao longo de um intervalo de tempo (Wh);

γ = Peso específico da água (N/m³);

n = Número de nós do setor;

q_i = Vazão de cada trecho do setor em função do tempo (m³/s);

Δh_i = Perda de carga de cada trecho do setor em função do tempo (m);

Δt = Intervalo de tempo analisado (h);

O EPANET foi configurado para calcular a perda de carga de cada trecho (distribuídas) no setor a partir da fórmula universal da perda de carga ou equação de Darcy-Weisbach (Equação 5).

$$H_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

f = Fator de atrito, obtido através do diagrama de Moody;

L = Comprimento da tubulação (m);

D = Diâmetro interno da tubulação (m);

v = Velocidade média do escoamento (m/s);

g = Aceleração da gravidade (m/s²).

O valor da energia perdida devido a atritos foi estimado a partir de simulações computacionais realizadas por Goulart (2015), que forneceu valores de rugosidade para o sistema em estudo. Foram feitos testes utilizando valores de rugosidade teóricos (entre 0,06 e 0,1 mm), porém optou-se por utilizar as rugosidades obtidas através das simulações de Goulart (2015).

A vazão de cada trecho do setor também foi estimada a partir de simulações no EPANET, onde foi inserido o consumo nodal como dado de entrada (estimado através dos dados de consumo de cada rua fornecidos pelo SAAE).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados coletados em campo, foi possível obter informações de pressão, vazão e consumo de energia para realizar o balanço hidroenergético do sistema.

5.1. Pressão

Durante a campanha de campo, foram obtidos dados de pressão em 18 pontos (nós) espalhados pelo setor de estudo, além da entrada do sistema. A escolha destes nós se deu a partir da determinação de possíveis pontos críticos (mais baixos, mais distantes e/ou mais próximos em relação ao reservatório). Destes pontos avaliados, 4 deles apresentaram inconsistência nos dados devido, provavelmente, a intervenções dos moradores ou falha dos equipamentos e em outros 3 pontos foram obtidas apenas medições pontuais, pois não havia segurança para deixar o equipamento durante os 7 dias de monitoramento. Na Figura 49 a e b são apresentados os dados com a variação de pressão manométrica ao longo de 24 horas em dois nós do setor, o nó 141, com altitude mais elevada (923m) e o nó 153, com menor altitude (860m).

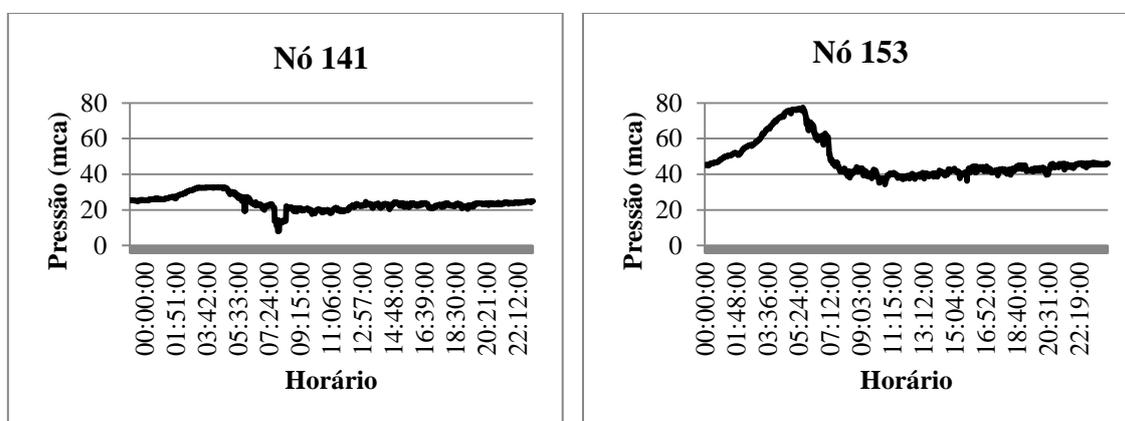


Figura 49 - Monitoramento de pressão nos nós: a) 141 e b) 153 (dia 09/10/2014)

O comportamento das pressões, em geral, se manteve estável, com valores elevados durante o período da madrugada (menor consumo) e redução da pressão ao longo do dia, o que caracteriza um sistema de pequeno porte, com reduzidas vazões. Vale ressaltar que os gráficos apresentados se referem a dois extremos do setor. No ponto mais alto (nó 141) é possível observar que a pressão máxima obtida foi em torno

de 30mca enquanto que no ponto mais baixo (nó 153) este valor se aproxima dos 80mca, devido à diferença de altura e pressão em relação ao reservatório.

Os valores de pressão monitorados durante a campanha de campo foram essenciais para o cálculo das perdas reais do sistema através do método dos consumos mínimos noturnos. Para isso foram obtidas as pressões médias horárias de cada nó monitorado, dividindo-as pela pressão média do horário de menor consumo (das 4h30 às 5h30).

O mapa com as zonas de pressão e a localização dos nós monitorados é apresentado na Figura 50, onde é possível observar diferentes faixas de altitudes, o que resulta, naturalmente, em diferentes faixas de pressão dentro do setor de estudo. Tal mapa foi gerado através do EPANET. O reservatório R4 (entrada) está localizado em uma altitude aproximada de 940m e distribui (por gravidade) água para os demais pontos do setor, podendo chegar a uma variação de altitude de até 70m, o que acarreta em elevados valores de pressão, conforme apresentados nos gráficos acima. Alguns pontos apresentaram medições falhas e não foram considerados neste estudo. Isso pode ter acontecido devido a intervenções dos moradores, que mesmo avisados, podem ter mexido nas torneiras onde os medidores estavam instalados ou ainda devido a falhas nos equipamentos. Alguns pontos como os nós 85, 151 e 152 não houve monitoramento de pressão ao longo dos 7 dias devido a impossibilidade de instalação dos equipamentos (falta de segurança), apenas medições pontuais, que também não foram inclusas nos cálculos. Nota-se que o setor de estudo se encontra em uma região com morros e variações de altitudes acentuadas.

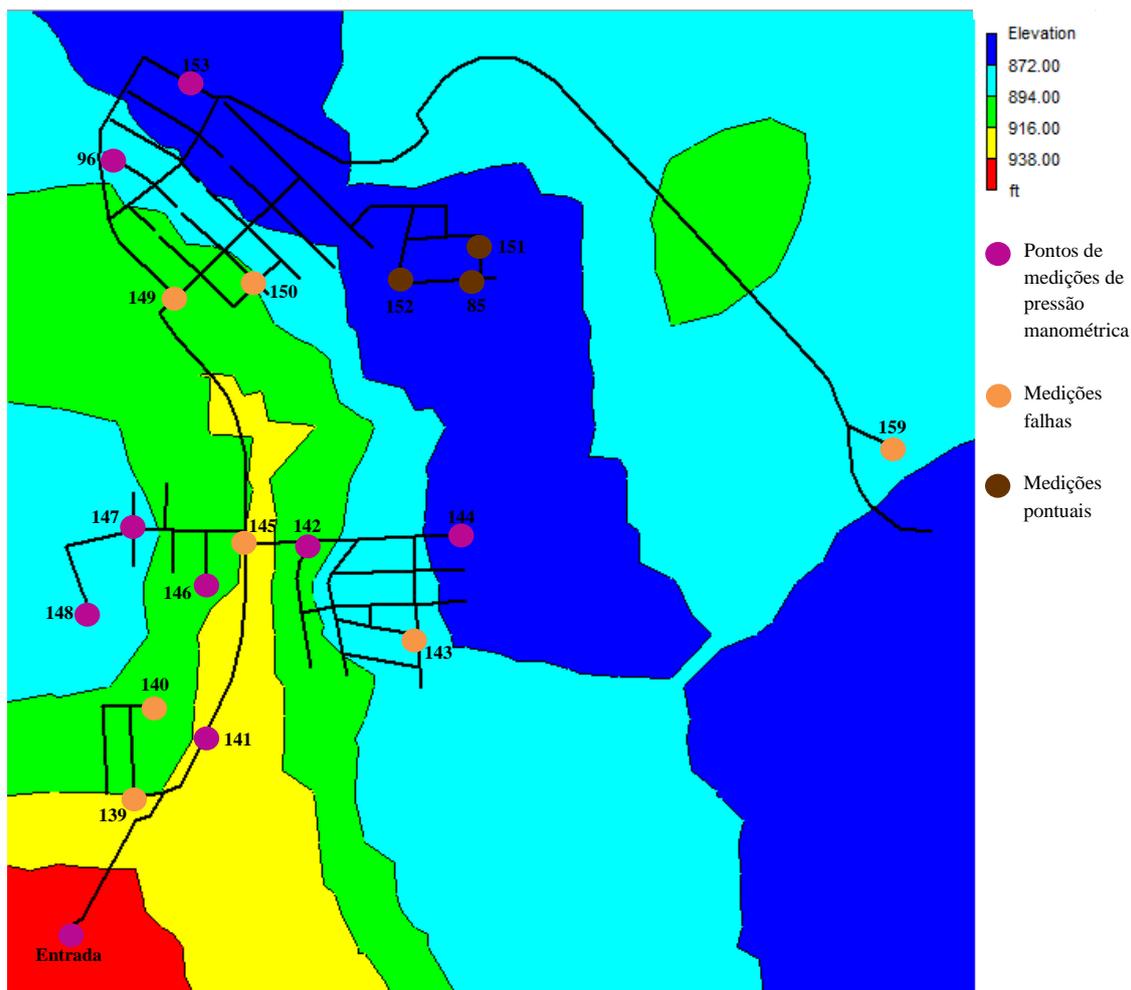


Figura 50 - Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão, gerado pelo EPANET (Baseado em: Goulart, 2015)

Os valores médios de pressão monitorados durante a campanha de campo são apresentados na Tabela 15. Abaixo da descrição de cada nó, foi inserida a altitude, relativa ao nível do mar. É possível observar que na entrada do setor a pressão média é em torno 2 mca, enquanto que em alguns pontos este valor chega a 56 mca, indicando grande variação na pressão do setor em estudo devido à variação de altitudes. Sobre as pressões médias horárias, é possível notar que no período de consumo mínimo noturno (das 4h30 às 5h30) o valor é superior aos demais horários, reforçando e justificando a metodologia adotada para o cálculo das perdas reais através do método dos mínimos noturnos.

Ainda na Tabela 15, na última coluna, são mostrados os valores calculados do Fator Noite/Dia (*FND*), fator adimensional utilizado no método dos mínimos noturnos, que correlaciona pressão e vazamentos. O *FND* se refere a um fator de ajustamento de

pressão ao longo do dia e é usado para calcular a média diária de perdas baseadas no consumo noturno (em geral relacionados aos vazamentos) e nas pressões do setor em estudo. É possível notar que o *FND* é igual a 1 no horário noturno de mínimo consumo, pois o mesmo é obtido dividindo a pressão média horária pela pressão do horário de consumo mínimo (das 4h30 às 5h30). A somatória de todos os *FNDs* multiplicados pela vazão noturna (vazamentos) nos fornece a perda real do setor, conforme apresentada a seguir no item 5.4.

Tabela 15: Médias horárias de pressão (mca) e Fator Noite/Dia (*FND*)

Horário	Entrada (959m)	Nó 141 (923m)	Nó 142 (900m)	Nó 144 (870m)	Nó 146 (911m)	Nó 147 (887m)	Nó 148 (877m)	Nó 96 (892m)	Nó 153 (860m)	Média Horária Pi_{24h}	<i>FND</i>
0h30-1h29	2,14	25,90	31,48	62,38	20,24	7,61	53,04	20,90	50,01	30,41	0,63
1h30-2h29	2,47	26,80	33,25	64,16	22,12	7,56	54,88	24,22	53,30	32,09	0,69
2h30-3h29	3,20	28,13	35,76	66,62	24,66	7,52	57,52	28,76	57,71	34,43	0,76
3h30-4h29	4,27	30,09	39,45	70,29	28,62	7,47	61,46	35,26	64,13	37,89	0,88
4h30-5h29	4,64	31,61	43,19	74,02	32,62	7,43	65,45	41,27	70,28	41,17	1,00
5h30-6h29	4,18	30,03	41,15	70,99	29,77	7,37	62,39	37,10	66,93	38,88	0,92
6h30-7h29	3,21	25,13	30,95	61,20	19,86	7,33	52,39	24,12	54,28	30,94	0,65
7h30-8h29	2,46	21,15	23,06	53,44	13,56	7,38	44,66	14,59	43,96	24,92	0,47
8h30-9h29	2,07	20,51	21,53	52,04	11,96	7,48	43,12	12,17	40,93	23,54	0,43
9h30-10h29	1,92	21,01	20,33	51,17	12,25	7,61	42,22	10,08	38,64	22,80	0,41
10h30-11h29	1,87	20,95	20,84	50,99	11,99	7,74	40,72	9,97	38,73	22,65	0,41
11h30-12h29	1,83	21,04	21,70	51,99	12,39	7,87	40,75	10,94	39,55	23,12	0,42
12h30-13h29	1,81	21,36	21,55	52,26	12,88	7,99	41,34	11,49	40,24	23,43	0,43
13h30-14h29	1,82	21,64	23,05	50,25	13,84	8,09	42,10	12,21	40,94	23,77	0,44
14h30-15h29	1,82	21,87	22,42	46,72	14,96	8,16	42,55	12,46	41,77	23,64	0,44
15h30-16h29	1,82	21,97	22,56	47,29	12,89	8,20	42,48	12,65	41,67	23,50	0,43
16h30-17h29	1,80	21,02	21,14	50,11	12,79	8,19	41,51	13,22	40,75	23,39	0,43
17h30-18h29	1,79	21,42	20,05	50,21	11,96	8,14	40,81	12,42	41,32	23,13	0,42
18h30-19h29	1,79	21,93	20,95	50,57	12,23	8,07	41,45	12,43	41,35	23,42	0,43
19h30-20h29	1,82	22,42	22,28	52,69	14,21	7,99	43,52	13,44	41,95	24,48	0,46
20h30-21h29	1,84	23,01	24,17	53,75	13,59	7,91	44,79	13,45	42,20	24,97	0,47
21h30-22h29	1,87	23,54	25,17	56,05	14,77	7,85	46,19	14,92	43,60	25,99	0,50
22h30-23h29	1,90	23,95	26,77	57,68	16,03	7,78	47,97	15,26	43,93	26,81	0,53
23h30-0h29	1,93	24,72	28,70	59,70	18,03	7,72	50,11	16,32	45,36	28,07	0,56
Médias	2,34	23,80	26,73	56,52	17,01	7,77	47,64	17,90	46,81		

