

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

Matheus Gonçalves Silqueira

Estudo de correlação de parâmetros hidráulicos e elétricos aplicado ao setor de rede de água
no sul de Minas Gerais

ITAJUBÁ, 2019

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

MATHEUS GONÇALVES SILQUEIRA

ESTUDO DE CORRELAÇÃO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS E ELÉTRICOS
APLICADO AO SETOR DE REDE DE ÁGUA NO SUL DE MINAS GERAIS

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

Março de 2019
Itajubá – MG

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado aos meus pais, meus irmãos, minha companheira, meus avós, a Deus e a todas as pessoas que buscam soluções para melhorar o mundo em que vivemos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente 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 disponibilidade, confiança e pelo empenho em atender e buscar soluções para os novos desafios.

Agradeço ao Projeto REDECOPE FINEP – MCT (Ref. 0983/10)-Ministério da Ciência e Tecnologia intitulado “Desenvolvimento de tecnologias eficientes para a gestão hidroenergética em sistemas de abastecimento de água” e Programa Pesquisador Mineiro da FAPEMIG pelo PPM - 00755-16 .

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Sul de Minas Gerais, pela disponibilidade para se estudar o setor.

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 Núcleo de Modelagem e Simulação em Meio Ambiente e Recursos e Sistemas Hídricos (NUMMARH), como também os técnicos dos laboratórios.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro através da bolsa de estudo N° 11824.

Aos meus pais Jesus Luciano e Sônia, que me deram suporte e estrutura para finalizar este trabalho. Aos meus irmãos, Tatiana e Lucas, pela ajuda psicológica nos estudos, pelo apoio nas dificuldades e pelas alegrias ao longo de nossas vidas. A minha avó Zilé pelas palavras de carinho. A minha tia e professora Elizete pela ajuda na revisão de texto e a minha namorada Anissa pela parceria e incentivo.

À [Aisha Mamade da Universidade de Lisboa](#) pela disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos e em ajudar a alcançar os objetivos deste estudo.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso racional de energia vem sendo cada vez mais incentivado. Em alguns países já existem até subsídios para que indústrias adotem medidas de eficiência energética. Um dos setores com grandes oportunidades de efficientização é o de saneamento, no qual uma parte considerável do consumo de energia refere-se às estações elevatórias. De acordo com a Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE), entre 2% e 3% do total de energia elétrica consumida no mundo é utilizado para o bombeamento de água em sistemas de abastecimento. Estima-se, em 25% o potencial de redução de consumo de energia elétrica por meio de medidas de eficiência energética e conservação de energia. O setor de abastecimento de água corresponde a 2,6% do total de energia consumida no Brasil, sendo os sistemas de bombeamento responsáveis por mais de 90% do consumo total de energia no país. É extremamente comum encontrar instalações superdimensionadas, com conjuntos motor-bombas operando fora de seu ponto ideal, sendo frequente a prática de realizar o controle de vazão e pressão por meio de instalação de válvulas. A utilização de válvulas redutoras insere perdas de carga desnecessárias ao sistema hidráulico, aumentando o consumo de energia. O objetivo deste trabalho é correlacionar os parâmetros hidráulicos com os elétricos de um setor de estudo do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de um município no Sul de Minas Gerais, por meio da apresentação do balanço energético do sistema, elucidação do consumo de energia elétrica e possíveis redução do consumo de energia elétrica. Para isto foram mensurados dados como o rendimento dos conjuntos motor-bombas, cálculos de indicadores de desempenho, índice de perdas de água e aplicação do balanço energético adaptado. O setor de estudo apresentou um gasto médio de R\$ 42.097,44/ano em virtude das perdas de água no sistema. Ao considerar apenas os gastos com a energia elétrica, observa-se que estes representam 34,20% dos custos em relação às perdas de água (R\$ 14.395,90/ano). O sistema apresentou 27,73% de perdas totais de água, baixa eficiência energética (11%) e um consumo de energia de 0,6627 kWh/m³ apenas para estação elevatória de R3. Ao se considerar também a Captação e Estação de Tratamento de Água (ETA) esse consumo foi de 1,302 kWh/m³.

Palavras-chave: *Sistemas de abastecimento de água, perdas de água, eficiência energética, balanço energético, energia.*

ABSTRACT

The rational use of energy is being increasingly encouraged. In some countries exist subsidies for industries to adopt energy efficiency measures. One of the sectors with great opportunities of efficiency is the one of sanitation, a considerable part of the consumption of energy refers to the pumping stations. According to the Alliance for Energy Conservation (ALLIANCE), between 2% and 3% of the total electric energy consumed in the world is used for pumping water in supply systems. It is estimated that the potential of reducing energy consumption by means of energy efficiency and energy conservation measures is 25%. The water supply sector accounts for 2.6% of the total energy consumed in Brazil, with pumping systems accounting for more than 90% of the total energy consumption in the country. It is extremely common to find oversized installations, with motor-pump operating out of their ideal point, with frequent practice of controlling the flow and pressure by means of valve installation. The use of reducing valves introduces unnecessary load losses to the hydraulic system, increasing the energy consumption. The aim of this study is to correlate the hydraulic parameters with the electrical ones of a sector of study of the Autonomous Service of Water and Sewage (SAAE) of the municipality in the South of Minas Gerais, through the presentation of the energy balance of the system, elucidation of energy consumption and possible reduction of electricity consumption. For this purpose, data such as the efficiency of the motor-pump, calculations of performance indicators, water loss index and energy balance application adapted from the methodology. The study sector had an average expenditure of R\$ 42,097.44 / year due to water losses in the system. When considering only the expenditures for electricity, it is observed that these represent 34.20% of the costs in relation to water losses (R\$ 14,395.90 / year). The system presented 27.73% of total water losses, low energy efficiency (11%) and an energy consumption of 0.6627 kWh / m³ only for R3 lift station. When considering also the Captation and Water Treatment Station (ETA), this consumption was 1,302 kWh / m³.

Keywords: *Water supply systems, water losses, energy efficiency, energy balance, energy.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de abastecimento de água.	18
Figura 2. Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema.	25
Figura 3. Atividades Desenvolvidas ao longo do Trabalho.	58
Figura 4. Características SAAE.	60
Figura 5. Características do SAAE.	61
Figura 6. Desenho do esquema do setor de estudo.	62
Figura 7. Diagrama do setor de estudo.	63
Figura 8. Mapa de localização dos nós e da vazão de saída do reservatório R4 com monitoramento de pressão, gerado pelo EPANET.	64
Figura 9. Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão através das dimensões de cotas, gerado pelo EPANET.	65
Figura 10. Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão, gerado pelo EPANET.	66
Figura 11. Representação esquemática dos diferentes conceitos necessários para calcular os componentes do balanço de energia para os sistemas de elevação e distribuição.	73
Figura 12. Curva de consumo.	88
Figura 13. Vazão média bombeada.	91
Figura 14. Vazão dos conjuntos B1 (150mm) e B2 (100mm).	91
Figura 15. Pressão x vazão.	92
Figura 16. Pressão x vazão.	93
Figura 17. Pressão x vazão x velocidade.	94
Figura 18. Curva de operação B1.	95
Figura 19. Curva de operação B2.	95
Figura 20. Vazão média B1.	97
Figura 21. Vazão média B2.	97
Figura 22. Nível do reservatório retangular R4 nos dias de medições.	99
Figura 23. Nível do reservatório cilíndrico R4 nos dias de medições.	100
Figura 24. Pressão no nó 96 versus volume dos reservatórios R4 no dia 08/10/14.	101
Figura 25. Pressão no nó 146 versus volume dos reservatórios R4 no dia 10/10/14.	102
Figura 26. Pressão no nó 150 versus volume dos reservatórios R4 no dia 12/10/14.	103
Figura 27. Pressão no nó 154 versus volume dos reservatórios R4 no dia 09/10/14.	104

Figura 28. Pressão no nó 154 versus volume dos reservatórios R4 no dia 09/10/14.....	105
Figura 29. Pressão na saída de R4 versus volume dos reservatórios R4 versus a vazão na tubulação de saída de R4 (entrada do setor) no dia 13/10/14.	106
Figura 30. Pressão na saída de R4 versus a vazão na tubulação de saída de R4 (entrada do setor) no dia 13/10/14.	106
Figura 31. Variação da pressão da tubulação de saída do conjunto motor-bomba B1 em relação a vazão bombeada pelo mesmo conjunto ao longo do dia 14/10/2014.....	107
Figura 32. Variação da pressão da tubulação de saída do conjunto motor-bomba B2 em relação a vazão bombeada pelo mesmo conjunto ao longo do dia 11/10/2014.....	108
Figura 33. Tensão média.....	109
Figura 34. Variação da corrente média dos sistemas.....	109
Figura 35. Desequilíbrio de tensão.....	110
Figura 36. Potência ativa.....	111
Figura 37. Potência reativa.....	112
Figura 38. Potência aparente.....	113
Figura 39. Relação do comportamento da potência ativa trifásica e potência reativa dos sistemas estudados.....	114
Figura 40. Frequência.....	114
Figura 41. Fator de potência.....	115
Figura 42. Tensão média.....	116
Figura 43. Distorção harmônica.....	117
Figura 44. Comparação dos parâmetros hidráulicos e elétricos.....	118
Figura 45. Vazão total bombeada pelos conjuntos B1 e B2 versus potência consumida.....	123
Figura 46. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 08/10/14.....	124
Figura 47. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 09/10/14.....	125
Figura 48. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 10/10/14.....	126
Figura 49. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 11/10/14.....	127
Figura 50. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 12/10/14.....	128
Figura 51. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 13/10/14.....	129
Figura 52. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 14/10/14.....	130
Figura 53. Consumo diário de energia e volume médio elevado pelos conjuntos B1 e B2...	131
Figura 54. Consumo de energia elétrica dos conjuntos B1 e B2 em R3 entre os anos de 2013 a 2014.....	132