É possível notar que em alguns pontos do setor as pressões se encontram em faixas inferiores ou superiores aos valores exigidos pela NBR nº 12.218/1994, entre 10 mca e 50 mca. No nó 147 a pressão média obtida foi em torno de 7,7 mca, sem variações significativas durante o dia, o que pode prejudicar o fornecimento de água. Já no nó 144, a pressão média passou dos 56 mca, podendo causar rupturas na rede e aumentando a incidência de vazamentos.

Um ponto curioso e que chamou a atenção foi a diferença de pressão apresentada entre os nós 147 e 148. A localização e altitude de ambos são bem próximas, porém a média de pressões é bem distante, apresentando em torno de 8 mca no nó 147 e mais de 45 mca no nó 148. Ao consultar responsáveis do SAAE Cambuí sobre este fato, foi levantada a hipótese do ponto 148 não fazer parte da rede de estudo, sendo abastecido por uma tubulação proveniente de outro setor, com características particulares e que não foram avaliadas neste trabalho. Tal fato pode ser justificado devido à ausência de mapas atualizados e monitorados constantemente, podendo ser passíveis de erros humanos ao repassar as informações apresentadas neste trabalho.

Em quase todos os pontos monitorados, é possível observar claramente um aumento da pressão no horário de mínimo noturno, se comparados com as pressões ao longo do restante do dia.

5.2. Vazão

A vazão bombeada por R4 até R3 abastece outros bairros e reservatórios antes de chegar ao setor de estudo. Foram monitoradas as vazões das duas tubulações que saem de R3 durante a campanha de campo e os valores obtidos são apresentados na Tabela 16. Vale ressaltar que estas vazões foram mensuradas para conhecer a contribuição do setor em relação à quantidade de água bombeada por R3 e não refletem o real consumo do setor.

Tabela 16: Vazão bombeada por R3 até R4 (abastece setor e outros bairros)

	l/s	m ³ /h	m ³ /mês	m ³ /ano
Vazão B2 (DN100)	4,65	16,74	12.220,20	146.642,40
Vazão B1 (DN150)	5,99	21,56	15.738,80	188.865,60
Soma	10,64	38,30	27.959,00	335.508,00

A vazão de entrada do sistema, após o R4, foi monitorada durante 7 dias consecutivos (Figura 51). É possível observar que o comportamento das vazões ao longo dos dias de monitoramento não apresentou variações significativas, com redução do consumo durante a madrugada e incremento da vazão ao longo do dia, a partir das 7h. A partir da análise dos dados de vazão e pressão, foi possível observar que o **horário das vazões mínimas noturnas** está dentro do intervalo das **4h30 às 5h30**. Este horário foi adotado para todos os cálculos relativos ao consumo mínimo da madrugada.

Na Figura 52 é apresentada a variação de vazão ao longo do dia 09/10/2014 (terceiro dia de monitoramento). É possível notar que não existiu variação significativa de vazão no período compreendido das 9h às 21h, com valores reduzidos durante a madrugada. A vazão máxima neste dia foi de 3,76 l/s, por volta das 11h e a vazão mínima foi de 2,17 l/s durante a madrugada.

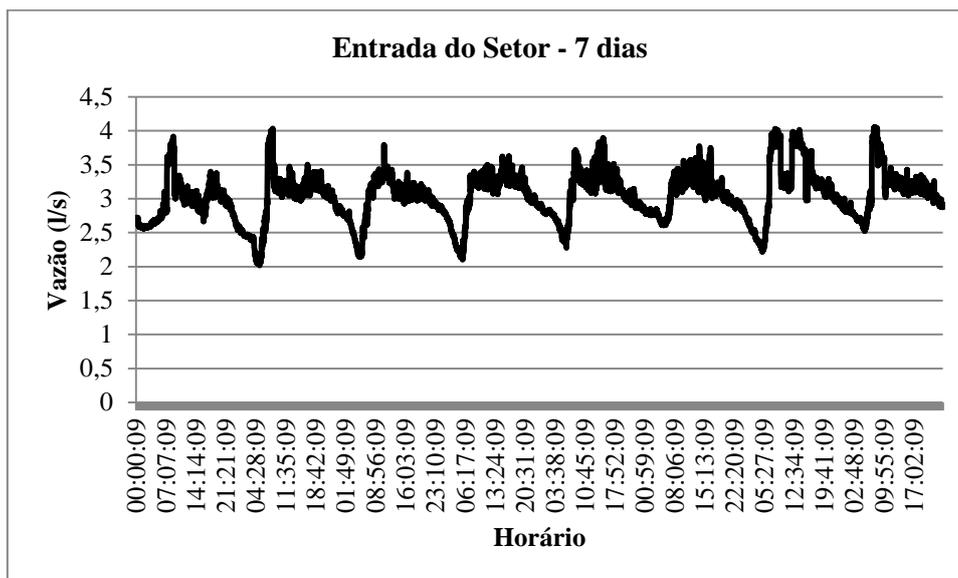


Figura 51 - Variação de vazão ao longo dos 7 dias de monitoramento

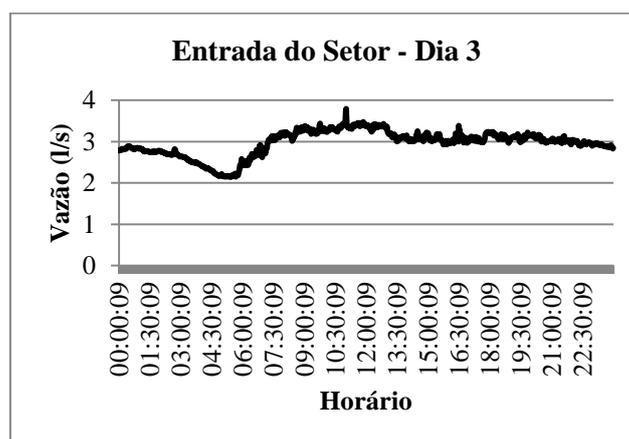


Figura 52 - Variação de vazão na entrada do setor, durante o dia 09/10/2014

Na Tabela 17, são apresentados os dados de vazão média da entrada do setor, mínima, máxima e média no período de mínimas noturnas, obtidos durante a campanha de campo. De acordo com pesquisas de campo, no setor de estudo não existem consumidores excepcionais noturnos.

Tabela 17: Dados de vazão obtidos durante a campanha de campo

Dados Obtidos	l/s	m³/h	m³/ano
Vazão média da entrada do setor (R4)	3,04	10,94	95.795,61
Vazão Mínima	2,02	7,27	63.671,18
Vazão Máxima	4,06	14,62	127.973,09
Média Vazões Mínimas Noturnas (4h30 - 5h30)	2,37	8,53	74.759,23

A partir dos dados monitorados e obtidos juntos ao SAAE, foi possível estimar que o setor de estudo corresponde a aproximadamente 4% de todo o município (contribuição comparando o valor total de água captado), conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18: Representatividade do setor de estudo na rede de distribuição de Cambuí

	Vazão média (l/s)	Contribuição (%)
Município de Cambuí	85,00	100%
Setor de estudo	3,04	3,58%

5.3. Balanço Hídrico

A partir da metodologia do IWA, apresentada por Alegre *et al.* (2005), foi possível desenvolver o balanço hídrico do setor em estudo, conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19: Balanço hídrico do setor em estudo, em Cambuí, MG

A	B	C	D	E
1 - Água na entrada no sistema = 95.795,61 m ³ /ano (100%)	2 - Consumo autorizado = 68.570,43 m ³ /ano	4 - Consumo autorizado faturado = 68.570,43 m ³ /ano	8 - Consumo faturado medido (incluindo água exportada) = 68.570,43 m ³ /ano	17 - Água faturada = 68.570,43 m ³ /ano (71,58%)
			9 - Consumo faturado não medido = 0 m ³ /ano	
		5 - Consumo autorizado não faturado = 0 m ³ /ano	10 - Consumo não faturado medido = 0 m ³ /ano	18 - Água não faturada (perdas comerciais) 27.225,18 m ³ /ano (28,42%)
			11 - Consumo não faturado não medido = 0 m ³ /ano	
	6 - Perdas aparentes = 625,87 m ³ /ano	12 - Usos não autorizados = 81,36 m ³ /ano		
		13 - Erros de medição = 544,50 m ³ /ano		
	3 - Perdas de água = 27.225,18 m ³ /ano	7 - Perdas reais = 26.599,31 m ³ /ano (27,77%)	14 - Perdas nos sistemas de adução e/ou distribuição = 19.602,13 m ³ /ano	
			15 - Perdas e extravasamento nos reservatórios = 1.715,19 m ³ /ano	
			16 - Perdas nos ramais (montante do ponto de medição) = 5.282,00 m ³ /ano	

A partir da análise do balanço hídrico, é possível observar que os valores obtidos estão coerentes com as principais referências no assunto. As perdas totais estimadas são equivalentes a 28,42% do volume de entrada do sistema, enquanto que as perdas reais equivalem 27,77% do montante. As perdas reais equivalem a 97,70% das perdas totais, evidenciando que as perdas físicas são as principais componentes deste montante, devendo ser combatidas efetivamente.

Os valores apresentados na tabela do balanço hídrico foram obtidos através de levantamento de dados em campo, pesquisas junto ao SAAE Cambuí ou estimativa de valores aplicados em outros estudos, conforme descritos a seguir.

- Coluna A - Entrada do sistema (1): obtida através da média diária dos sete dias consecutivos da campanha de campo (outubro de 2014). O valor considerado foi

o medido na saída de R4 (entrada do setor). O SAAE Cambuí não possui dados referentes;

- **Coluna E - Água faturada e não faturada (17 e 18):** obtida através do volume faturado das ligações localizadas no setor de estudo (organizadas por bairros) no mês de outubro de 2014, fornecido pelo SAAE Cambuí. Alguns bairros como Água Branca e Bela Vista, além da Rua Miguel Lousada, não estão completamente no setor de estudo, sendo necessário calcular o consumo proporcional relativo ao setor. Na Tabela 20, Tabela 21 e Figura 53 são apresentados os dados de consumo por bairro, número de ligações e consumo total, relativos ao mês de outubro de 2014 e também o consumo médio por mês ao longo de um ano.