Figura 55. Valor monetário referente ao consumo de energia elétrica dos conjuntos B1 e B2 em R3 entre os anos de 2013 a 2014.....	132
Figura 56. Energia total em R3.	137
Figura 57. Indicador aplicado em R3.....	138
Figura 58. Modelo hidráulico para avaliação completa.....	140
Figura 59. Vazão bombeada pelo conjunto B1 em relação a potência consumida pelo Setor de estudo.	144
Figura 60. Custo de energia elétrica versus taxa de perda de água do sistema.....	147
Figura 61. Custo monetário de energia proporcional ao setor de estudo.....	148
Figura 62. Estimativa de crescimento populacional do setor de estudo.	149
Figura 63. Estimativa do crescimento de consumo de água pelo crescimento populacional do setor de estudo.....	150
Figura 64. Relação do volume de água perdida no setor de estudo anualmente com o valor monetário gasto com essas perdas.	151
Figura 65. Curvas.....	171
Figura 66. Curvas – 50-20 – 3500 RPM.....	174
Figura 67. Simulação da rede pelo EPANET para simulação da avaliação simplificada.....	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Oportunidades para melhorar a eficiência no uso final.....	22
Tabela 2. Oportunidades de melhoria da eficiência na distribuição.	23
Tabela 3. Oportunidades de melhoria da eficiência no bombeamento.	23
Tabela 4. Oportunidades de melhoria da eficiência no sistema em geral.	24
Tabela 5. Oportunidades de economia em sistema de bombeamento.	25
Tabela 6. Variação do coeficiente N em relação ao tipo de tubulação.	41
Tabela 7. Dados do consumo de energia elétrica no sistema de água para todos os artigos estudados. Planta de produção de água potável (PAP), rede de distribuição de água potável (RDA), rede de coleta de águas residuais (RCA) e planta de tratamento de águas residuais (PTA).	43
Tabela 8. Classificação fator de carga.	50
Tabela 9. Características SAAE.....	60
Tabela 10. Dados nominais das bombas 1 e 2.	68
Tabela 11. Dados nominais dos motores.	69
Tabela 12. Balanço energético baseado na metodologia de Mamade et al. (2017).	72
Tabela 13. Consumo do setor.....	88
Tabela 14. Vazão.	89
Tabela 15. Vazão bombeada B2.	90
Tabela 16. Vazão consumida.	90
Tabela 17. Dados fornecidos pelo fabricante.....	96
Tabela 18. Consumo de energia dos dois conjuntos B1 e B2.....	118
Tabela 19. Consumo de energia elétrica – outubro de 2014.....	120
Tabela 20. Valores calculados.	122
Tabela 21. Consumo de energia diário e volume elevado.	123
Tabela 22. Dados de consumo de energia elétrica.	133
Tabela 23. Valores de referência atribuídos para a eficiência energética das estações elevatórias. Fonte: IWA, (2000).....	134
Tabela 24. Consumo de energia padronizado da IWA.	135
Tabela 25. Resultados para os Indicadores IWA.	136
Tabela 26. Balanço energético baseado na metodologia de Mamade (2017) – avaliação simplificada.....	139

Tabela 27. Balanço energético baseado na metodologia de Mamade et al. (2017) – avaliação completa.....	141
Tabela 28. Tabela de eficiência energética do setor.	145
Tabela 29. Consumo relativo de energia elétrica - ano de 2014 - índice de perdas = 27,73%.	145
Tabela 30. Consumo relativo as perdas de energia elétrica - ano de 2014	146
Tabela 31. Dados tarifários empresa elétrica Bragantina S/A.	146
Tabela 32. Estimativa de crescimento populacional do setor de estudo.....	148
Tabela 33. Estimativa de crescimento populacional versus aumento do consumo de água do setor de estudo.....	150
Tabela 34. Relação da quantidade de energia perdida pelos vazamentos do setor de estudo versus estimativa de crescimento de consumo pelo crescimento populacional.....	151
Tabela 35. Relação do valor monetário perdida pelos vazamentos do setor de estudo versus estimativa de crescimento de consumo pelo crescimento populacional.....	152
Tabela 36. Dados ensaios individuais.....	172
Tabela 37. Dados calculados.....	172
Tabela 38. Dados ensaios em paralelo.....	173
Tabela 39. Dados calculados.....	173
Tabela 40. Comprimento da tubulação do setor de estudo.	175
Tabela 41. Altura manométrica dos nós do setor de estudo e energia excedente no sistema.	179
Tabela 42. Cálculos do balanço energético através da metodologia de Mamade et al. (2017).	183
Tabela 43. Resultados da simulação de rede pelo iPerdas.....	186
Tabela 44. Parâmetros da rede.	187
Tabela 45. Indicadores.	187

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo geral.....	17
2.2. Objetivos específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Fundamentos de um sistema de abastecimento de água	18
3.2. Fundamentos do processo operacional de um sistema de abastecimento de água	19
3.3. Eficiência hidráulica e energética	20
3.4. Modelagem hidráulica de redes de distribuição de água	27
3.5. Software de modelagem (EPANET).....	28
3.6. Descrição das perdas de água (físicas e não físicas).....	29
3.7. Análise de alguns indicadores de desempenho hídrico e energético	34
3.8. Controle de pressão em sistemas de distribuição de água	38
3.9. Método dos mínimos noturnos.....	40
3.10. Consumo de energia elétrica de um sistema de abastecimento de água.....	41
3.11. Tarifas de energia elétrica (sistema tarifário)	44
3.12. Análise do ciclo de vida do sistema de tratamento e distribuição de água.....	47
3.13. Parâmetros hidráulicos e elétricos	48
3.14. Aplicação às instalações do sistema de abastecimento de água	56
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	58
4.1. Descrição geral.....	58
4.2. Descrição do sistema.....	58
4.3. Município no sul de Minas	59
4.4. Abastecimento de água no município	59

4.5. Setor de estudo e interesse	62
4.6. Gestão das atividades	66
4.7. Sistema do setor de estudo	68
4.8. Adequação dos pontos de medição	69
4.9. Ensaio de rendimento dos conjuntos.....	70
4.10. Medições de pressão nas bombas	70
4.11. Balanço energético	70
4.12. Correlação dos parâmetros hidráulicos com os elétricos.....	79
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	88
5.1. Parâmetros hidráulicos	88
5.2. Parâmetros elétricos.....	108
5.3. Correlação dos parâmetros hidráulicos com os elétricos.....	117
5.4. Análise do balanço energético.....	133
5.5. Eficiência energética.....	143
5.6. Impactos ambientais da produção de água	152
6. CONCLUSÕES	154
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
7. ANEXOS	171
7.1. Anexo I – Curvas das bombas	171
7.2. Anexo II – Resultados dos rendimentos das bombas	172
7.3. Anexo III – Curva características das bombas	174
7.4. Anexo IV – Dimensão da Tubulação	175
7.5. Anexo V – Energia excedente no sistema	179
7.6. Anexo VI – Cálculo do balanço energético.....	183
7.7. Anexo VII – Resultados da simulação	186
7.8. Anexo VIII – Simulação da rede no EPANET.....	188

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial e de extremo valor e importância na vida dos seres vivos. Com o crescimento da população mundial e devido à escassez desse recurso natural, torna-se necessário direcionar ações preventivas que possam otimizar sua utilização, alcançando assim, a sustentabilidade. Atualmente, existem muitos estudos relacionados à geração de energia hidráulica, entretanto, são poucos os que analisam e destacam os impactos ambientais causados pelo uso da água.

O abastecimento de água é o elemento primário de um sistema urbano. As etapas do processo do sistema de tratamento e distribuição envolvem os setores de captação, tratamento e adução da água. Cada sistema de tratamento e distribuição de água pode ser considerado único e complexo, devido a características próprias das instalações que podem influenciar em seu funcionamento: qualidade da água, tecnologia e materiais utilizados na construção da rede, operação da pressão, ciclo do sistema, relevo, localização, clima, período de chuvas, dentre outras. Manter um abastecimento de água estável e com qualidade tornou-se um desafio para muitas cidades, visto que se trata de um recurso escasso, cujo consumo tem aumentado em consequência do crescimento populacional. Além disso, uma grande quantidade de água é perdida a partir dos tubos de sistemas de distribuição. O vazamento desse líquido não é apenas um desperdício de recurso hídrico, mas também de grandes custos socioeconômicos.

No saneamento básico, particularmente no setor de sistemas de distribuição de água potável, ocorrem perdas significativas de água tratada. O consumo de energia nesses setores são altos, podendo comprometer o financeiro de um SAAE. É importante salientar que as perdas de água nos sistemas de distribuição implicam nas perdas de energia utilizada nos processos. Diversas razões podem influenciar nessas perdas, como as estações de bombeamento ineficientes, manutenções inadequadas, erros de projetos, tubulações e conexões antigas, pressões nos nós elevadas, dentre outros.

Geralmente, as perdas de água são provenientes do sistema de distribuição, onde a água é transportada por tubulações, impulsionada pela energia fornecida pelas bombas. O ganho constante de energia cinética e potencial pode elevar a pressão dentro do sistema de distribuição. Quando ocorre na tubulação um excesso de pressão que ultrapassa os limites da capacidade do material que transporta água, ela acaba sofrendo danos em sua estrutura e, conseqüentemente, surgem os vazamentos. As manutenções dessas estruturas são complexas

devido ao custo e à operação do sistema, podendo ocasionar bloqueios em ruas, necessitando alterações do trânsito e outros problemas.

A operação do sistema de abastecimento de água consiste no estabelecimento de regras operacionais com uma sequência de manobras efetuadas nos conjuntos motor-bomba e válvulas, que, geralmente, são feitas por tentativa e erro. Buscando a redução dos custos tarifários, as empresas de saneamento realizam esforços na automação do funcionamento das bombas e válvulas, principalmente em relação ao nível dos reservatórios e pressão na rede. Entretanto, apesar dos altos investimentos, a automação por si só não garante a redução no consumo de energia nem nos gastos financeiro.

Visando a redução do custo de energia elétrica de um sistema de abastecimento de água, existem diversas alternativas que podem ser aplicadas, tais como: o conhecimento do sistema tarifário vigente, a redução da potência do equipamento, a alteração do sistema operacional, a automação do sistema de abastecimento de água e a geração de energia via fontes alternativas de energia elétrica. A prática de redução de consumo de energia nos sistemas de bombeamento de água via implantação de modelos matemáticos exigem três medidas indispensáveis, sendo que a primeira é a instalação de macro e/ou micro medidores de vazão na entrada e saída dos reservatórios, permitindo assim a determinação da real demanda do sistema. A segunda etapa é a medição isolada de todos os conjuntos motor-bombas, viabilizando a determinação de rendimento real de cada um. A terceira é a análise do resultado da tomada de cada decisão.

Informalmente, a palavra correlação pode ser sinônimo da palavra dependência. Em termos técnicos, correlação pode referir-se a qualquer um dos vários tipos específicos de associação entre os valores médios, ou seja, associação dentro de uma ampla classe de relações estatísticas que envolva dependência entre duas variáveis. Dentro de um sistema de tratamento e distribuição de água, os parâmetros mais importantes são o hidráulico, o mecânico e o elétrico. Levando em consideração as medições de vazão, velocidade, pressão, nível, cotas altimétricas, consumo de água e energia elétrica consumida, pode-se modelar e compreender melhor a rede de distribuição. Como é difícil contabilizar as perdas de energia elétrica que estão envolvidas no funcionamento desses sistemas, um estudo é necessário, visto que ele é capaz de demonstrar que essas perdas podem estar relacionadas, principalmente, às perdas de água, à falta de monitoramento dos parâmetros que regulam o sistema, à idade dos equipamentos, às técnicas precárias de operação, à manutenção ineficiente e à má gestão.

Este estudo está vinculado à Agência Brasileira de Inovação, Fundo de Financiamento de Estudos de Projetos e Programas – FINEP. Na coleta dos dados de energia foi feita uma parceria com a equipe de pesquisa envolvida nos estudos multidisciplinar da REDECOPE – “Desenvolvimento de tecnologias e procedimentos eficientes para a gestão hidroelétrica em sistemas de abastecimento de água”, financiada pelo convênio REDECOPE / FINEP 983-10. Trabalhos desenvolvidos no mesmo setor de interesse por Andrade (2016) e Goulart (2015), foram utilizados como base para inclusão de mais dados pertinentes ao presente estudo.

O trabalho tem como objetivo fazer um estudo e analisar a correlação de parâmetros hidráulico, mecânico e elétrico de um setor de rede de distribuição de água no município no Sul de Minas Gerais, sob o enfoque da qualidade da energia elétrica, perdas de água e da eficiência energética. O estudo baseia-se na avaliação do cenário do setor de interesse relativos à vazão e pressão do setor de estudo e à utilização da metodologia para medir os índices e os indicadores em sistema de bombeamento de água reais como forma de estudo de caso e validação da correlação de parâmetros hidráulicos com elétricos. No final, será demonstrado um balanço energético, o consumo de água e energia baseados em dados reais, coletados em campanhas de campo e em registros feitos pela concessionária de água local (SAAE).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo de correlação de parâmetros hidráulicos com os elétricos aplicado ao setor de rede de água no sul de Minas Gerais, visando a eficiência energética.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o atual cenário do setor de interesse relativos à vazão, pressão e perdas de água do setor de estudo;
- Aplicar a metodologia, os índices e os indicadores em sistema de bombeamento de água reais como forma de estudo de caso e validação da correlação entre parâmetros hidráulicos e elétricos;
- Aplicar a Metodologia do balanço energético proposta por Mamade et al. (2017) com o objetivo de avaliar a eficiência energética do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fundamentos de um sistema de abastecimento de água

O sistema de distribuição de água possui diversas características e especificidades como o tamanho da cidade, topografia, investimentos, entre outros fatores. Segundo Tsutiya (2005), os sistemas de distribuição de água são compostos pelas estruturas necessárias para levar a água do local da captação até os locais de consumo final. Basicamente, as estruturas podem ser representadas pelo manancial de captação, estação de tratamento de água, rede adutora, reservatórios, rede de distribuição (tubulações), bomba e ramal domiciliar, conforme ilustrado na Figura 1.

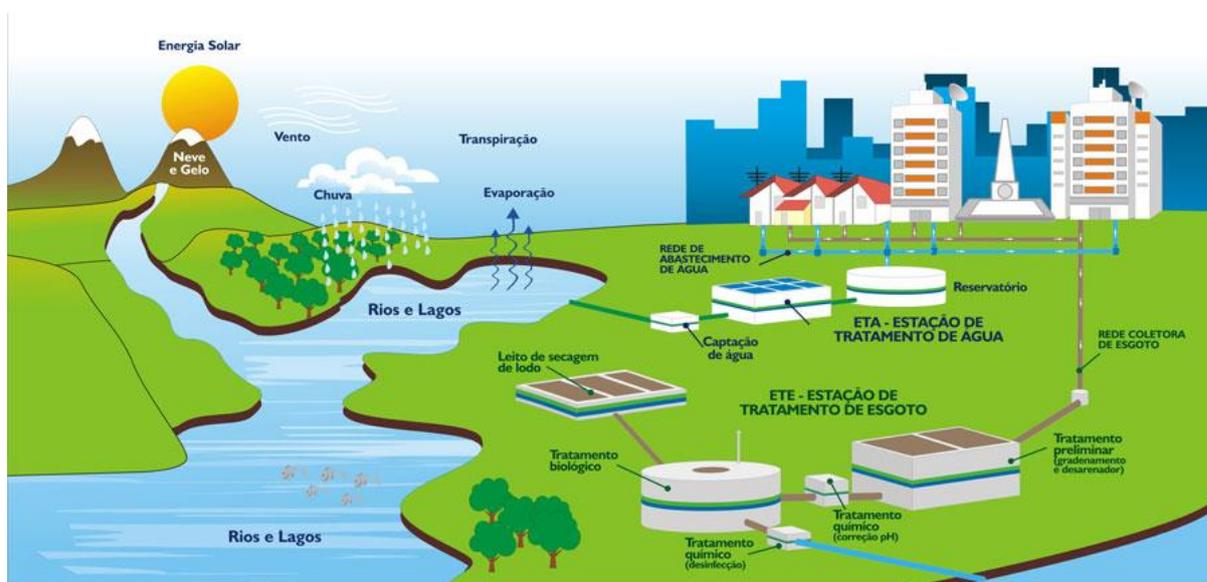


Figura 1. Sistema de abastecimento de água.

Fonte: <http://201.41.82.130/agua/ciclo>.

De acordo com Porto (2006), o objetivo de um sistema de distribuição de água é atender a população em qualidade e quantidade de água suficiente, cumprindo as condições convenientes aos diversos pontos de consumo final do sistema. Segundo Pereira (2012), o sistema de abastecimento de água pode ser exemplificado como sendo o conjunto de infraestruturas e etapas destinadas ao abastecimento de água potável às populações.

Gomes et al. (2015), demonstra que um sistema de abastecimento de água possui variações em sua configuração devido à topografia do local, gerando diferentes condições de funcionamento na rede.

O tratamento de água e sua distribuição tem como principal objetivo ofertar água potável de qualidade aos consumidores de uma determinada região. No tratamento existem vários processos para atingir objetivo de qualidade da água, como a remoção de matéria orgânica natural, remoção de substâncias tóxicas, qualidade estética e proteção da rede de distribuição para evitar que ocorra uma corrosão e uma nova contaminação (BALESTIERI e VILANOVA, 2014).