Tabela 20: Consumo real (água faturada) e número de ligações

Bairros / Ruas	Consumo real (proporcional ao setor) [m ³ /mês]	Ligações (no setor)	Estimativa de população (4,5 pessoas/ligação)
Água Branca	1.008,43	64	288
Bela Vista	289,40	28	126
Vale das Montanhas	285,00	27	120
Vale das Rosas	126,00	10	45
Vale do Sol	728,00	82	369
Vila Mariana	2.854,00	247	1.111
Rua Miguel Lousada	65,11	6	27
Rod. Cristóvão Sheradia	358,26	23	103
Total	5.714,20	487	2.189

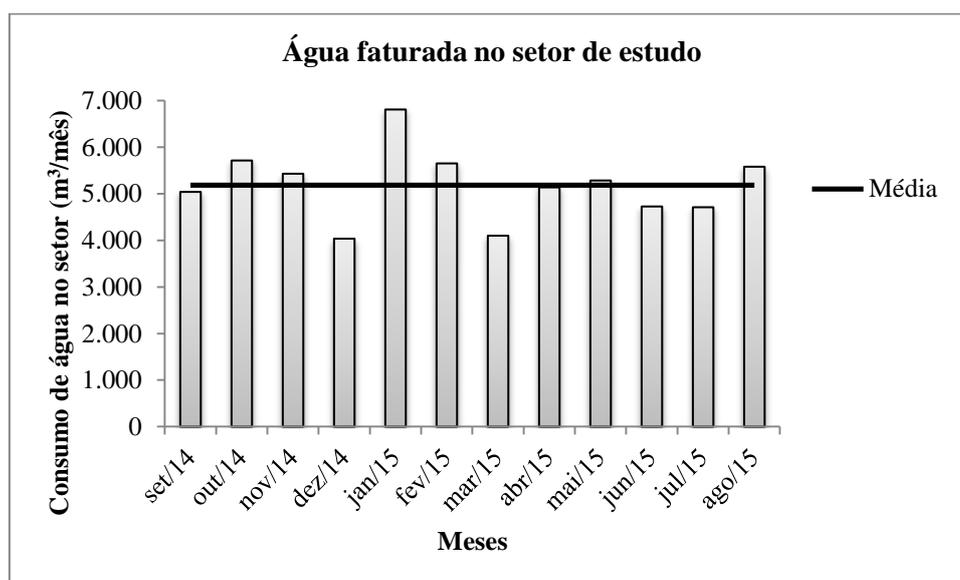


Figura 53 - Consumo de água ao longo do ano no setor de estudo

Tabela 21: Vazão de entrada, água faturada e não faturada referentes a out./2014

	m ³ /mês	m ³ /ano	Porcentagem
Entrada setor (valor campanha de campo)	7.982,97	95.795,61	100%
Água faturada (dados SAAE)	5.714,00	68.570,43	71,58%
Água não faturada = entrada - água faturada	2.825,56	27.225,18	28,42%

É possível observar na Figura 53 que o consumo do mês de outubro foi bem próximo a média anual, justificando o uso dos dados referentes a este mês para a realização do balanço hídrico. Como os dados de entrada são relativos à campanha de campo, também realizada em outubro, optou-se por adotar apenas este mês. Se usados como dados de entrada a média da água faturada ao longo de um ano, o valor referente às perdas totais do sistema se elevaria de 28,42% para 35,40%, o que pode ser considerado uma distorção de dados. O ideal seria se o SAAE Cambuí possuísse dados relativos a entrada do sistema, podendo assim ser utilizados a média anual faturada.

O SAAE Cambuí não possui dados referentes à entrada do setor, sendo assim foram utilizados os dados obtidos durante a campanha de campo, o que pode ocasionar erros. A partir dos valores fornecidos pelo SAAE relativos ao consumo faturado real (água faturada) no mês de outubro de 2014, foi possível obter volume não faturado (perdas totais), que representa 28,42% do montante total.

- Coluna D - Consumo faturado não medido, consumo não faturado e usos não autorizados (9, 10 e 11): valores zerados devido à inexistência de tais consumos e usos no setor de estudo;
- Coluna D - Erros de medição (13): valores estimados em 2% do volume faturado (COELHO, 2009; RECH, 1999). O SAAE Cambuí não possui dados relativos;
- Coluna D - Usos não autorizados (12): valores estimados em 13% das perdas aparentes (TOMAZ, 2009; Alegre *et al.*, 2005). O SAAE Cambuí não possui dados relativos;
- Coluna C - Perdas aparentes (6): obtidas através da soma dos valores de uso não autorizado e erros de medição;
- Coluna C - Perdas reais (7): calculadas subtraindo o valor das perdas aparentes no montante das perdas totais;
- Coluna D - Perdas na adutora e distribuição (14): adotou-se o valor de 68,7% das perdas totais referentes às perdas na distribuição e 3,3% como perdas na adutora (FARLEY, 2001), resultando em 72%;

- Coluna D - Perdas nos reservatórios (15): valor estimado em 6,3% das perdas totais (FARLEY, 2001). O SAAE Cambuí não possui dados relativos;
- Coluna D - Perdas nos ramais (montante do ponto de medição) (16): valor obtido da subtração das componentes das perdas reais (perdas na adutora e distribuição e perdas nos reservatórios).

Como é comum no Brasil a utilização de um consumo mínimo (da ordem de 10 m³/mês), o consumidor paga mesmo que use menos água do que o valor mínimo estabelecido. Em alguns casos, portanto, o volume faturado poderá ser maior que o utilizado.

5.4. Perdas reais - Método Vazões Mínimas Noturnas

Em paralelo ao desenvolvimento do balanço hídrico do setor em estudo, foi utilizada a metodologia das vazões mínimas noturnas para o cálculo das perdas reais. Os dados iniciais para o cálculo das perdas foram obtidos durante a campanha de campo, em outubro de 2014. Vale ressaltar que o horário de mínimo noturno considerado em todo o trabalho foi das 4h30 às 5h30, adotado após análise dos dados de vazão e pressão durante a semana de monitoramento.

Na Tabela 15 (inserida no item 6.1), são apresentadas as médias de pressões horárias do setor ($P_{i_{24h}}$) e o FND relativo a estes horários. O setor de estudo não apresenta consumo legítimo noturno ($Q_l=0$, por exemplo indústrias ou empreendimentos que funcionem durante a madrugada). O valor de N_l adotado para este cálculo foi de 1,5, conforme apresentado por Gonçalves e Lima (2007). Na Tabela 22 são apresentados os dados utilizados para o cálculo da vazão de perdas.

Tabela 22: Dados utilizados para o cálculo da vazão de perdas, através do MMN

FND [h/dia]	13,22
Q_{mn} [m ³ /h]	8,53
Q_l [m ³ /h]	0,00
$P_{i_{24h}}$ [mca]	Variável (ver Tabela 12)
P_{mn} [mca] (4h30 às 5h30)	41,17 (ver Tabela 12)
N_l (PVC)	1,5
Q_{perdas} [m ³ /dia]	112,80
Q_{perdas} [m ³ /ano]	41.173,49

Se considerado o valor de entrada medido durante a campanha de campo, é possível obter um valor médio de perdas reais no setor de 42,98%, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23: Vazão de entrada e perdas reais, calculados pelo MMN

Vazão	l/s	m ³ /dia	m ³ /ano	Porcentagem
Entrada	3,04	262,45	95.795,61	100%
Perdas reais	1,31	112,80	41.173,49	42,98%

É possível observar na Tabela 23 que o valor obtido de perdas reais pelo método do mínimo noturno é bastante elevado, se comparado com os dados do balanço hídrico. Isso pode ser justificado devido a consumos legítimos durante a noite ou ainda uma situação anormal de abastecimento, conforme apresentado no próximo subitem.

5.5. Comparação entre valores obtidos de perdas reais

As perdas reais do sistema foram calculadas a partir da metodologia de balanço hídrico do IWA e também através do método das vazões mínimas noturnas. Em ambos os métodos a fiabilidade dos valores obtidos pode ser contestada.

Os dados de entrada do sistema, apresentados na Tabela 19 referentes ao balanço hídrico, foram obtidos baseados nas medições de uma semana, no período da campanha de campo em outubro de 2014, porém os dados de consumo faturado foram disponibilizados pelo SAAE Cambuí baseado nas leituras dos hidrômetros de cada residência do setor de estudo, durante o mês de outubro de 2014. Neste caso pode haver diferenças, pois um dado se refere a uma média semanal e o outro a uma média mensal de medidores. O SAAE Cambuí não possui controle ou registros que aferem a quantidade de água entregue ao setor, por isso foi utilizada a vazão de entrada medida em campo.

Já no caso do método das vazões mínimas noturnas, onde foi estimada a perda real, é necessário considerar alguns pontos. O primeiro deles se refere a falhas em alguns medidores de pressão, conforme apresentado anteriormente na Figura 50, o que acarreta naturalmente em interferência nos resultados obtidos.

O segundo ponto se refere ao consumo mínimo medido durante a madrugada, que pode ter sido superestimado baseado na situação em que o município de Cambuí e a região Sudeste em geral passavam em relação à estiagem prolongada e anormal. Os

mananciais da região estavam com nível bem abaixo do normal, o que afetou inúmeras cidades. No caso de Cambuí, durante a campanha de campo, foi garantido pelo SAAE que não houve redução no fornecimento de água, porém foi registrada falta de água no setor de estudo. A situação era tão crítica no período que após a campanha de campo, foi iniciado em Cambuí o racionamento de água, com interrupção no fornecimento durante 5h por dia, de segunda a sexta-feira, das 12h às 17h, para garantir que a água abasteça toda a cidade, evitando cortes sem avisos prévios.

De posse dessas informações e avaliando os dados monitorados durante a madrugada de maio de 2015, pode-se inferir que a situação de abastecimento do município em estudo podia estar influenciada pela realidade local. A vazão medida em maio durante a madrugada foi em torno de 1,50 l/s, o que contrasta com a mínima noturna obtida em outubro de 2014, em torno 2,37 l/s, conforme apresentado na Tabela 18 anteriormente. Dentre as hipóteses levantadas, pode-se avaliar a possibilidade do consumo durante a madrugada em outubro ser elevado devido ao abastecimento das caixas d'água neste período, bem como consumo legítimo durante a madrugada para suprir possíveis desabastecimento durante o dia.

Para comparar os dados mensurados em outubro e maio, foi feita uma estimativa de consumo noturno baseada nos dados fornecidos pelo SAAE nestes meses. Se avaliado proporcionalmente ao consumo mensal, a estimativa da vazão mínima de maio em relação aos dados medidos em outubro seria de 2,19 l/s, superior à vazão real medida em campo em maio, conforme apresentada na Tabela 24. O inverso acontece se calculado o valor de consumo em outubro baseado nas medições de maio, apresentando valor inferior ao medido em outubro. Sendo assim, é possível levantar a possibilidade de desabastecimento durante a campanha de campo em outubro ou mesmo um consumo noturno acima do esperado devido às condições de escassez de chuvas, mas não se pode concluir nada com segurança devido à ausência de dados concretos por parte do SAAE.

Tabela 24: Comparação entre vazões mínimas de outubro/2014 e maio/2015

	Consumo [m ³ /mês] (Fonte: SAAE)	Vazão mínima madrugada [l/s] (Dados de campo)	Estimativa vazão mínima baseada em outubro [l/s]	Estimativa vazão mínima baseada em maio [l/s]
Outubro/2014	5.714	2,37	-	1,62
Maio/2015	5.285	1,50	2,19	-

Considerando todos os fatores supracitados, foram estimados os valores das perdas reais do setor em estudo seguindo duas metodologias distintas e aplicando

diferentes valores de vazão mínima noturna, conforme apresentado na Tabela 25 e Figura 54. Para o cálculo das perdas reais via método das vazões mínimas noturnas (MMN) foram utilizados os dados de pressões obtidos durante a campanha de campo em outubro de 2014.

Tabela 25: Comparação das perdas totais estimadas via diferentes metodologias

Método	Balanco Hídrico (IWA)	MMN (out./2014)	MMN (mai./2015)	MMN (estimativa mai./2015)	MMN (estimativa out./2015)	Média MMNs	Média Geral
Q_{mn} [l/s]	Não se aplica	2,37	1,50	2,19	1,62	1,92	Não se aplica
Perdas reais [l/s]	0,84	1,31	0,83	1,21	0,89	1,06	1,02
Perdas reais [m ³ /dia]	72,87	112,80	71,38	104,21	77,09	91,37	87,67
Perdas reais [m ³ /ano]	26.599,31	41.173,49	26.052,58	38.036,77	28.136,79	33.349,91	31.999,79
Perdas reais [%]	27,77	42,98	27,20	39,71	29,37	34,82	33,41

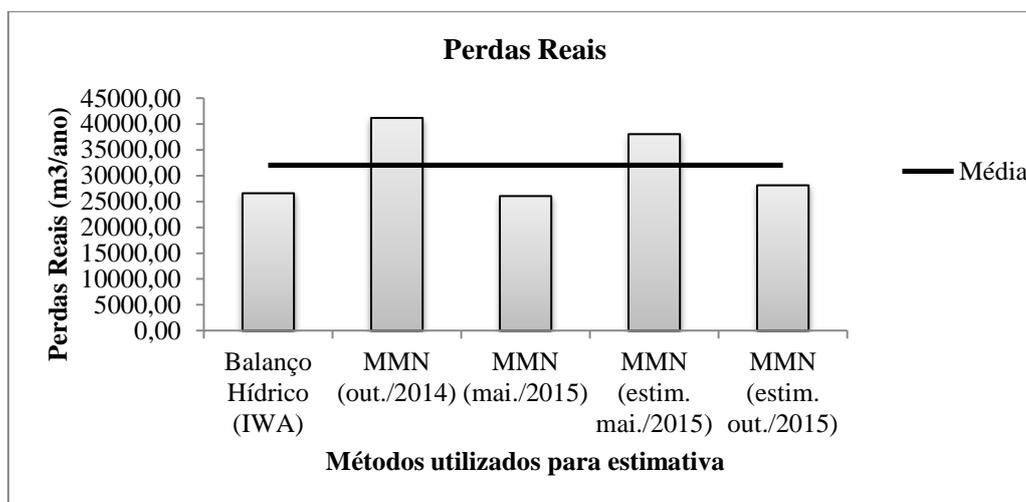


Figura 54 - Perdas reais do setor estimadas a partir de diferentes métodos

A partir da análise dos dados, é possível observar que o valor das perdas reais estimados via balanço hídrico da IWA se mostrou coerente se comparados com os valores obtidos via MMNs, estando próximo do valor médio. O fato do consumo mínimo noturno calculado através dos dados obtidos durante a campanha de campo de outubro ser bastante elevado, se comparado com o balanço hídrico, pode ser explicado devido à condição atípica da região e do período, bem como a um possível

desabastecimento do sistema ou ainda um consumo elevado excessivo durante a madrugada.