De acordo com Barbeau et al. (2011), a determinação de um correto sistema de tratamento de água baseia-se nas primícias econômicas e aspectos técnicos de projeto. Os autores mencionam que a indústria de distribuição e tratamento de água podem contribuir significativamente para o aumento global dos impactos mundiais devido ao grande consumo de energia e liberação indireta por meio de produtos químicos de poluentes na água, terra e ar através dos produtos químicos.

3.2. Fundamentos do processo operacional de um sistema de abastecimento de água

Gomes (2004) destaca que a operação do sistema de abastecimento de água necessita de uma logística específica, compreendendo um conjunto complexo de ações para garantir a distribuição da água de qualidade a todos os pontos de demanda na quantidade requerida. A otimização do processo operacional de um sistema de abastecimento de água é de extrema importância para a gestão das empresas de saneamento, visando a qualidade da água, a confiabilidade do sistema e a redução dos custos operacionais.

Os problemas relacionados à gestão na operação de um sistema de abastecimento podem comprometer a eficiência do sistema. De acordo com Tucci (2008), o rápido aumento da urbanização nas últimas décadas, associado à uma expansão não planejada dos sistemas de abastecimento de água têm provocado uma alta demanda de água, que não estava prevista nos projetos originais, ocasionando ao nível máximo a saturação dos sistemas e por fim, comprometendo a qualidade do serviço de abastecimento de água à população. Essa necessidade de expansão sucessiva, devido ao rápido crescimento das zonas urbanas, ao desgaste do sistema e à falta de manutenção adequada, tem transformado os sistemas de abastecimento de água, tornando-os cada vez mais extensos, complexos e cheios de incertezas das mais variadas naturezas.

A procura pela otimização dos sistemas de bombeamento é uma das principais ações operacionais que busca a redução das perdas hidráulicas e energéticas. Existem uma grande quantidade de variáveis envolvidas neste processo como a vazão, pressão, potência, entre outras. Estas podem ser modificadas a cada instante, tornando mais complexa a atividade de operar esses sistemas.

3.3. Eficiência hidráulica e energética

A melhoria da eficiência de um sistema de distribuição de água é na maioria das vezes uma opção de custo menor do que a construção ou reforma de uma infraestrutura de abastecimento de água (BRITTON, STEWART e O'HALLORAN, 2013). O consumo de energia proveniente das etapas de captação, tratamento e adução da água implica em uma elevada quantidade de custos. São diversos fatores que contribuem para as perdas de energia no setor de abastecimento de água, tais como: as estações de bombeamento e operações ineficientes, projetos, instalações e manutenções inadequadas, tubulações antigas, gargalos nas redes, pressões excessivas, dentre outros fatores (COELHO e CAMPOS, 2014).

De acordo com Rodrigues (2012), as atividades implementadas para economizar energia e água podem ter maior impacto se forem planejadas de forma conjunta, buscando a integração da gestão de recursos hídricos e energéticos com objetivos de diminuir os impactos ambientais, reduzir os custos operacionais e incentivar o uso eficiente de recursos. O relatório da ABES (2013) demonstra a sinergia nas ações de redução de perdas de água e eficiência energética. Quando ocorre a redução das perdas de água, por consequência existe também a diminuição da necessidade de produção de água, economizando no consumo de energia e reduzindo os custos finais.

De acordo com ABES (2013), a cada R\$ 1,00 gasto em conservação de energia, evita-se R\$ 8,00 em investimentos na geração da mesma. Segundo Mutikanga et al. (2009), apenas os equipamentos sofisticados de detecção de vazamentos não são suficientes para diminuir as perdas de água nos países em desenvolvimento. É necessária também uma abordagem holística do problema.

Segundo Feldman (2009), as principais etapas para implementar a eficiência energética nos sistemas de abastecimento de água podem ser estabelecidas por meio de:

- Melhorias nos projetos do sistema e das estações de bombeamento;

- Instalação de unidades de velocidade variável (bomba);
- Operações eficientes de bombas;
- Redução de vazamentos por meio da modulação de pressão.

Coelho e Campos (2014), listaram algumas medidas que melhoram a eficiência dos sistemas de distribuição de água, como a:

- 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 todos esses itens listados, a substituição de um equipamento ineficiente por um conjunto motor-bomba de alta eficiência pode gerar uma economia de 10 a 30% da energia consumida (GELLINGS, 2009 apud COELHO e CAMPOS, 2014).

As perdas de carga também interferem na eficiência de um sistema de abastecimento de água e podem ser reduzidas através da:

- 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).

De acordo com a United Nations Industrial Development Organization (2009), para a implantação de um Sistema de Gestão Energética (SGE), devem considerar algumas importantes medidas, como:

- Um plano estratégico, que requer mensuração, gestão e documentação para a melhoria contínua da eficiência energética;
- Uma equipe de gestores de vários departamentos internos da organização liderados por um coordenador de energia, que responde diretamente para a administração central e é responsável por acompanhar a implementação do plano estratégico;
- Políticas e procedimentos para assegurar todos os aspectos da compra de energia, uso e disposição;
- Projetos para demonstrar uma melhoria contínua na eficiência energética.

Segundo Vivas et al. (2014), a determinação da eficiência energética dos sistemas elevatórios deve passar por uma avaliação de dados reais de desempenho do sistema, baseando-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.

Segundo Monteiro et al. (2005), pode se obter um valor de eficiência energética do sistema ao relacionar a somatória das energias necessárias para abastecer cada consumidor de um sistema com a energia efetivamente gasta, como visto na Equação abaixo. Entretanto, este é um valor de difícil obtenção, devido à quantidade de consumidores e à necessidade de cadastrar a elevação de cada um deles. A Equação 1 representa a forma de se obter a eficiência energética do sistema.

$$\text{Eficiência do sistema} = \frac{\gamma \times \sum (V_i \times H_i)}{E_T} \quad (1)$$

Onde,

- γ é o peso específico da água transportada;
- V_i é o volume de água abastecido ao consumidor i ;
- H_i é a elevação ou altura onde é entregue a água do consumidor i ;
- E_T é a energia total consumida pelo sistema de abastecimento para atender o conjunto de consumidores.

A Tabela 1 apresenta as oportunidades de melhoria da eficiência no uso final.

Tabela 1. Oportunidades para melhorar a eficiência no uso final.

Oportunidade	Descrição
Reduzir as perdas por vazamento	Uso de válvulas redutos de pressão. Setorização da rede de distribuição. Detecção mais rápida das perdas, mediante a automação e o controle da rede e a atuação para sua correção. Pesquisa de vazamentos planejada e frequente.
Reduzir o desperdício de água	Uso de equipamentos de baixo consumo de água. Campanhas educativas. Cadastro, capacitação e certificação de profissionais. Incentivo à reciclagem ou reaproveitamento. Campanhas de caça aos vazamentos.

Fonte: Monteiro et al. (2005).

A Tabela 2 demonstra as oportunidades de melhoria da eficiência na distribuição.

Tabela 2. Oportunidades de melhoria da eficiência na distribuição.

Oportunidade	Descrição
Reduzir a altura manométrica	Reposicionamento ou divisão de reservatórios para atender por zona de pressão. Uso de mais de um reservatório.
Reduzir a perda de carga pelo aumento do diâmetro da tubulação	Seleção econômica do diâmetro baseado no custo total (investimento inicial + custo operacional).
Melhorar a rugosidade e reduzir a perda de carga	Uso de materiais adequados. Limpeza do interior dos tubos com “pig”.
Deslocar o consumo de energia do horário de ponta	Aumento da capacidade dos reservatórios.
Usar reservatórios de jusante e abastecimento em marcha	Uso de variadores de velocidade nos motores das bombas. Adequação do fornecimento com o uso do reservatório, evitando o uso no horário de ponta.
Reduzir vazamentos	Uso de válvulas e controladores de nível. Programas de inspeção, operação e manutenção.

Fonte: Monteiro et al. (2005).

A Tabela 3 apresenta as oportunidades de melhoria da eficiência no bombeamento.

Tabela 3. Oportunidades de melhoria da eficiência no bombeamento.

Oportunidade	Descrição
Melhorar o rendimento da bomba	Seleção adequada da bomba. Verificação do ponto de funcionamento e ajuste para a faixa de maior rendimento.
Melhorar o rendimento do motor	Adequação do motor à carga da bomba. Uso de motores de alto rendimento.

Reduzir a vazão recalçada	Construção de reservatórios por zona de pressão.
Reduzir pela variação da velocidade	Uso de variadores de velocidade para acionamento de bombas que trabalham com variação de carga ao longo do dia.
Fazer a associação adequada de bombas	Associação em série, paralela ou individual, procurando otimizar o ponto de funcionamento do sistema.
Eliminar os problemas de cavitação	O NPSH disponível calculado deve ser superior em 20% e no mínimo em 0,50m ao NPSH requerido pela bomba em todos os pontos de operação.
Evitar a recirculação	Uso de anéis de desgaste ou outros dispositivos de vedação com as folgas corretas.