O método dos mínimos noturnos para determinação das perdas reais pode ser questionado em alguns aspectos devidos ao uso das caixas d'água residências, o que pode reduzir o efeito das pressões no abastecimento ou ainda mascarar a real condição do sistema, servindo como reserva nos casos de desabastecimento. O ideal seria um acompanhamento constante por parte da concessionária a fim de validar a metodologia e aferir os ensaios em campo, com a obtenção de dados para comparação e análise do sistema.

5.6. Análise energética do sistema

Durante a campanha de campo, foi contratada uma empresa (financiada pelo convênio REDECOPE / FINEP 983-10) que realizou a medição e avaliação dos parâmetros elétricos do setor de estudo, descritos a seguir. Foram monitorados apenas os parâmetros relativos ao R3. Os consumos de energia elétrica da captação de água e da ETA foram estimados a partir de dados fornecidos pelo SAAE.

5.6.1. Qualidade da energia

A empresa contratada para realizar as medições dos parâmetros elétricos realizou também alguns ensaios. Vale ressaltar que em R3 existem duas bombas que mandam água para lugares distintos, incluindo o R4, setor de estudo. As análises feitas pela empresa foram para o R3 de maneira geral, não sendo possível avaliar apenas a parte relativa ao setor.

No período de monitoramento, a tensão média de alimentação dos motores foi de 217 V, dentro dos limites estabelecidos para ser considerada adequada.

O desequilíbrio máximo de tensão foi de 0,33%, enquanto o desequilíbrio de corrente atingiu o valor de 2% em operação. A distorção harmônica total de tensão medida foi de 3,17% e a de corrente 4,3%. Os valores de desequilíbrio como também os valores das distorções harmônicas estão abaixo dos limites recomendados, indicando o bom funcionamento dos componentes dos comandos elétricos. Em períodos transitórios

(partidas e paradas) foi constatado um desequilíbrio de corrente, sendo recomendada a análise de contadores e disjuntores.

O fator de potência médio foi de 0,86, valor de acordo com os dados nominais do motor, mas abaixo o limite de 0,92. Recomenda-se a correção do fator de potência, evitando custos adicionais por consumo excessivo de reativo.

5.6.2. Demanda de potência elétrica em R3

Durante a campanha de campo, foram monitoradas as potências ativa e reativa, tensões, corrente, distorções harmônicas, frequência e fator de potência do motor (em R3 existem duas bombas operando e nenhuma bomba reserva). Na Figura 55 é apresentada a curva de demanda diária de potência elétrica no R3, considerando as duas bombas.

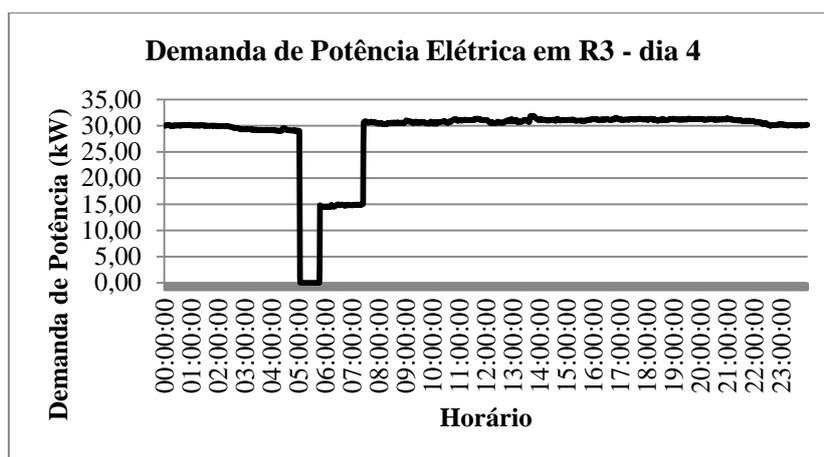


Figura 55 - Demanda de potência elétrica do R3 durante o dia 10/10/2014

A demanda de potência média em R3 durante os sete dias da campanha de campos foi de 28,77 kW. A potência do motor 1 foi de 18,41 kW e do motor 2 de 16,53 kW.

5.6.3. Avaliação das bombas em R3

Foram realizados ensaios nos conjuntos motobombas de R3 pela empresa contratada, utilizando como base a norma DIN EN ISO 9906, de março de 2013.

Para a determinação dos rendimentos dos conjuntos motobombas, foram medidas as pressões na entrada e na saída das bombas, a vazão e a potência elétrica.

Os conjuntos motobombas foram testados isoladamente e em paralelo. Para isolar o conjunto, foi fechada a válvula que liga as duas tubulações de recalque e desligado o segundo conjunto. Para realização dos ensaios, foi medido o ponto de operação para a vazão de operação normal, sugerida pelo técnico do SAAE e o ponto de operação com a válvula de saída fechada (*shutoff*). Foram obtidos junto ao fabricante das bombas os testes de laboratório realizados, com o objetivo de comparar com os resultados obtidos nos ensaios. Na Tabela 26 são apresentados os dados obtidos através dos ensaios em campo e também os dados fornecidos pelo fabricante, ensaiados em laboratório.

Tabela 26: Comparação dos ensaios das bombas de R3 (campo x laboratório)

Bomba	Ponto	Bombas ensaiadas em campo			Bombas ensaiadas em laboratório		
		Q [m ³ /h]	H [m]	η_t [%]	Q [m ³ /h]	H [m]	η_t [%]
1	<i>Shutoff</i>	0,0	63,2	-----	0,0	73,7	-----
	Operação	37,5	54,3	35	37,5	73	62
2	<i>Shutoff</i>	0,0	69,2	-----	0,0	73,7	-----
	Operação	22,6	67,5	32	22,6	74,3	50

Analisando a Tabela 26, é possível observar que as alturas obtidas em ambas as bombas (analisadas isoladamente) são inferiores das testadas em laboratório. A bomba 1 opera com uma diferença de 18,7 m abaixo do valor indicado pelo fabricante, enquanto a bomba 2 apresenta 6,8 m inferiores.

Com relação aos rendimentos, as bombas 1 e 2 operam nas faixas de 35% e 32%, respectivamente, enquanto que os valores ensaiados em laboratório preveem rendimentos de 62% para a bomba 1 e 50% para a bomba 2, valores bem inferiores às bombas originais quando saíram da fábrica. Estes dados deixam evidente que a manutenção das bombas pode não ser eficiente. As cargas hidráulicas insuficientes, quando comparadas às bombas originais, indicam que as bombas podem estar com problemas internos, isto é, os anéis de desgaste necessitam ser substituídos e o rotor das

bombas pode estar danificado ou desgastado, requerendo manutenção urgente ou até mesmo de a substituição.

Após a análise dos ensaios de rendimentos, foi detectada uma necessidade maior ao processo de manutenção das bombas, que na ocasião forneceram menos água para uma mesma quantidade de energia consumida. Ambas as bombas têm seu ponto de operação normal em $Q=40\text{m}^3/\text{h}$ e $H=72\text{m}$ (dados fornecidos pelo fabricante) e se operadas próximas a esses pontos, após a manutenção, terão sua eficiência melhorada.

Quanto aos ensaios das bombas associadas em paralelo, foi detectado que as bombas operando isoladamente apresentam melhor rendimento do que associadas entre si, porém sendo necessária manutenção adequada e periódica.

Devido às condições de operação das bombas, o ideal seria ter pelo menos uma bomba reserva no R3 para substituição em casos de reparos e manutenção.

5.6.4. Consumo de energia elétrica no setor

Para a estimativa do consumo de energia em R3, foram obtidos dados junto ao SAAE Cambuí e comparados às medições dos parâmetros elétricos realizadas pela empresa contratada durante a campanha de campo, conforme apresentado na Figura 56 e Figura 57.

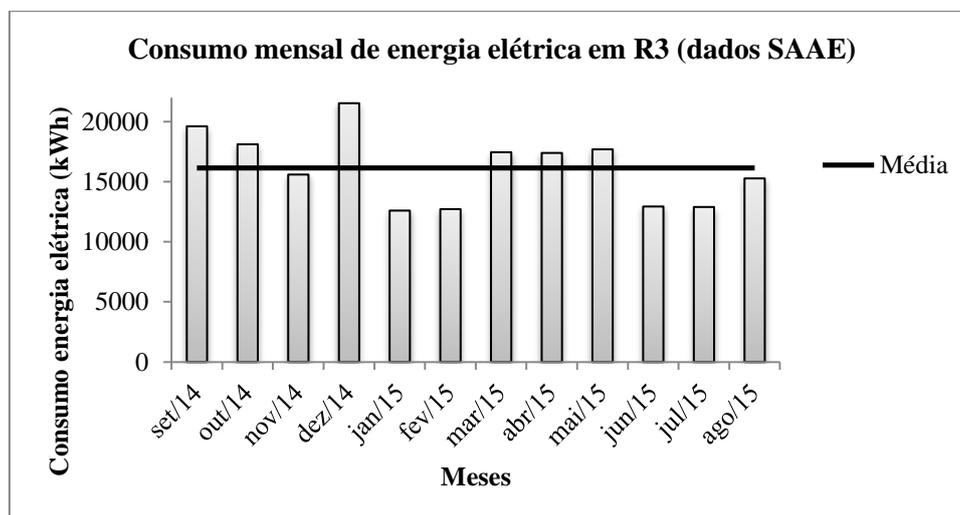


Figura 56 - Consumo mensal de energia elétrica em R3 (dados do SAAE)

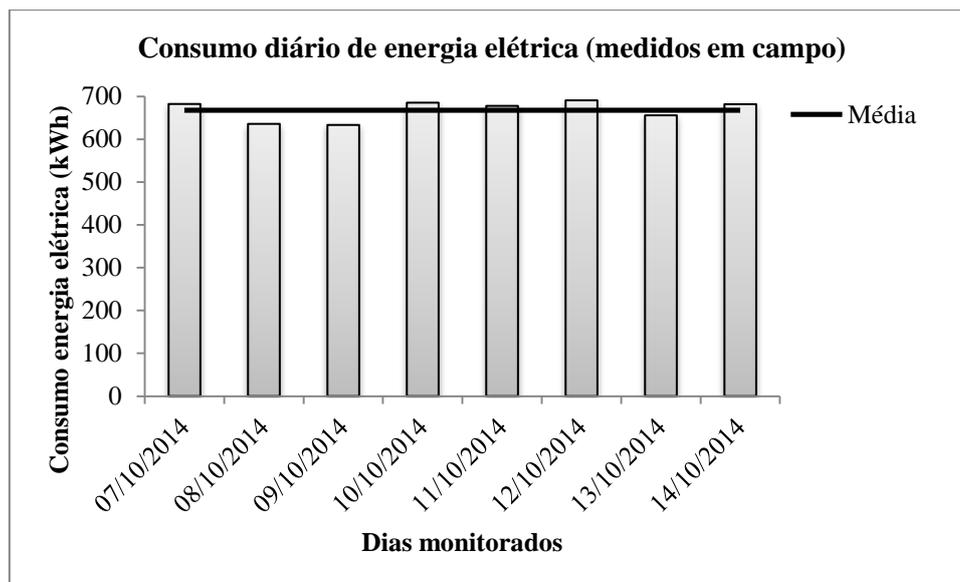


Figura 57 - Consumo diário de energia elétrica em R3 (dados medidos em campo)

O consumo médio diário foi de 668 kWh, o que equivale a um período de operação médio em torno de 22 horas por dia, evidenciando a operação quase ininterrupta dos conjuntos motobomba no período.

Como os dados medidos em campo se referem às médias de consumo diário e os dados fornecidos pelo SAAE se referem aos consumos mensais, é apresentada na Tabela 27 a comparação destes dados em unidades equivalentes. O consumo mensal e anual calculado a partir dos dados medidos em campo foram obtidos multiplicando pela quantidade de dias no ano e no mês e o consumo mensal se refere ao mês de outubro de 2014, data que coincide com a campanha de campo.

Tabela 27: Comparação de dados de consumo de energia elétrica em R3

	Consumo diário [kWh]	Consumo mensal [kWh]	Consumo anual [kWh]
Dados SAAE (out/2014)	604,00	18.120,00	217.440,00
Dados medidos em campo	668,06	20.320,16	243.841,90

É possível observar que os dados medidos em campo são coerentes se comparados com os dados fornecidos pelo SAAE. Tal diferença se deve a possíveis erros de medição dos equipamentos e também variação de consumo ao longo das semanas, visto que os dados medidos em campo foram referentes a apenas uma semana do mês de outubro, extrapolados para o restante do mês. É possível observar na Figura 56 que o consumo de energia no mês de outubro de 2014 foi superior a média do

período do ano, justificando valores elevados em relação aos fornecidos pelo SAAE. Nos cálculos do balanço energético foram utilizados os dados fornecidos pelo SAAE.