Fonte: Monteiro et al. (2005).

A Tabela 4 exemplifica as oportunidades de melhoria da eficiência no sistema em geral.

Tabela 4. Oportunidades de melhoria da eficiência no sistema em geral.

Oportunidade	Descrição
Promover a automação	Uso de controladores programáveis, pressostatos, timers, chave-boia, programas de gerenciamento da rede.
Fazer a adequação do contrato de energia	Contratação de energia com base no sistema tarifário mais adequado ao regime de funcionamento e porte da empresa.
Reduzir o consumo próprio de água	Eficiência do sistema de iluminação, climatização, equipamentos de tratamento e limpeza.

Fonte: Monteiro et al. (2005).

A Tabela 5 apresenta as oportunidades de economia nos sistemas de bombeamento.

Tabela 5. Oportunidades de economia em sistema de bombeamento.

Áreas para melhoria	Energia economizada
Uso final da água	Até 70%
Redução de vazamentos	15%
Melhoria da rugosidade	15%
Melhoria do rendimento do motor	5%
Melhoria do rendimento da bomba	5%
Variadores de velocidade	27%

Fonte: Monteiro et al. (2005).

De acordo com Monteiro et al. (2005), o conhecimento do balanço energético característico do sistema ajuda na identificação das perdas que reduzem a eficiência do sistema, fornecendo um ponto de partida para conhecer as oportunidades, selecionar e implementar ações de melhorias da eficiência. A Figura 2 mostra um balanço de energia característico, com as perdas de um sistema de bombeamento e distribuição de água. Neste esquema é apresentado um balanço simplificado, considerando apenas uma bomba no sistema. As eficiências das bombas são multiplicadas quando colocadas em série no sistema. Não foram consideradas as perdas comerciais provenientes de erros de medição, fraudes, dentre outras.



Figura 2. Diagrama de balanço de energia com as perdas do sistema.

Fonte: Monteiro et al. (2005).

Segundo Monteiro et al. (2005), para caracterizar um sistema de bombeamento específico, sugerem-se as seguintes etapas:

- Elaborar um diagrama de blocos das instalações da planta ou dos processos industriais, indicando o fluxo da água. Baseado no layout do sistema, indicar a localização de seus componentes e as condições operacionais nominais ou de projeto (elevações/alturas, pressões, vazões);
- Criar um perfil dos “parâmetros operacionais” (demanda de água, consumo de energia elétrica, vazões na captação/bombeamento e distribuição) do sistema ao longo do dia, semana, mês e ano, o que for necessário para entender o funcionamento do sistema e verificar sazonalidades ou não;
- Levantar os dados reais (medições). A partir da instrumentação existente ou de medições instantâneas, verificar os valores reais dos parâmetros operacionais. Levantar o regime de funcionamento, os picos de carga, o consumo e as capacidades totais e por período. Simultaneamente, deve-se contabilizar a população ou as unidades atendidas no período de medição. Documentar, por meio de impressos e fotos, a situação do momento;
- Analisar os dados e estabelecer os valores de referência. Com as informações obtidas, estabelecer a linha de base ou condição de referência da situação presente da instalação;
- Criar índices relativos à produção ou consumo (por exemplo, m^3/kW por 100 m de elevação ou kWh/m^3), índices monetários (valor da produção / kWh, faturamento / kWh).

Atualmente os estudos voltados para a redução do consumo de energia e das perdas de águas nos sistemas de abastecimento de água vêm aumentando devido ao crescente preço da energia elétrica. De acordo com Tsutiya (2006), é possível reduzir as despesas com energia elétrica em uma empresa de abastecimento de água por meio da redução do custo sem diminuição do consumo de energia elétrica ou pela redução do custo com diminuição do consumo de energia elétrica.

A redução do custo sem diminuição do consumo de energia elétrica deve-se à complexa estrutura tarifária de energia elétrica praticada no Brasil, levando em consideração a classificação da unidade consumidora como empresa de saneamento para usufruir do desconto

de 15% na tarifa de energia elétrica. Pode-se fazer um possível ajuste na demanda contratada de acordo com os equipamentos em operação, alteração da estrutura tarifária de acordo com o perfil de consumo, desativação de unidades consumidoras inoperantes, verificação de eventuais erros de leitura, correção do Fator de Potência das instalações caso seja inferior a 0,92, dimensionamento correto de motores para os conjuntos, dimensionamento adequado de transformadores para a demanda, nível de tensão acima da nominal, alteração da tensão de alimentação de baixa para alta tensão e melhoria do fator de carga através da seleção de motores de menor potência que conseguem realizar o trabalho ao longo do dia.

3.4. Modelagem hidráulica de redes de distribuição de água

Segundo Formiga e Chaudhry (2008), o modelo hidráulico quando calibrado, prediz o comportamento da rede dentro de uma faixa aceitável de incertezas, inerente ao conhecimento técnico, sendo este a base para a aplicação do modelo de qualidade. A modelagem hidráulica necessita do conhecimento dos componentes físicos e não físicos do sistema de abastecimento de água.

De acordo com Silva (2002), os dados de entrada para o modelo hidráulico são os seguintes:

- Trechos e nós da rede: todas as informações numéricas como diâmetro, comprimento, rugosidade, material de cada tubo e as coordenadas dos pontos de conexão entre os tubos. As informações podem ser obtidas em mapas e projetos executivos ou em intervenções de sondagens quando houver dúvida no cadastro das redes existentes;
- Elementos da rede: válvulas de controle, válvulas redutoras de pressão e elevatórias de recalque, instalados na rede de distribuição, devem ser identificadas e incluídas no arquivo base;
- Dados das bombas: são necessários os dados das características operacionais, além das coordenadas das mesmas. Essas bombas devem ser modeladas, pois suprem a pressão necessária para distribuição da água ao sistema;
- Dados sobre o reservatório: os reservatórios elevados, os apoiados ou enterrados, são elementos para armazenamento e distribuem água por gravidade ou servem de tanque de sucção

para estações de bombeamento ou recalque. Os elementos importantes a serem definidos para a entrada no modelo hidráulico são os volumes de armazenamento, dimensões, faixas de operação, válvulas de controle, nível de automatização e as áreas a serem abastecidas;

- Dados de campo: as medições de campo também fazem parte da coleta de dados, que inclui os valores de pressão nos nós, a montante e jusante das válvulas redutoras de pressão, vazão, demanda de água nos setores de medição e coeficientes de rugosidade;

- Condições de demanda: os dados referentes ao uso da água devem ser coletados e estar no modelo base. As demandas de água devem ser alocadas geograficamente, seguindo suas variações diurnas e noturnas. A alocação geográfica representa as porcentagens da demanda média total que serão atribuídas a cada nó. As variações do uso da água que ocorrem durante um dia também estão relacionadas aos usos e costumes de cada região.

3.5. Software de modelagem (EPANET)

De acordo com Rossman (2008), o Epanet é um software de modelagem hidráulica e qualidade da água, desenvolvido pela Environmental Protection Agency (EPA), que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade em redes pressurizadas de distribuição de água, com uma excelente capacidade de modelagem. A simulação hidráulica do Epanet determina a vazão nos trechos e a carga hidráulica nos nós, com os níveis de reservatórios, em função da variação do consumo ao longo do tempo caracterizada mediante uma curva de demanda. Em cada intervalo de tempo os valores das variáveis são atualizados em função da variação temporal da demanda de água na rede. A solução para o valor da carga hidráulica e para a vazão em um ponto particular da rede, para um determinado instante, é encontrada na solução da equação da continuidade, para cada nó. E na solução da equação da conservação da energia, para cada trecho dos anéis da rede. Esse balanço hidráulico da rede necessita da utilização de técnicas iterativas para resolver as equações não lineares envolvidas.

O Epanet aplica o “Método do Gradiente”, também conhecido por Método Híbrido Nó-Malha (TODINI e PILATI, 1988), para atingir esse objetivo. Segundo Silva et al. (2002), pode-se dizer que os procedimentos de calibração de redes de distribuição de água podem ser

divididos basicamente em três categorias: iterativos, explícitos ou diretos e implícitos ou inversos.

O Epanet também é descrito como um programa de computador (software modelo no processo de simulação hidráulica) que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada. Segundo Júnior (2012), esse software possibilita obter os valores de vazão, pressão, altura de água em cada reservatório de nível variável e de concentração de espécies químicas na rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos intervalos de cálculo. Além de espécies químicas, o modelo pode simular a idade da água e o rastreio de sua origem em qualquer ponto da rede. Desta forma, ajuda a compreender melhor os movimentos e transformações que a água destinada ao consumo humano está sujeita através dos sistemas de distribuição, permitindo simular o comportamento hidráulico e a qualidade da água de um sistema de distribuição sujeito a diversas condições operacionais, durante um determinado período de funcionamento.

O Epanet pode ser utilizado para ajudar a analisar estratégias e alternativas de gestão, visando a melhoria da qualidade da água do sistema, através das alterações na utilização de origens da água num sistema com múltiplas origens, da utilização de tratamento adicional, tal como a recloração, da seleção de tubulações para limpeza e substituição (reabilitação) (JÚNIOR, 2012).

De acordo com Barroso (2009), o Epanet é o programa de modelagem hidráulica e de qualidade de água mais utilizado no mundo. É um software modelo no processo de simulação hidráulica e, tem sido uma ferramenta essencial para pesquisas em sistemas de abastecimento de água.

3.6. Descrição das perdas de água (físicas e não físicas)

De acordo com Araujo et al. (2006) e Fontana et al. (2012), as taxas de perda de água em sistemas de abastecimento de água variam entre 30% a 40%, enquanto Colombo e Karney (2009), citando outros autores, quantificam entre 9% e 30% de volume de água não contabilizado na Europa. Além disso, os vazamentos em redes de distribuição de água podem comprometer a qualidade final da água, através da inserção de micro-organismos patogênicos, sobretudo mediante a ocorrência de transitórios hidráulicos, durante os quais as pressões se

tornam baixas e até mesmo negativas (COLOMBO e KARNEY, 2009). Esses vazamentos aumentam os custos operacionais referentes à perda de água e ao consumo extra de energia, resultando, também, em perdas econômicas (COLOMBO e KARNEY, 2009).

Geralmente a contabilização das perdas de água nos sistemas de abastecimento de água ocorre por meio de balanços hídricos, em que são definidos os volumes de entrada e saída em diversos níveis do sistema. Um método clássico de balanço hídrico, que tem como base indicadores, amplamente aceito e empregado no Brasil, é o da International Water Association (IWA), baseado no documento “The Blue Pages” (LAMBERT e HIRNER, 2000) e descrito em detalhes por Alegre et al. (2004).

As perdas de água reais e aparentes são realidades nos sistemas de abastecimento atuais. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2009), no Brasil aproximadamente 46,87% da água tratada é perdida.

Segundo Gomes (2015), as soluções presentes nas literaturas referentes às perdas reais provocadas principalmente por vazamentos são: substituir as tubulações antigas, válvulas, registros e outros equipamentos que fazem parte do sistema, e também a melhoria dos seus sistemas de bombeamento para proporcionar a pressão necessária, reduzindo pressões elevadas na rede e, ainda, sistemas de medição e monitoramento para quantificar e acompanhar a produção de água em pontos específicos da rede. Estas perdas podem ser classificadas como físicas ou não físicas.

De acordo com Monteiro et al. (2005), os sistemas de abastecimento de água bombeados que tiverem redução da perda de água também terão uma redução do consumo de energia elétrica. O cruzamento das informações do volume disponibilizado para a rede de distribuição com a somatória dos volumes apurados nos medidores dos clientes permite, de forma sistemática, conhecer o valor dessa perda. No entanto, deve ser observado o seguinte ponto: nem toda perda é física, isto é, pode ser traduzida como vazamento ou consumo próprio. Uma parte importante deve-se à imprecisão dos próprios medidores taqueométricos; outra deve-se aos consumidores clandestinos e a há ainda outra parte que se deve àqueles que “violam” o medidor, de várias formas. Assim, parte da perda, se corrigida ou minimizada, não representará redução de consumo de energia elétrica e sim, redução ou aumento de faturamento do serviço de água considerado.

Para a reduzir as perdas físicas, sugerem-se as seguintes medidas:

- Reduzir a pressão da rede pelo uso de válvulas redutoras de pressão;
- Promover a setorização da rede de distribuição conforme faixa da altura manométrica total;
- Fazer a automação e o controle da rede, visando detectar mais rapidamente as perdas e providenciar sua correção;
- Realizar pesquisas de vazamentos de forma planejada e frequente.

Para a reduzir as perdas não físicas, sugerem-se as seguintes medidas:

- Promover campanha de aferição de medidores;
- Realizar instalação de macromedicação para setorizar as perdas e identificar áreas críticas;
- Fazer o monitoramento e cadastramento de consumidores em regiões de maiores perdas e de consumidores desativados;

De acordo com Souza (2016), as perdas não físicas estão relacionadas com o processo de comercialização da água consumida pela população, sendo por meio de erros na medição, usuários não cadastrados, ligações clandestinas e um volume efetivamente consumido e não faturado. As perdas físicas representam o volume de água que é realmente perdido através de vazamentos ao longo do sistema de distribuição de água. Como os sistemas de abastecimentos de água são bastante complexos, é necessário compreender os seus componentes estáticos e dinâmicos quando em funcionamento. A realização de manobras em alguns destes elementos ou até mesmo uma queda repentina de energia podem provocar o surgimento de ondas de pressão que se propagam por todo o sistema, podendo provocar o rompimento de tubulações.

De acordo com Colombo e Karney (2002), em muitos lugares o consumo energético resultante do bombeamento de água tem a maior parte dos custos operacionais do abastecimento, e a energia desperdiçada para recompensar os vazamentos está associada a diversos impactos ambientais, como a emissão de gases estufa, chuva ácida e depleção de recursos.

De acordo com Ulanicki et al. (2000), o controle de pressão é uma medida economicamente eficiente para reduzir os vazamentos nos sistemas de distribuição de água, além de evitar o surgimento de novos vazamentos. O gerenciamento de pressão diminui a incidência de rupturas em tubulações, evitando os custos de reparo, assim como a interrupção do tráfego em vias públicas e no abastecimento dos clientes. Referindo-se à análise e

modelagem hidráulica de perdas de água, os vazamentos são considerados nós de demanda regida pela pressão (GIUSTOLISI et al., 2012; CABRERA et al., 2010).

Cabrera et al. (2010) propuseram um modelo em que os vazamentos são modelados como a energia saindo do volume de controle, análogos à energia hidráulica fornecida aos consumidores. O gerenciamento eficiente da pressão é quase sempre parte integrante da estratégia para gestão de perdas de água: ao mesmo tempo em que se pode diminuir a pressão na rede para reduzir-se os vazamentos, a estratégia para seu controle deve considerar a manutenção de pressões suficientes nos nós, uma carga hidráulica ótima, de forma a atender, também, as suas demandas reais (FONTANA et al., 2012).

Araujo et al. (2006) e Nicolini et al. (2011) sugerem o uso de dispositivos de perdas de carga na rede, como as válvulas redutoras de pressão (VRPs). Essa é a opção tecnológica mais utilizada para o gerenciamento de pressão e redução de vazamentos. Em um primeiro momento, esses métodos podem parecer contraditórios em relação à eficiência energética do sistema, uma vez que devem-se buscar menores perdas de carga durante o projeto de redes e adutoras. Para que esses dispositivos atuem de forma efetiva são necessários estudos quanto à sua localização, quantidade e operação, geralmente desenvolvidos através de modelagem hidráulica em associação com técnicas de programação matemática, tais como algoritmos genéticos, objeto de diversos trabalhos científicos (NICOLINI et al., 2011).

De acordo com Filho (2006), os vazamentos podem ser classificados em visíveis e não visíveis. Os vazamentos visíveis são facilmente identificados pelo ser humano, que irá notificar à companhia de saneamento. Ou seja, o reparo é geralmente executado em um curto espaço de tempo. Os vazamentos não visíveis não são aparentes na superfície, infiltram-se na terra, formando fluxos internos no solo. Ou seja, exigem um tempo maior para localizá-los e repará-los, pois; são necessárias inspeções especiais por meio de equipamentos de pesquisa acústica para sua detecção. Entretanto, alguns vazamentos não podem ser detectados pela tecnologia atual, como os vazamentos com vazões muito baixas, que podem ocorrer nas juntas e nos estágios iniciais dos processos de corrosão.

A tecnologia para detectar vazamentos está em constante crescimento, entretanto equipamentos e métodos já utilizados há muitos anos continuam importantes para os sistemas atuais. A eficiência de um método de detecção de vazamento pode ser obtida por meio do tempo de resposta e pelo tamanho do menor vazamento detectável. Alguns métodos podem localizar os vazamentos a partir de uma inspeção visual, enquanto outros métodos utilizam as técnicas

acústicas. Há também métodos não-acústicos que podem ser adaptados e aplicados ao sistema de distribuição de água.

Zaniboni (2009) demonstra os principais equipamentos utilizados na detecção acústica de vazamentos não visíveis, exemplificando as vantagens e desvantagens de cada equipamento, ajudando assim os gestores a buscarem soluções para seu problema. Os procedimentos da ABENDE (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos) para a detecção dos vazamentos não visíveis permitem observar que a produtividade e a eficiência sofreram uma melhoria em índice de acertos. Com a detecção da causa do vazamento, pode-se fazer um melhor planejamento do sistema, aumentando a qualidade e diminuindo o custo. O sucesso de localização dos vazamentos é melhor quando se utiliza a metodologia adequada. Os equipamentos devem ser criteriosamente avaliados para o objetivo final.

De acordo com Zaniboni (2009), as tecnologias não acústicas devem ser utilizadas com bastante critério, pois são de alto custo e difícil aplicação. Quanto mais os responsáveis pela aplicação do método conhecerem sobre os equipamentos e as metodologias existentes, melhor será o resultado da operação.