Vale ressaltar que a vazão bombeada por R3 abastece outros bairros além do setor de estudo. Foi necessário calcular a real contribuição de R3 no setor de estudo para assim estimar o consumo de energia referente. Para isso foram levantadas as vazões bombeadas em R3 (medidas durante a campanha de campo) e calculados o consumo de energia proporcional à vazão de entrada do setor, conforme dados apresentados na Tabela 28. O mesmo foi feito para a captação de água no Ribeirão das Antas e na ETA.

Tabela 28: Consumo de energia em R3, na captação, na ETA e proporcional ao setor

	Consumo mensal [kWh/mês]	Vazão [m ³ /mês]	Consumo [kWh/m ³]	Vazão do setor [m ³ /mês]	Contribuição do setor [%]	Consumo do setor [kWh/mês]	Consumo do setor [kWh/ano]
R3	18.120	27.959	0,6481	7.982,97	28,55	5.173,70	62.084,35
Captação	65.785	157.680	0,4172	7.982,97	5,06	3.330,54	39.966,48
ETA	49.604	223.380	0,2221	7.982,97	3,57	1.772,71	21.272,47

É possível observar que o setor de estudo equivale a 28,55% do total bombeado por R3, 5,06% da energia consumida na captação e 3,57% da energia gasta na ETA.

Apesar do trabalho possuir o foco em avaliar as condições de apenas um setor dentro da rede, vale ressaltar que a água que chega para abastecimento dos bairros em questão é captada e tratada e as perdas relativas ao setor devem levar em consideração também o consumo de energia consumido nestas etapas.

Foram levantados dados junto ao SAAE relativo ao consumo de energia elétrica na captação de água no Rio das Antas. A captação feita na Cachoeira 5 Irmãos não utiliza energia elétrica pois a mesma é distribuída utilizando a força da gravidade. Na Tabela 28 são apresentados os dados relativos à captação de água e à ETA e o proporcional ao setor. Os dados foram fornecidos pelo SAAE e os cálculos foram baseados nos consumos de outubro de 2014, assim como a vazão do setor e energia em R3.

5.6.5. Balanço de energia

O balanço energético do sistema foi estimado baseando-se nos resultados obtidos no balanço hídrico, considerando os dados de consumo energético mensurados durante a campanha de campo e também fornecidos pelo SAAE Cambuí, além da aplicação de parte da metodologia de Cabrera *et al.* (2010) adaptada. Os valores referentes ao balanço energético do sistema são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29: Balanço de energia do setor em estudo, em Cambuí-MG

E_{ent} (energia de entrada) = 62.084,35 kWh/ano	E_{nat} (energia natural) = 0 kWh/ano	E_{usu} (energia entregue aos usuários) = 43.202,03 kWh/ano	$E_{saíd}$ (energia de saída) = 60.354,95 kWh/ano
	E_{bomb} (energia das bombas) = 62.084,35 kWh/ano	E_{perd} (energia relativa às perdas) = 17.152,92 kWh/ano	
			E_{atr} (energia perdida devido a atritos) = 1.729,40 kWh/ano

O valor de entrada do sistema se refere à quantidade de energia gasta para operação das bombas em R3, proporcional ao setor de estudo. Foi considerada como nula a energia natural, pois toda a água do setor é entregue após passar pelas bombas, não havendo nenhuma contribuição feita por gravidade.

As contribuições referentes à energia entregue aos usuários e às perdas são proporcionais aos valores obtidos no balanço hídrico, o que indica que ao reduzir às perdas de água, automaticamente ter-se-á uma redução no consumo energético, evidenciando a necessidade de controles e programas efetivos para gerenciamento de perdas.

O valor da energia perdida devido a atritos foi estimado a partir de simulações computacionais realizadas por Goulart (2015), que forneceu valores de rugosidade para o sistema em estudo, conforme apresentados no ANEXO B.

Ainda sobre a energia perdida devido a atritos ou energia dissipada, o valor estimado é aproximadamente 2,8 % da energia de entrada do sistema. Se comparado com estudos de Cabrera *et al.* (2010) e Hernández *et al.* (2010), que obtiveram valores em torno de 40% e 45%, respectivamente, relativos à energia dissipada, o valor obtido neste trabalho pode ser considerado baixo, porém a metodologia aplicada é diferente.

Ambos os autores citados aplicaram a metodologia de Cabrera *et al.* (2010) na íntegra, o que difere do trabalho em questão, que adaptou tal metodologia visando sua aplicabilidade. Vale ressaltar que em casos de rede de distribuição de água é bem difícil obter parâmetros de comparação, visto que cada sistema é único e possui suas especificidades. Outro ponto a ser considerado e pode influenciar muito nas perdas de energia relativas ao atrito é o fato do setor em estudo ser compreendido em sua maioria por bairros novos, ainda em processo de ocupação. Sendo assim, parte do setor é constituído por tubulações relativamente novas, o que reduz significativamente a rugosidade do sistema e as incrustações, que são transtornos em qualquer rede mais antiga.

Como já citado anteriormente, as condições de manutenção das bombas podem ser melhoradas, o que resultaria em uma redução no consumo de energia elétrica do setor e conseqüentemente a redução do tempo de funcionamento das bombas, que operam quase que ininterruptamente, em torno de 22h por dia.

5.7. Consumo de reagentes

Durante a etapa de coleta de informações, foram obtidos junto ao SAAE Cambuí dados referentes ao consumo de produtos durante o tratamento da água na ETA para assim estimar o montante proporcional às perdas do sistema e monetizar tal gasto. São utilizados na ETA sulfato de alumínio, cal hidratada, fluossilicato de sódio e cloro gás, nas quantidades apresentadas na Tabela 30. De acordo com dados fornecidos pelo SAAE Cambuí, a partir de julho de 2015 a cal hidratada foi substituída por hidróxido de cálcio em suspensão aquosa, mas esta informação não foi inserida nas estimativas, pois o período de análise é anterior a esta mudança.

A partir dos dados obtidos e da vazão média de água tratada, foi estimado o consumo de cada reagente por m³ de água, visando sua aplicação relativa ao setor de estudo. Tanto a água captada do Rio das Antas quanto a oriunda da Cachoeira 5 Irmãos recebem o mesmo tratamento na ETA e são misturadas. Neste caso vale ressaltar que a água proveniente da Cachoeira 5 Irmãos (Rio do Peixe) é localizada dentro de mata preservada e longe de comunidades, o que indica uma melhor qualidade da água em comparação à do Ribeirão das Antas, que corta o município em sua área urbana, apesar de ambos os mananciais serem classificados segundo a Resolução CONAMA n°

20/1986 (substituída pela Resolução CONAMA nº 357/2005), como Água Doce, Classe II (SAAE, 2015). Para mais informações sobre os mananciais de abastecimento e a qualidade de água, vide ANEXO A.

Tabela 30: Consumo de reagentes utilizados na ETA e estimativa de perdas

Reagentes	Consumo mensal [kg/mês]	Vazão ETA [m ³ /mês]	Consumo [kg/m ³]	Vazão do setor [m ³ /mês]	Contribuição do setor [%]	Consumo do setor [kg/mês]	Perdas relativas [kg/mês]
Sulfato de alumínio	5.871		0,0263			209,80	59,63
Cal hidratada	1.265	223.380	0,0057	7.982,97	3,57	45,21	12,85
Fluossilicato de sódio	152,36		0,0007			5,44	1,55
Cloro gás	234,28		0,0010			8,37	2,38

Foi possível estimar a quantidade de reagentes relativa às perdas de água do setor de estudo (em torno de 28,42%). Estima-se que são perdidos por mês em torno de 59,63 kg de sulfato de alumínio, 12,85 kg de cal hidratada, 1,55 de fluossilicato de sódio e 2,38 kg de cloro gás, reforçando a importância de programas de redução de perdas de água, que além de economia de energia, pode reduzir as despesas em todos os segmentos relativos ao tratamento e distribuição de água. Ao se perder água, perde-se também uma quantidade de produtos químicos utilizados no processo de tratamento, como apresentado na Tabela 30.

5.8. Análise geral do sistema

A partir dos dados de entrada (consumo de eletricidade e reagentes), foi possível elaborar um fluxograma com indicadores de consumo relativos às etapas do sistema (captação, tratamento e distribuição), conforme apresentado na Figura 58. Os dados apresentados são relativos a 1m^3 de água para facilitar a visualização.

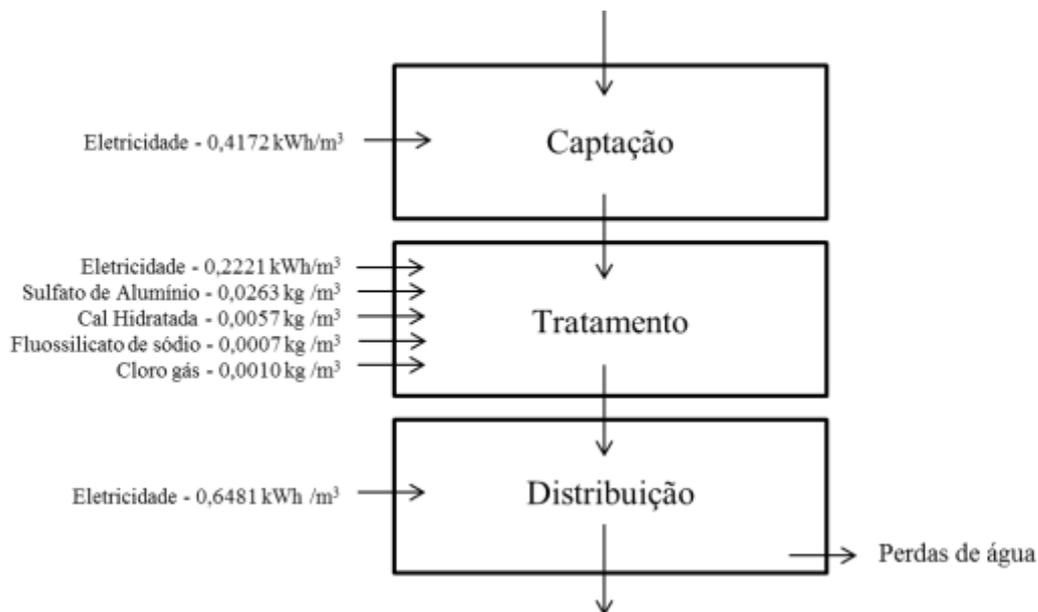


Figura 58 - Consumo de energia elétrica e reagentes por m^3 relativos ao setor de estudo

Apesar do consumo de energia de cada sistema variar muito devido a diversos fatores como, por exemplo, topografia e manutenção dos equipamentos, o consumo de eletricidade na etapa de distribuição obtido para o setor de estudo de $0,6481\text{ kWh/m}^3$ se encontra dentro das faixas apresentadas por Vicentini (2012), que cita valores entre $0,6\text{ kWh/m}^3$ a $0,66\text{ kWh/m}^3$ de água produzida, mas não especifica quais etapas são consideradas. Se consideradas as etapas de captação, tratamento e distribuição, o setor de estudo consome um total de $1,2974\text{ kWh/m}^3$, o que representa quase duas vezes os valores citados por Vicentini (2012), porém está coerente com os diversos valores apresentados por Vilanova e Balestieri (2014) e também por Vilanova *et al.* (2010), que obtiveram como consumo específico médio de energia elétrica de $1,10\text{ kWh/m}^3$ para o município de Lavras - MG. Vale ressaltar que o valor apresentado referente a distribuição se refere apenas ao setor de estudo.

A partir desta análise, foi possível ter uma visão geral da contribuição dos gastos energéticos da captação e tratamento de água, bem como mensurar sua colaboração e

influência relacionada às perdas de água no sistema. Vale ressaltar que os dados aqui apresentados são dados reais, coletados em campo e através da equipe técnica responsável pelo SAAE de Cambuí.

5.9. Balanço monetário do sistema

Foram obtidos dados junto ao SAAE referentes às despesas e investimentos anuais, divididas em administração, sistema de água, sistema de esgoto e ETA. Como o SAAE Cambuí é responsável pelos serviços de água e esgoto, é difícil estimar um valor referente apenas aos custos da produção e distribuição por m³ de água, foco deste trabalho. Sendo assim, a partir dos dados fornecidos pelo SAAE, foram estimados os custos relativos ao sistema de água e da ETA (não considerando os investimentos).

Estão inclusos nos dados fornecidos pelo SAAE as despesas com departamento pessoal, serviços prestados (contas de energia dentre outros), diárias, passagens, indenizações e materiais de consumo, de toda a rede de Cambuí. Dentre os materiais de consumo estão os valores gastos com reparos e manutenção, não considerando investimentos com ampliação da rede e compra de novos equipamentos. É possível observar na Figura 59 que a maior parte das despesas se refere à folha de pagamento e aos serviços realizados por pessoa jurídica, onde estão inclusas as despesas com energia elétrica. Na Figura 59 são mostradas as principais contribuições relativas às despesas do SAAE Cambuí para captação, adução e distribuição de água (sistema de água) e para o tratamento (ETA).

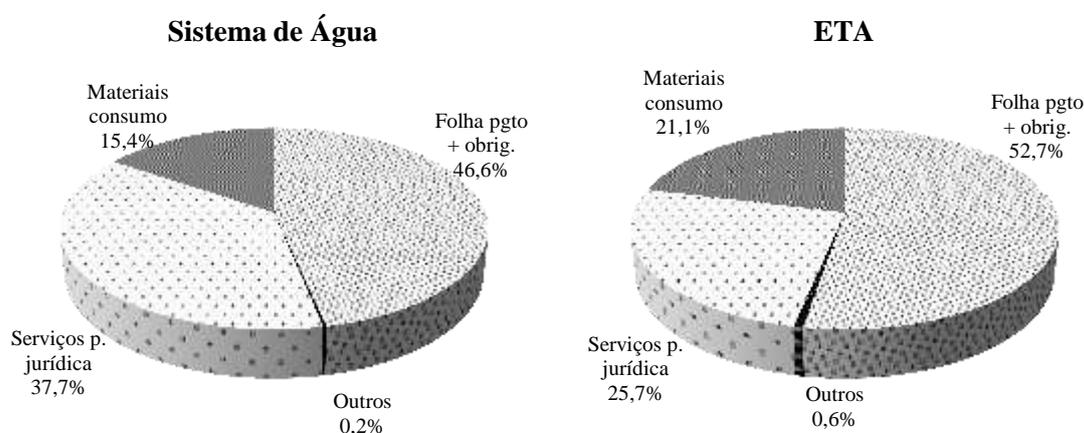


Figura 59 - Contribuições do sistema de água e da ETA nas despesas do SAAE

A partir da análise dos dados, foi possível estimar o custo por m³ de água, considerando as médias anuais de despesas e as atividades referentes, conforme apresentado na Tabela 31. Vale ressaltar que o SAAE Cambuí é responsável tanto pelos serviços de água quanto de esgoto, não sendo possível delimitar as reais contribuições de cada uma das áreas.

Tabela 31: Estimativas de custo de água do SAAE (baseado em dados reais)

Descrição	Despesas por m ³ de água [R\$/m ³]	Observações
Sistema de água	0,48	Captação, adução e distribuição
ETA	0,33	Apenas o tratamento
Sistema de água + ETA	0,81	Captação, adução, distribuição e tratamento
Sistema de água e esgoto	1,60	Inclui esgoto, administração, investimentos, dentre outros

Durante a delimitação das fronteiras do sistema para estimativa do balanço hídrico e energético foi considerado apenas o setor de estudo, a partir de R3. Como o SAAE Cambuí possui apenas dados globais, foi estimada uma proporção de custos relativos ao setor baseado nas despesas apenas do sistema de água (onde está inclusa a captação). O setor de estudo corresponde a aproximadamente 4% de todo o município de Cambuí, conforme já apresentado anteriormente. A estimativa de despesas relativas ao setor, bem como os valores associados às perdas totais (28,4%) são apresentados na Tabela 32. Importante salientar que dentre as despesas estão inclusos itens globais como pagamento dos funcionários, manutenção da rede, combustível gasto pelos veículos e também as contas de energia elétrica, não sendo considerados os valores relativos à administração nem os investimentos com ampliação e equipamentos.

Tabela 32: Despesas estimadas relativas às perdas no setor de estudo

	Estimativa das despesas anuais	
Setor de estudo	R\$	46.146,80
Perdas (28,4%)	R\$	13.114,95

De acordo com os valores estimados, somente dentro do setor de estudo perde-se por ano o valor relativo a R\$ 13.114,95. Em pesquisa dentro do SAAE, não foram levantados despesas relativas diretamente a programas de redução e combate às perdas. Não existem ações específicas para reduzir as perdas do sistema, o que existe é um registro de chamadas (ordem de serviços) relativas às perdas reais (rupturas e vazamentos na rede) com envio de equipe de manutenção para resolver o problema em

questão. No SAAE Cambuí existem programas de recuperação e preservação dos mananciais e nascentes do município, com gastos anuais estimados em torno de R\$ 7.497,55, o que representa algo em torno de 0,2% de todas as despesas anuais. Apenas a título de comparação, o valor relativo às perdas apenas do setor de estudo é superior ao valor investido em programas de preservação da água por ano.

5.9.1. Despesas com energia

No item 5.6.4, foram estimados os consumos de energia elétrica gastos em R3, na ETA e na captação no Rio das Antas, por m³ de água, baseados apenas no mês de outubro. Na Tabela 33 estão reunidos os valores monetários médios referentes à energia elétrica do sistema. Os valores estimados de consumo em R3, na captação e na ETA são proporcionais ao setor de estudo e as perdas estimadas se referem aos valores obtidos através do balanço hídrico (28,4%). Se considerarmos apenas o setor de estudo, que compreende as bombas em R3, temos valores médios de despesas anuais para 2014 e 2015 de R\$ 47.280,35 e com perdas estimadas em R\$ 13.437,11. Já com relação ao consumo de energia, o valor médio anual é em torno de 110.486,95 kWh, com perdas estimadas em 31.400,47 kWh. É importante evidenciar que são estimativas baseadas em dados reais fornecidos pelo SAAE Cambuí.

O custo estimado da energia elétrica por kWh varia um pouco em cada uma das três etapas. Se considerarmos como valor de referência a tarifa de consumo por kWh da CEMIG em 2014 de R\$ 0,40 por kWh (tarifa B3, Resolução Homologatória Aneel 1.700, de 07/04/2014), os valores estimados estão próximos à taxa da concessionária de energia. O custo elevado em R3 pode ser justificado pelo funcionamento quase ininterrupto das bombas (em torno de 22h por dia), bem como a carência de manutenção das bombas e possível funcionamento inadequado dos equipamentos. Para se realizar uma análise detalhada da energia consumida, seria necessário levantar os horários de ponta de energia (três horas consecutivas compreendidas entre às 17h e 22h, definido por cada distribuidora, de acordo com o registro do maior consumo nos dias úteis) e relacioná-los com o consumo ao longo dia e também levantar a demanda contratada para avaliar se existem cobranças extras quando ultrapassados os limites. A energia pode se tornar 10 vezes mais cara nos horários de ponta (LAMOGLIA, 2013).

As tarifas energéticas sofreram alterações a partir de 2015, onde foram instaladas as bandeiras tarifárias, que variam de acordo com os custos de compra de

energia pelas distribuidoras. Devido às condições de escassez de chuvas no ano de 2014 e 2015, a energia se tornou mais cara nestes períodos, tendo reflexo nos valores das tarifas da CEMIG, que variaram de 0,50974 R\$/kWh para a bandeira verde a 0,55474 R\$/kWh para a bandeira vermelha patamar 2 (tarifa B3, CEMIG 2015). Na Tabela 33 é possível observar este incremento dos valores pagos pela energia elétrica no ano de 2015. Os valores médios em 2015 variaram de 0,57 R\$/kWh em R3 a 0,47 R\$/kWh, estando dentro dos valores das tarifas da CEMIG. A maior parte do ano de 2015 as tarifas estiveram dentro das bandeiras vermelhas ou amarelas, indicando uma cobrança extra no valor da energia.

Os dados aqui apresentados foram baseados em relatórios fornecidos pelo SAAE Cambuí-MG.

Tabela 33: Estimativas de despesas com energia elétrica, proporcionais ao setor

	Valor energia elétrica [R\$/ano]	Perdas energia elétrica [R\$/ano]	Consumo do setor [kWh/ano]	Perdas consumo [kWh/ano]	Custo energia elétrica por consumo [R\$/kWh]
2014					
R3	R\$ 24.409,17	R\$ 6.937,10	63.232,16	17.970,62	0,39
Captação	R\$ 8.194,62	R\$ 2.328,92	28.939,37	8.224,59	0,28
ETA	R\$ 8.153,98	R\$ 2.317,37	26.601,31	7.560,11	0,31
Total	R\$ 40.757,78	R\$ 11.583,39	118.772,85	33.755,33	-
2015					
R3	R\$ 29.107,21	R\$ 8.272,29	51.068,84	14.513,80	0,57
Captação	R\$ 13.139,71	R\$ 3.734,32	27.781,06	7.895,40	0,47
ETA	R\$ 11.556,00	R\$ 3.284,22	23.351,16	6.636,42	0,49
Total	R\$ 53.802,92	R\$ 15.290,83	102.201,06	29.045,61	-
Médias (2014 e 2015)					
R3	R\$ 26.758,19	R\$ 7.604,70	57.150,50	16.242,21	0,48
Captação	R\$ 10.667,17	R\$ 3.031,62	28.360,22	8.059,99	0,38
ETA	R\$ 9.854,99	R\$ 2.800,80	24.976,24	7.098,26	0,40
Total	R\$ 47.280,35	R\$ 13.437,11	110.486,95	31.400,47	-

A partir dos dados gerais de despesas de água e também dos dados de consumo de energia em toda rede de Cambuí (excluindo valores de administração e da ETE), foi estimado o valor relativo ao consumo de energia de todo o sistema de abastecimento de água do município de Cambuí, apresentado na Tabela 34 e Figura 60. Nota-se, em média, que o valor gasto com energia elétrica no sistema de Cambuí é em torno de 29% do valor total das despesas orçamentárias, que incluem mão de obra, manutenção e itens

diversos desde a captação, passando pela adução, tratamento e distribuição de água de todo o município de Cambuí.

Tabela 34: Valor monetário da energia elétrica em comparação com as despesas orçamentárias do sistema de distribuição de água de Cambuí-MG

	2014	2015	Observações
Despesas orçamentárias	R\$ 2.255.668,05	R\$ 2.668.478,18	Não inclui administração, ETE e investimentos
Despesas energia elétrica (Sistema de Água)	R\$ 580.262,21	R\$ 835.050,20	Não inclui administração e ETE
Porcentagem	26%	31%	-

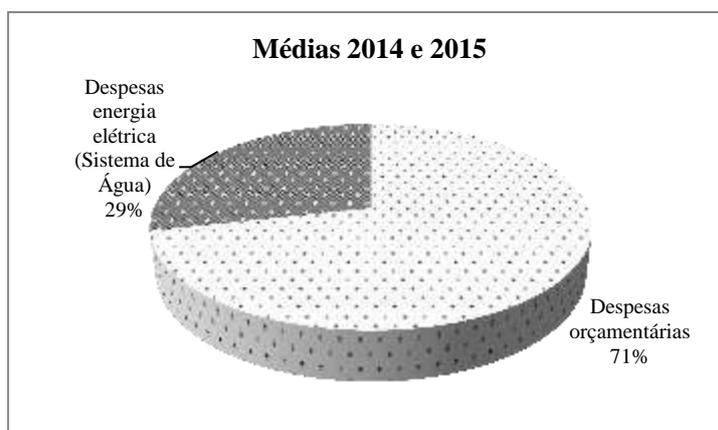


Figura 60 - Relação entre despesas orçamentárias e energia elétrica do sistema de distribuição de água de Cambuí-MG

Apenas no ano de 2015, o valor gasto com contas de energia relativas ao sistema de água passou dos R\$ 800.000,00, evidenciando elevados custos de energia no município. Não pode-se descartar junto a administração do SAAE Cambuí a possibilidade de investimentos em programas para consumo consciente de energia e um estudo detalhado do sistema.

6. CONCLUSÕES

As campanhas de campo realizadas ao longo do trabalho foram essenciais para a obtenção dos resultados aqui apresentados. Foi possível comparar dados medidos em campo com informações cedidas pelo SAAE Cambuí, a fim de estimar valores e indicadores os mais próximos possíveis da realidade. A campanha de campo principal foi composta de medições ininterruptas durante sete dias seguidos, onde foram avaliadas as vazões de entrada do sistema, pressões ao longo do setor de estudo, parâmetros elétricos, níveis dos reservatórios, coordenadas geográficas dos principais pontos da rede de estudo, além de informações de escritório, como registros das quantidades de reagentes utilizados na ETA, contas de energia elétrica de todo o município, informações sobre o abastecimento do setor, despesas orçamentárias, dentre outras informações imprescindíveis para implementar a metodologia proposta.

Os objetivos propostos foram alcançados, sendo possível apresentar o balanço hídrico e energético do setor de estudo, além de avaliar os custos e processos envolvidos através de estimativas e simulações.

O setor de estudo representa aproximadamente 3,6% de toda a rede do município de Cambuí, possui em torno de 487 ligações e uma população estimada próxima de 2.189 pessoas. O SAAE Cambuí não realiza medições ou monitoramentos no setor de estudo, sendo necessário utilizar dados medidos durante a campanha de campo, extrapolados para um ano. Como resultados, foram mensurados dados de vazão média da entrada do setor de 3,04 l/s e vazão mínima noturna de 2,37 l/s, o que pode-se concluir que se trata de um setor com baixas vazões e pouca variação de consumo durante o dia. Os elevados valores de consumos durante a madrugada (se comparados com os valores durante o dia) podem ser reflexos das condições climáticas do município de Cambuí durante outubro de 2014 (data da campanha de campo), que passava por um período atípico de estiagem, que pode ter refletido no abastecimento de água.