Sempewo et al. (2008) tinham como objetivo reduzir o tempo de detecção, caracterização e distribuição espacial das perdas de água. Foi proposta uma nova abordagem para setorizar sistemas de distribuição de água, baseada na teoria dos grafos e no princípio da computação distribuída usada na programação paralela, em que diferentes processadores representam diferentes setores da rede. A dimensão de cada sector baseia-se no comprimento, consumo ou pressão dentro de cada setor da rede. Este método é sensível ao número de setores criados, à topologia e complexidade da rede e ao algoritmo usado para repartição do esforço computacional.

De acordo com Gamboa-Medina e Reis (2011), muitos estudos em relação à análise de vazamentos em sistemas hidráulicos estão sendo desenvolvidos para encontrar novas formas de detecção e localização de vazamentos com o suporte da modelagem hidráulica associada à coleta de informações que podem ser medidas na rede automaticamente, em particular de vazões e pressões. Essa metodologia possui várias linhas de pesquisa com resultados parciais positivos e promissores, entretanto sua implantação efetiva apresenta dificuldades em virtude das limitações que a envolvem.

De acordo com Farley (2001), o grande desafio em uma unidade gestora de redes de distribuição de água é desenvolver e manter um eficiente sistema de gestão estratégica de perdas

e operações, buscando a redução de custos e o aumento as receitas. Para isso, é necessária a utilização de ferramentas de gestão por meio de auditorias para saber o quanto é perdido, estudos pilotos para saber onde isto ocorre, investigação para descobrir porque ocorrem as perdas de água, plano de ação e estratégias para conseguir atingir melhorias, treinamentos e conscientização para manter a estratégia e assim manter os ganhos.

Segundo Lambert e Hirner (2002), o controle das perdas físicas deve ser realizado por meio de quatro atividades complementares: gerenciamento de pressão, controle ativo de vazamentos, velocidade e qualidade dos reparos e gerenciamento da infraestrutura.

As ações de combate às perdas de água devem ser consideradas como parte da gestão do sistema de abastecimento de água, considerando que esse modo varia de acordo com as características da população, como a cultura e a, necessidade, entre outros aspectos. De acordo com Souza (2011), uma dessas ações pode ser estabelecida por meio da utilização racional e eficiente dos recursos, aproveitando melhor as instalações já existentes no sistema. Para executar um programa de controle de perdas, Souza (2011), adotou cinco etapas dentro da estratégia de combate a perdas, sendo elas: a preparação, a definição de metas, a implantação de ações, o gerenciamento e monitoramento. Essas etapas podem ser exemplificadas como:

- Preparação: elaboração de um plano contendo o detalhamento de causas e efeitos;
- Definição: definição de metas de curto e em longo prazo para a redução das perdas;
- Implantação: implantação de ações e execução das intervenções;
- Monitoramento: avaliações de perdas com frequência;
- Gerenciamento: análise dos resultados por meio do acompanhamento e avaliação das ações.

3.7. Análise de alguns indicadores de desempenho hídrico e energético

Os indicadores de eficiência energética usuais nos serviços de abastecimento público são os de custo unitário da energia adquirida da concessionária (custo específico - R\$/MWh) e os que relacionam a energia consumida com o volume de água bombeado (consumo específico - kWh/m³). O primeiro tem como objetivo medir com que eficiência a companhia está adquirindo energia, levando em conta que para elevatórias a partir de um certo porte (potência instalada), as concessionárias de energia elétrica oferecem vantagens no preço para

compromissos de desligamento ou redução de consumo em determinadas horas do dia e/ou do ano. O segundo indicador afere o desempenho dos equipamentos de bombeamento do sistema em termos de rendimento, além da concepção do próprio sistema. Quando os valores deste indicador são elevados pode significar perdas de carga excessivas nas linhas de recalque ou má concepção de zonas de pressão (excesso de bombeamentos), dentre outras possibilidades. Os valores dos índices serão utilizados no futuro para comprovar, ou não, o acerto nas medidas de eficiências implantadas (MONTEIRO et al., 2005).

De acordo com Monteiro et al. (2005), estes indicadores são úteis no acompanhamento em séries temporais de uma determinada elevatória ou de um determinado sistema, entretanto, a comparação entre sistemas de características físicas diferentes não é tão confiável. Outros indicadores importantes são o custo da energia / m³ vendido e R\$ faturados / m³ bombeado. Quanto maior o valor melhor o desempenho global. Índices de referência (benchmarks) em sistemas de bombeamento devem ser cuidadosamente analisados, pois a localização, o porte da instalação, o sistema tarifário de energia e a densidade do consumo os influenciam.

O índice de perdas (Equação 2) é muito importante, pois demonstra o desempenho da rede. A Equação abaixo apresenta como esse resultado pode ser obtido:

$$I = \frac{V_D - V_U}{V_D} \quad (2)$$

Onde,

I: Índice de perdas (%);

V_D : Volume distribuído (m³) (valor medido em campo);

V_U : Volume utilizado (m³) (Valor disponibilizado pelo SAAE).

Alegre et al. (2000) propôs o indicador da IWA Ph4. Este indicador mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético. O indicador demonstra a utilização da capacidade de bombeamento (%). Sendo o somatório para todos os grupos eletrobomba instalados (número de horas de funcionamento no dia de maior consumo energético durante o período de referência x potência nominal) / (potência nominal utilizável dos sistemas de bombeamento x 24) x 100. A Equação 3 apresenta o indicador Ph4.

$$Ph4 = \frac{D2}{C7 \times 24} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

C7: é a capacidade máxima de bombeamento das estações elevatórias (kW);

D2: é o consumo máximo diário de energia para bombeamento (kWh);

O indicador da IWA Ph5 calcula o consumo de energia normalizado (kWh/m³ /100 m), sendo a energia total consumida nas estações elevatórias durante o período de referência pelo volume bombeado durante o período de referência x altura manométrica / 100. Este indicador corresponde ao inverso da eficiência média de bombeamento do grupo. O indicador origina-se do tradicional consumo energético específico (kWh/m³) e se configura como um dos indicadores mais expressivos em relação à medição de eficiência energética numa empresa de saneamento.

Esse indicador está totalmente relacionado ao conceito de intensidade energética, pois descreve o consumo de energia da produção no SAAE, sendo a energia gasta para realizar o recalque de 1 m³ de água ao local desejado. O consumo energético específico, apesar de ser um indicador de eficiência energética, é válido somente como medida de intensidade energética para avaliação interna de um SAAE. Esse indicador não permite comparações diretas entre os diferentes sistemas de bombeamento, devido às características próprias de cada sistema, como altura geométrica, vazão, bomba utilizada, entre outros que alteram os resultados do indicador de forma significativa e que podem resultar em uma conclusão equivocada em relação à eficiência energética.

Com isso, a IWA desenvolveu o indicador Ph5, relativo ao consumo energético normalizado. Dessa forma, é possível comparar diferentes sistemas de bombeamento de água. Utiliza-se o termo “normalizado” para referir-se ao cálculo do produto da altura total de elevação (manométrica) com o volume recalcado no período, dividido por 100 metros. A Equação 4 apresenta o indicador Ph5.

$$\text{Ph5} = \frac{D1}{D3} \quad (4)$$

Onde,

D1: é o consumo de energia para bombeamento (kWh);

D3: é o Fator de uniformização (m³ x 100m).

$$D3 = \frac{V \times H}{100} \quad (5)$$

Onde,

V: é o volume recalçado pela bomba i no período de referência (m³);

H: é a altura total de elevação (altura manométrica) da bomba (mca).

O indicador da IWA Ph6 mede o consumo de energia reativa (%). Sua função é relacionar o consumo de energia reativa no bombeamento durante o período de referência com a energia total consumida nas estações elevatórias durante o período de referência x 100. A energia reativa é habitualmente expressa em KVAR e o consumo de energia em kWh. Contudo, são equivalentes e a sua razão é adimensional. Este indicador cria uma relação entre a energia reativa medida com o total de energia consumida.

De acordo com a legislação vigente, quando o fator de potência for inferior a 92%, a concessionária de energia elétrica pode aplicar tarifas extras para a SAAE por gerar energia reativa acima do permitido. A Equação 6 apresenta o indicador Ph6.

$$Ph6 = \frac{D4}{D1} \times 100 \quad (6)$$

Onde,

D1: é o consumo de energia para bombeamento (kWh);

D4: é o consumo de energia reativa (kVar).

O indicador Op23 da IWA calcula as perdas de água por ramal (m³/ramal/ano) (Perdas de água durante o período de referência x 365 / duração do período de referência) / número de ramais. A Equação 7 apresenta o indicador Op23.

$$Op23 = \frac{A15 \times 365}{C24 \times H1} \quad (7)$$

Onde,

A15: é o volume de perda de água (m³);

C24: é o número de ramais;

H1: é a duração do período de referência (dia).

O indicador Op24 calcula as perdas de água por comprimento de tubulação (m³/km/dia), sendo apuradas as perdas de água durante o período de referência pela duração do período de referência) pelo comprimento das tubulações. A Equação 8 apresenta o indicador Op24.

$$\text{Op24} = \frac{\frac{A15}{H1}}{C8} \quad (8)$$

Onde,

C8: é o comprimento das tubulações (km).