Alguns medidores de pressão apresentaram erros durante a medição, mas os resultados validados foram suficientes para prosseguir com as estimativas. A diferença de cotas topográficas entre a entrada do setor em R4 ao ponto mais baixo pode chegar a 70 m de altitude, o que acarretou em variações de pressões ao longo da rede, com valores mínimos em torno de 10mca e máximos chegando a 80 mca, nos pontos mais baixos do setor.

A partir dos dados de pressão, foram estimadas as perdas reais, que variam de 0,84 l/s (balanço hídrico *IWA*) a 1,31 l/s (MMN com vazão de out./2014), dependendo do método aplicado. Os resultados obtidos das perdas reais utilizando a metodologia dos consumos mínimos noturno (MMN) se apresentaram coerentes quando comparados com os valores do balanço hídrico.

Com relação à metodologia do *IWA* para a estimativa do balanço hídrico, foram obtidos os seguintes valores de perdas totais e reais, respectivamente, 28,42% e 27,77%, o que é possível concluir que aproximadamente 97,70% das perdas totais são relativas a vazamentos e perdas ao longo da rede. Estes valores são inferiores a média do Brasil, que, segundo dados do SNIS (2014), o índice médio de perdas no ano de 2014 foi de 36,7%, com percentuais que variam para cada região do país, chegando a 33,4 % na região Sudeste. Tal fato pode ser explicado devido ao setor de estudo ser constituído de bairros relativamente novos, com tubulações instaladas há pouco tempo (em torno de 20 anos de uso no máximo).

Com relação ao funcionamento das bombas, foi concluído que as mesmas operam com rendimentos inferiores aos parâmetros de fábrica, o que indica que a manutenção das bombas pode não ser eficiente e requer atenção neste aspecto.

O consumo médio diário de energia em R3 foi de 668 kWh, que equivale a um período de operação médio em torno de 22 horas por dia, evidenciando a operação quase ininterrupta dos conjuntos motobomba no período. Tal valor foi comparado com os dados fornecidos pelo SAAE, que se mostraram um pouco superiores ao consumo médio diário de energia, o que pode ser relativo a erros de medições ou extrapolações ao longo do mês. Foram obtidos dados de consumo de energia elétrica em R3, na captação no Rio das Antas e na ETA. Os valores obtidos foram, respectivamente, 0,6481 kWh/m³, 0,4172 kWh/m³ e 0,2221 kWh/m³, evidenciando um maior consumo em R3, o que reforça o fato acima mencionado relativo à necessidade de manutenção e atenção nos equipamentos ali instalados. Estes valores estão compatíveis com parâmetros citados na revisão bibliográfica, porém vale ressaltar que é impossível comparar tais valores devido às características específicas de cada rede de distribuição, que sofre interferências de relevo, manutenção, programas de redução de perdas, experiência dos administradores, dentre outros inúmeros fatores.

O balanço de energia desenvolvido através da adaptação da metodologia de Cabrera *et al.* (2010) foi estimado baseado no consumo de energia elétrica na entrada do setor. As contribuições referentes à energia entregue aos usuários e às perdas foram

proporcionais aos valores obtidos no balanço hídrico. Foram calculadas as perdas de carga por trecho e obtido o valor de energia perdida devido a atritos ou energia dissipada, em torno de 2,8 % da energia de entrada do sistema. Este valor, se comparado com estudos base nesta área, pode ser considerado baixo, porém a metodologia aplicada é diferente. Mais uma vez é importante evidenciar que em casos de redes reais de distribuição de água é bem difícil obter parâmetros de comparação, visto que cada sistema é único e possui suas especificidades. Outro ponto a ser considerado é o fato do setor em estudo ser constituído em sua maioria de tubulações relativamente novas, o que reduz significativamente a rugosidade e as incrustações, que são transtornos em qualquer rede mais antiga.

Aproveitando os dados disponibilizados pelo SAAE Cambuí relativos ao consumo de reagentes na ETA, foram estimados, como um extra das atividades propostas, os valores de consumo médio de sulfato de alumínio ($0,0263 \text{ kg/m}^3$), cal hidratada ($0,0057 \text{ kg/m}^3$), fluossilicato de sódio ($0,0007 \text{ kg/m}^3$) e cloro gás ($0,0010 \text{ kg/m}^3$).

Devido à ausência de dados detalhados e específicos relativos ao setor, foram realizadas estimativas que se mostraram eficientes para uma visão geral da situação. Com relação ao sistema de água (captação, adução e distribuição, não incluídas despesas administrativas nem investimentos com ampliação e equipamentos) conclui-se que mais de mais de 45% das despesas são referentes ao pagamento de salários e contribuições patronais, 37% são relativas a pagamentos realizados a pessoas jurídicas (incluindo energia elétrica) e 15% são despesas com materiais de consumo, que incluem manutenção da rede.

Foram estimados os valores monetários do m^3 de água, divididos por etapas do sistema. O sistema de água (captação, adução e distribuição) custa em média $0,48 \text{ R\$/m}^3$, o sistema de tratamento de água possui custo estimado em $0,33 \text{ R\$/m}^3$ e todo o sistema de água e esgoto do SAAE Cambuí, incluindo administração, investimentos e esgoto não sai por menos de $\text{R\$ } 1,60$ por m^3 de água. Se considerarmos que para o setor de estudo foi estimada uma perda de quase um terço, ao final das contas, se investidos em programas de redução de perdas, haveria um aumento de receitas e diminuição de custos, aumentando o lucro líquido do sistema em questão.

Por último e não menos importante, foi avaliada a contribuição energética dentro das despesas orçamentárias. Tomando como média os anos de 2014 e 2015, foram obtidos os valores de $0,48 \text{ R\$/kWh}$ em R3, $0,38 \text{ R\$/kWh}$ na captação de água no Rio

das Antas e 0,40 R\$/kWh na ETA. As despesas com energia elétrica representam 29% dos valores gastos na captação, adução, tratamento, distribuição e manutenção (ficando de fora apenas a administração, investimentos e custos relativos a ETE).

Os dados obtidos através das campanhas de campo e dos relatórios do SAAE Cambuí - MG se mostraram satisfatórios para obtenção dos objetivos propostos.

7. RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Os dados coletados durante as campanhas de campo e também junto a colaboradores do SAAE nos fornecem uma ampla variedade de possibilidade de estudos futuros, com aprimoramento das metodologias aqui apresentadas. Ficam aqui registradas as sugestões para novos trabalhos relativos ao município de Cambuí - MG:

- a) Nova campanha de campo para aferir os dados obtidos durante out./2014 e validar a metodologia proposta de balanço hídrico e estimativa de perdas reais através do método dos mínimos noturnos;
- b) Aplicação da metodologia de Cabrera *et al.* (2010) na íntegra para o setor de estudo;
- c) Simulação e calibração da rede para obtenção dos coeficientes de vazamentos;
- d) Análise detalhada das tarifas energéticas e de todos os potenciais consumidores de energia elétrica do sistema para assim levantar alternativas assertivas para melhoria da eficiência energética e econômica do sistema;
- e) Estudo de alternativas para geração de eletricidade utilizando as potencialidades do sistema (por exemplo, micro geração hidrelétrica, instalação de painéis fotovoltaicos, dentre outras);
- f) Avaliação de alternativas para redução de perdas no sistema;
- g) Análise aprofundada das pressões do sistema, com simulações computacionais de instalações de válvulas redutoras de pressão em alguns pontos da rede;
- h) Influência do enchimento das caixas d'água no consumo noturno em casos de desabastecimento;
- i) Desenvolvimento e aplicação de metodologias para determinação de perdas aparentes;
- j) Acompanhamento frequente e rigoroso em relação aos aspectos mencionados neste trabalho para que seja possível a otimização do sistema.

8. REFERÊNCIAS

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Perdas em sistemas de abastecimento de água: diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate.** IN: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia, GO. Setembro, 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Técnica NBR nº 12.218/1994.

AGROMETAL - Reservatórios Metálicos. Disponível em:

<<http://www.agrometal.com.br/industria/pdf/desenho-esquematico-cx.pdf>>. Acesso em out./2015.

ANA - Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil, Abastecimento Urbano de Água.

Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=8#>>. Acesso em jul./2015.

ALEGRE, H.; COELHO, S. T.; ALMEIDA, M. C.; VIEIRA, P.. **Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição.** Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Instituto da Água. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 1 de Novembro de 2005.

ALEGRE, H.; HIRNER, W.; BAPTISTA, J. M.; PARENA, R.. **Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água.** Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, setembro de 2004.

BRITTON, T. C.; STEWART, R. A.; O'HALLORAN, K. R.. Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 166-176. 2013.

CABRERA, E.; PARDO, M. A.; COBACHO, R.; CABRERA JR, E.. Energy Audit of Water Networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, p. 669-677. 2010.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Valores de tarifas e serviços. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>. Acesso em dez./2015.

CHEUNG, P. B.. **Análise de reabilitação de redes de distribuição de água para abastecimento via algoritmos genéticos multiobjetivo.** 288p. Dissertação (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2004.

CHEUNG, P. B.; KIPERSTOK, A.; COHIM, E.; ALVES, W. C.; PHILIPPI, L. S.; ZANELLA, L.; ABE N.; GOMES, H. P.; SILVA, B. C.; PERTEL, M.; GONÇALVES, R. F.. Consumo de Água. *IN:* GONÇALVES, R. F. (org.). **Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água.** PROSAB - Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. V. 1. 290p. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosab5_tema_5.pdf>. Acesso em jan./2016.

COELHO, A. C. **Micromedição em sistemas de abastecimento de água.** João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2009.

COELHO, B.; CAMPOS, A. A.. Efficiency achievement in water supply systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 59-84. 2014.

DUARTE, P.; ALEGRE, H.; COVAS, D. I. C.. **Avaliação do desempenho energético em sistemas de abastecimento de água.** *IN:* VIII Seminário Ibero-Americano - SEREA. Portugal, 2008.

FARLEY, M. **Leakage management and control - A Best Practice Training Manual.** World Health Organization. Geneva, Switzerland. 2001.

FELDMAN, M.. **Aspects of energy efficiency in water supply systems.** *IN:* Proceedings of the 5th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference. 26 - 30, abril 2009, Cape Town, South Africa.

GONÇALVES, E.; LIMA, C. V.. Guias práticos - Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água. **Controle de pressões e operação de válvulas reguladoras de pressão.** Volume 4. Ministério das Cidades. Governo Federal. Brasília, 2007.

Google Mapas. Disponível em

<<https://www.google.com.br/maps/place/Cambu%C3%AD+-+MG/>>. Acesso em jan./2015.

Google Earth Pro. Acesso em maio/2015.

HERNÁNDEZ, E.; PARDO, M.A.; CABRERA, E.; COBACHO, R.. Energy assessment of water networks, a case study. **Water Distribution System Analysis.** Tucson, Arizona, EUA. Setembro, 2010.

GOUVEIA, R. M. M.. **Modelo computacional de otimização para dimensionamento de redes de distribuição de água abastecidas por múltiplos bombeamentos.** 187f.. Tese (Doutorado - Engenharia Mecânica). UFPB/CT/PPGEM. João Pessoa, Paraíba. 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=311060>>. Acesso em jan./2015.

GOULART, T. D. C.. **Estudos de Aprimoramento de Modelo de Calibração empregando Algoritmo Genético e Aplicação em Rede de Distribuição de Água de Cambuí (MG).** 295 p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG. 2015.

ISLAM, M. S.; BABEL, M. S.. Economic Analysis of Leakage in the Bangkok Water Distribution System. **Journal of Water Resources Planning And Management**, n. 139, p. 209-216, mar/Abr. 2013.

LAMBERT, V.; HIRNER, W.. Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. **Voda i sanitarna tehnika**, v. 32(1), p.29-38. 2002.

LAMOGLIA, H. A.. **Estudo da correlação entre perdas de água e energia para setores do sistema de abastecimento de água da cidade de São Lourenço - MG**. 236 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, 2013.

LI, W. F.; LING, W. C.; LIU, S. X.; ZHAO, J.; LIU, R. P.; CHEN, Q. W.; QIANG, Z.; QU, J.. Development of systems for detection, early warning, and control of pipeline leakage in drinking water distribution: A case study. **Journal of Environmental Sciences**, n. 23(11), p. 1816–1822. 2011.

Ministério do Meio Ambiente. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/clima/energia/eficiencia-energetica>>. Acesso em maio/2014.

MORAIS, D. C.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALMEIDA, A. T.. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. **Pesquisa Operacional**. Vol.30, no. 1. Rio de Janeiro, RJ. Jan./Apr. 2010.

MOTTA, R. G. **Importância da setorização adequada para combate as perdas reais de água de abastecimento público**. 2010. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010. p. 01-78. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-18082010-171334/publico/Dissertacao_Renato_Goncalves_Motta.pdf>. Acesso em: junho/2014.

MUTIKANGA, H. E.; SHARMA, S.; VAIRAVAMOORTHY, K.. Water loss management in developing countries: challenges and prospects. **Journal AWWA (American Water Works Association)**, n. 101, p. 12, dez. 2009.

PNCDA - **Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água**. DTA - Documento Técnico de Apoio nº A2. Indicadores de perdas nos sistemas de

abastecimento de água. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. Setembro/2003.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC – USP, 2006. p. 169-184.

RAMOS, F.. **Modelo de um sistema de automação aplicado a setorização de redes de abastecimento de água**. 2011. 155p. Tese (Doutor em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

RECH, A. L.. **Água, micromedição e perdas**. 2ª edição ampliada e revisada. São Paulo: Scortecci, 1999.

RODRIGUES, R.. **Análise do desempenho hidroenergético de sistemas de abastecimento de água do município de Marabá/PA**. 2012. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de tecnologia, Programa de Pós-graduação em Eng° Civil - Belém.

SAAE Cambuí - Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Cambuí - MG. Relatório anual da Qualidade da Água referente ao ano de 2015. Disponível em: <<http://www.saaecambui.com.br/wp-content/uploads/2016/04/Rel2015.pdf>>. Acesso em abr./2016.

SARZEDAS, G. L. **Planejamento para a substituição de tubulações em sistemas de abastecimento de água. Aplicação na rede de distribuição de água da Região Metropolitana de São Paulo**. 2009. 113p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2009.

SILVA, G. S.; TAMAKI, H. O.; LOUREIRO, R. S.; GONÇALVES, O. M.. Eliminação de vazamentos em redes externas no contexto de programas de uso racional da água - Estudo de caso: Universidade de São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, RS, v. 8, n. 2, p. 41-52, abr/jun. 2008.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2011**. Brasília, jun. 2013. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=105>>. Acesso em: maio/2014.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2013**. Brasília, dez. 2014. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2013>>. Acesso em: jan./2016.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2014**. Brasília, fev. 2016. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2014>>. Acesso em: jun./2016.

SOARES, D.. **Discussão de uma metodologia para o diagnóstico e ações para redução de perdas de água: aplicação no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo**. 2010. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.

THORNTON, J.; STURM, R; KUNKEL, G.. **Water Loss Control**. The McGraw-Hill Companies. Second Edition. United States of America, 2008.

TOMAZ, P.. **Curso de Hidráulica e Saneamento**. Capítulo 4 - Perdas de água. 12 março de 2009.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. 185 p.

VICENTINI, L. P.. **Componentes do balanço hídrico para avaliação de perdas em sistemas de abastecimento de água**. 2012. 196p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP.

VIEGAS, J. V.; GASTALDINI, M. C. C.; BARROSO, L. B.. Estudo de metodologia para determinação das perdas físicas em redes de distribuição de água. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.1, p. 37-47, jan/mar. 2005.

VILANOVA, M. R. N.; BALESTIERI, J. A. P.. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 701-714. 2014.

VILANOVA, M. R. N.; VIANA, A. N. C.; SALVADOR, E.; SANTOS, G. C.; PASCOA, J. C.. Redução do consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento através da redução das perdas de água: estudo de caso no município de Lavras-MG. *IN*: GOMES, H. P. (org). **Sistemas de Saneamento Eficiência Energética**. 1ª Edição: 2010. Editora da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. cap. 28, p. 360-367.

VIVAS, E.; LEITE, P.; VALENTE, L.; TENTÚGAL-VALENTE, J.; FIGUEIREDO, M. P.; AGUILAR, N.; FERREIRA, R.. **Estudos de otimização energética em estações elevatórias. Uma metodologia para sua seleção**. *IN*: 12.º Congresso da Água / 16.º ENASB / XVI SILUBESA, 2014, Portugal, Lisboa. Planejamento de Recursos Hídricos.

ANEXO A - Informações complementares sobre os mananciais de abastecimento
(Fonte: SAAE, 2015)

- a) Ribeirão das Antas: nasce no bairro Braço das Antas. Mecanismo de proteção existente: cercamento das nascentes e reflorestamento. Qualidade do Manancial: é classificado segundo a Resolução CONAMA nº20 como Água Doce, Classe II. Fontes de Contaminação: ocupação urbana;
- b) Rio do Peixe: nasce em Senador Amaral. Mecanismo de proteção existente: cercamento das nascentes e reflorestamento. Qualidade do Manancial: é classificado segundo a Resolução CONAMA nº20 como Água Doce, Classe II. Fontes de Contaminação: ocupação urbana e rural.

ANEXO B - Rugosidades, vazões e perdas de carga simuladas por Goulart (2015)
utilizadas para estimativa da perda de energia por atrito.

Trecho	Rugosidade [mm]	Vazão [m3/s]	Perda de carga [m/m]	Trecho	Rugosidade [mm]	Vazão [m3/s]	Perda de carga [m/m]
Tubulação 23	0,39	0,00001	0,00002	Tubulação 96	0,48	0	0
Tubulação 24	0,42	0	0,00001	Tubulação 97	0,19	0	0
Tubulação 28	0,08	0	0	Tubulação 98	0,45	0,00001	0,00001
Tubulação 27	0,32	0	0	Tubulação 99	0,08	0,00001	0
Tubulação 1	0,12	0,00049	0,00016	Tubulação 100	0,49	-0,00001	0
Tubulação 4	0,38	0,00046	0,00016	Tubulação 101	0,16	0,00013	0,00006
Tubulação 2	0,47	0,00048	0,00017	Tubulação 102	3,24	0,00012	0,00005
Tubulação 3	0,14	0,00047	0,00015	Tubulação 103	0,35	0,00012	0,00005
Tubulação 5	0,47	0,00004	0,00001	Tubulação 104	0,36	0,00005	0,00002
Tubulação 6	0,05	0,00003	0,00001	Tubulação 105	0,26	0,00005	0,00001
Tubulação 7	0,16	0	0	Tubulação 106	0,08	0,00005	0,00002
Tubulação 8	0,16	0,00002	0,00001	Tubulação 107	0,27	0,00004	0,00001
Tubulação 9	0,43	0,00001	0	Tubulação 108	8,96	0,00004	0,00001
Tubulação 10	7,91	0,00042	0,00226	Tubulação 109	0,11	0,00007	0,00002
Tubulação 11	0,34	0,00041	0,00073	Tubulação 110	0,17	0,00006	0,00002
Tubulação 12	0,39	0,00041	0,00073	Tubulação 111	0,08	0,00004	0,00002
Tubulação 13	0,32	0,0004	0,00069	Tubulação 112	0,06	0,00003	0,00001
Tubulação 14	7,43	0,0004	0,00201	Tubulação 113	0,28	0	0
Tubulação 15	9,82	0,0004	0,00233	Tubulação 114	4,09	0	0
Tubulação 16	0,38	0,00033	0,00049	Tubulação 115	0,36	0	0
Tubulação 17	3,18	0,00003	0,00001	Tubulação 116	0,18	0	0
Tubulação 18	0,43	0,00002	0,00001	Tubulação 117	0,08	0	0
Tubulação 19	0,13	0,00002	0,00001	Tubulação 118	0,13	0,00001	0,00001
Tubulação 20	0,07	0	0	Tubulação 119	1,52	0	0
Tubulação 21	0,24	0,00001	0	Tubulação 120	0,24	0,00001	0
Tubulação 22	0,46	0,00001	0	Tubulação 121	0,22	0,00001	0
Tubulação 26	5,71	0	0	Tubulação 122	0,38	0,00001	0
Tubulação 30	2,94	0,00006	0,00002	Tubulação 123	0,04	0,00001	0
Tubulação 31	0,13	0,00004	0,00001	Tubulação 124	0,43	0,00003	0,00001
Tubulação 32	0,23	0,00002	0,00001	Tubulação 125	8,73	0,00002	0,00002

Continuação ANEXO B

Trecho	Rugosidade [mm]	Vazão [m3/s]	Perda de carga [m/m]	Trecho	Rugosidade [mm]	Vazão [m3/s]	Perda de carga [m/m]
Tubulação 33	1,4	0	0	Tubulação 126	0,46	0,00002	0,00002
Tubulação 34	0,18	0,00002	0,00001	Tubulação 127	0,45	0,00002	0,00009
Tubulação 35	0,45	0,00002	0,00001	Tubulação 128	0,24	0,00002	0,00009
Tubulação 36	0,37	0,00002	0,00001	Tubulação 129	0,49	0,00002	0,00008
Tubulação 37	0,04	0	0	Tubulação 130	2,73	0,00002	0,00008
Tubulação 38	3,17	0,00001	0,00001	Tubulação 131	0,04	0,00002	0,00008
Tubulação 39	2,78	0,00001	0	Tubulação 132	0,09	0,00002	0,00008
Tubulação 40	3,83	0,00001	0,00001	Tubulação 133	0,46	0,00002	0,00008
Tubulação 41	0,32	0,00001	0,00001	Tubulação 134	0,12	0,00002	0,00007
Tubulação 42	0,08	0	0	Tubulação 135	4,43	0,00002	0,00007
Tubulação 43	0,31	0	0	Tubulação 136	0,38	0,00002	0,00007
Tubulação 44	0,08	0	0	Tubulação 137	0,22	0,00002	0,00007
Tubulação 45	0,49	0,00001	0	Tubulação 138	0,07	0,00002	0,00006
Tubulação 46	0,26	0	0	Tubulação 139	0,19	0,00002	0,00006
Tubulação 47	0,19	0	0	Tubulação 140	0,77	0,00001	0,00006
Tubulação 48	7,65	0	0	Tubulação 141	0,36	0,00001	0,00005
Tubulação 49	0,36	0	0	Tubulação 142	0,07	0,00001	0,00003
Tubulação 50	1,99	0	0	Tubulação 143	0,31	0,00001	0,00002
Tubulação 52	0,41	0,00001	0,00001	Tubulação 144	0,21	0,00001	0,00002
Tubulação 53	0,18	0,00001	0,00001	Tubulação 145	0,29	0,00001	0,00002
Tubulação 54	0,35	0	0	Tubulação 146	0,12	0	0,00001
Tubulação 55	0,39	0	0	Tubulação 147	8,67	0	0,00001
Tubulação 56	0,43	0,00001	0	Tubulação 148	0,04	0	0,00001
Tubulação 57	0,38	0	0	Tubulação 149	0,45	0	0
Tubulação 58	0,04	0	0	Tubulação 150	0,1	0	0
Tubulação 59	0,41	0,0003	0,00042	Tubulação 151	0,04	0	0
Tubulação 60	0,37	0,00029	0,00039	Tubulação 152	4,34	0	0
Tubulação 61	0,12	0,00029	0,00034	Tubulação 25	0,35	0	0
Tubulação 62	0,07	0,00029	0,00033	Tubulação 29	0,03	0,00004	0
Tubulação 63	5,12	0,00028	0,00084	Tubulação 51	0,13	0	0
Tubulação 64	2,09	0,00028	0,00056	Tubulação 75	0,1	0,00041	0,00062
Tubulação 65	0,13	0,00028	0,00032	Tubulação 77	0,2	0,00004	0,00001
Tubulação 66	0,34	0,00015	0,00008	Tubulação 78	0,28	0	0
Tubulação 67	0,5	0,00013	0,00005	Tubulação 80	0,44	0	0,00001
Tubulação 68	0,27	0,00011	0,00004	Tubulação 153	6,28	0,0003	0,00102
Tubulação 69	0,25	0,00009	0,00003	Tubulação 154	0,41	0	0
Tubulação 70	0,29	0,00005	0,00002	Tubulação 155	0,34	0	0
Tubulação 71	4,41	0,00001	0	Tubulação 156	0,3	0	0,00001
Tubulação 72	0,44	0	0	Tubulação 158	0,48	0	0
Tubulação 73	0,03	0	0	Tubulação 159	0,27	0	0
Tubulação 74	0,43	0	0	Tubulação 160	0,08	0	0
Tubulação 76	0,42	0	0	Tubulação 161	6,07	0,00003	0,00001
Tubulação 82	0,11	0,00001	0	Tubulação 162	0,33	0	0
Tubulação 83	0,06	0	0	Tubulação 81	0,3	0,00001	0
Tubulação 84	0,4	0,00001	0	Tubulação 163	0,06	0	0
Tubulação 85	0,13	0	0	Tubulação 164	0,03	0,00001	0
Tubulação 87	0,28	0	0	Tubulação 165	0,34	0	0
Tubulação 89	0,18	0,00001	0,00001	Tubulação 166	0,11	0,00001	0

Continuação ANEXO B

Trecho	Rugosidade [mm]	Vazão [m ³ /s]	Perda de carga [m/m]	Trecho	Rugosidade [mm]	Vazão [m ³ /s]	Perda de carga [m/m]
Tubulação 90	0,03	0,00001	0	Tubulação 167	1,92	0	0
Tubulação 91	0,19	0,00001	0,00001	Tubulação 168	0,04	0,00003	0,00001
Tubulação 92	0,1	0,00001	0,00001	Tubulação 169	0,23	0,00002	0,00001
Tubulação 93	100	0	0	Tubulação 170	0,28	0,00013	0,00005
Tubulação 94	0,07	0	0	Tubulação 171	0,12	0,00012	0,00005
Tubulação 95	0,13	0	0				