3.8. Controle de pressão em sistemas de distribuição de água

Um dos fatores que ocasionam as perdas de água no sistema de abastecimento é a variação de pressão nas tubulações que levam água aos consumidores finais. De acordo com Lambert e Hirner (2002), o controle de pressão possibilita diminuir o volume perdido nos vazamentos, reduzir a frequência de rompimentos de tubulações, abaixar os consumos relacionados com às altas pressões da rede e garantir ao consumidor um serviço com pressões mais estabilizadas, diminuindo a ocorrência de danos às instalações internas dos usuários finais.

Segundo a Norma Técnica NBR nº 12.218/1994, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a pressão estática máxima nas tubulações distribuidoras deve ser de 500 kPa (50 mca), e a pressão dinâmica mínima, de 100 kPa (10 mca). Qualquer situação fora desse intervalo pode representar uma potencial zona de perdas. Com isso, a avaliação da alternativa desse critério deverá identificar a existência de trechos com pressão fora da normalidade (VIEGAS, GASTALDINI e BARROSO, 2005).

O controle da pressão em sistema de abastecimento de água é essencial para a redução de perdas reais de água (ISLAM *et al.*, 2005; ARAUJO *et al.*, 2006; PILCHER *et al.*, 2007). Uma redução de 10% na pressão nos grandes sistemas resulta em uma diminuição de aproximadamente 11,5% no volume perdido por vazamentos de água. O cálculo de estimativas de perdas de água, que foi amplamente utilizado nos últimos tempos, segue o princípio baseado

na raiz quadrada, onde a vazão perdida é proporcional à raiz quadrada da pressão na rede hidráulica. May (1994), demonstrou uma teoria chamada “*Fixed and variable area discharge paths*” (FAVAD), em português “Caminhos de descarga de área fixa e variável”. Essa teoria asseverou que os furos em tubulações flexíveis aumentam de diâmetro conforme a pressão aumenta, influenciando o valor do expoente N . Nesta teoria (FAVAD) a vazão perdida varia conforme a Equação 9.

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right) = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^N \quad (9)$$

Onde,

Q : é a vazão do vazamento;

P : é a pressão no sistema;

N : é o expoente que depende do tipo de material.

De acordo com Lambert (2001), os valores que o expoente N pode assumir são:

- 0,5 para tubos que não se deformam facilmente (materiais metálicos);
- 1,0 para casos de desconhecimento do sistema;
- 1,5 para orifícios com perdas de águas indetectáveis e que são sensíveis a variação de pressão (independem do material dos tubos);
- Entre 1,5 e 2,5 para orifícios com grandes perdas de água e em tubulações plásticas (PVC, PEAD, dentre outros).

Lambert (2001) ainda demonstrou resultado de estudos de diferentes sistemas no mundo, para apresentar o impacto da pressão excessiva sobre a frequência de rompimentos das tubulações, como por exemplo na Austrália, onde houve redução de 40% na pressão do setor de uma cidade que resultou na redução da frequência de rompimentos em 55%. Em São Paulo (Brasil), foi feita a aplicação de gestão da pressão em 8 setores, resultando em uma diminuição da frequência de rompimentos de 38,7%.

Segundo Bezerra (2009), as principais ações para o controle de pressão em sistemas de distribuição de água são por meio da setorização do sistema, da instalação de válvulas redutoras de pressão e da utilização de bombas com velocidade de rotação variável.

3.9. Método dos mínimos noturnos

Existem várias metodologias para determinar as perdas reais. Pode-se destacar a metodologia da vazão mínima noturna ou método dos mínimos noturnos, por ser muito utilizada no meio científico. Essa metodologia consiste em realizar medições durante a madrugada (período em que o consumo é nulo ou mínimo). São subtraídos do montante dos dados de consumos legítimos estimados, como por exemplo, pode ser feito em indústrias ou hospitais que funcionem durante a madrugada. Para conseguir obter um resultado mais preciso, é necessário aplicar um fator de correção nas vazões obtidas durante a madrugada, chamado Fator Noite-Dia (FND). Este fator é obtido por meio do cálculo com base na variação de pressão ao longo do dia.

Segundo Cheung et al. (2009), essas perdas reais (vazamentos) podem ser obtidas pela multiplicação da vazão mínima noturna pelo número de horas do dia (24h), levando em conta a correção através do FND. A Equação 10 demonstra como são determinadas e determinado as vazões de perdas.

$$Q_{perdas} = (Q_{mn} - Q_l) \times FND \quad (10)$$

Onde,

Q_{perdas} : é a Vazão de Perdas Reais (m^3/dia);

Q_{mn} : é a Vazão Mínima Noturna (m^3/h);

Q_l : é a Vazão Legítima de Consumo Noturno (m^3/h);

FND: é o Fator Noite-Dia (h/dia).

O FND (Equação 11) pode ser calculado por meio do somatório de pressão ao longo do dia, dividido pelas pressões durante o horário de consumo mínimo noturno, conforme Equação abaixo:

$$FND = \sum \left(\frac{P_{i24h}}{P_{mn}} \right)^N \quad (11)$$

Onde,

FND: é o Fator Noite-Dia (h/dia);

P_{i24h} : são as pressões horárias ao longo de 24 horas (mca);

P_{mn} : são as pressões no horário de mínimo noturno (mca);

N: é o fator adimensional, que correlaciona pressão e vazamento e varia de acordo com o tipo de material da tubulação.

Segundo Gonçalves e Lima (2007 apud ANDRADE, 2016), os valores de N podem variar de 0,5 a 1,5, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Variação do coeficiente N em relação ao tipo de tubulação.

N	Características
0,5	Seção do tubo não se altera com os vazamentos.
1,0	Avaliação simplificada.
1,15	Tubulação da rede de distribuição de água composta por diferentes materiais.
1,5	Seção do tubo irá alterar com os vazamentos.

Fonte: Baseado em Gonçalves & Lima, 2007 apud Andrade, 2016.

O ponto crítico é localizado na região mais desfavorável da rede hidráulica, onde a pressão é mínima, e o ponto mais alto e/ou mais distante do(s) ponto(s) de alimentação do sistema. No Brasil a norma técnica ABNT (1994), recomenda que a pressão não deve ser menor a 10 mca.

3.10. Consumo de energia elétrica de um sistema de abastecimento de água

A energia também desempenha um papel fundamental na produção e distribuição de água de qualidade. De acordo com a Aliança para Conservação de Energia (ALLIANCE, 2002), entre 2% e 3% do total da energia elétrica consumida no mundo é utilizada para o bombeamento de água em sistemas de abastecimento. Estima-se, em 25% o potencial de redução de consumo deste consumo por meio de medidas de eficiência energética e conservação de energia. Durante muitos anos os estudos sobre geração de energia por meio de hidrelétricas era a forma mais evidente de relação entre água e energia. Atualmente, o foco na água como agente consumidor

de energia tem atraído a atenção em várias áreas como na política, ambiente e no meio acadêmico (CABRERA et al., 2010).

Os programas de controle e diminuição das perdas de água nos sistemas de abastecimento de água têm um grande potencial para reduzir o consumo de eletricidade nesses sistemas. Com a utilização dos equipamentos que localizam os vazamentos na rede de distribuição, é possível realizar reparos de forma rápida, evitando grandes perdas de água, conseqüentemente, de energia.

De acordo com Tsutiya (2001),

a redução das perdas físicas permite diminuir os custos de produção, mediante redução do consumo de energia elétrica, de produtos químicos etc., e utilizar as instalações existentes para aumentar a oferta de água, sem expansão do sistema produtor. A redução das perdas não-físicas permite aumentar a receita tarifária, melhorando a eficiência dos serviços prestados e o desempenho financeiro do prestador de serviços.

É de extrema importância o desenvolvimento de programas que integrem o planejamento e gestão dos recursos hídricos e energéticos nos sistemas de abastecimento de água. Existem dois modos eficazes de obter a redução do consumo de eletricidade nos sistemas de abastecimento de água. Um deles consiste na economia de energia elétrica por meio da economia de água, já o e o outro, é a redução da demanda de energia elétrica dos sistemas de abastecimento de água.

O consumo de energia elétrica dos artigos estudados é apresentado na Tabela 7. Foram coletados os dados presentes nos artigos selecionados e o software Excel[®] foi utilizado para fazer a estimativa do consumo de energia elétrica para a produção de água potável.

Tabela 7. Dados do consumo de energia elétrica no sistema de água para todos os artigos estudados. Planta de produção de água potável (PAP), rede de distribuição de água potável (RDA), rede de coleta de águas residuais (RCA) e planta de tratamento de águas residuais (PTA).

kWh/m³ (Processos)									
Artigos	PAP	RDA	RCA	PTA	TOTAL (kWh/m³)	Nº DE HAB.	CONSUMO ANUAL (m³)	Consumo (m³/Ano. Consumidor)	Consumo de Energia (kWh/consumidor.ano)
Barjoveanu et al. (2014)	0,04	0,27	0,04	0,17	0,52	261.384	36.351.458	139,07	72,32
Lassaux et al. (2006)	0,21	0,18	0,00	0,31	0,70	3.500.000	208.000.000	59,43	41,60
Lemos et al. (2013)	0,64	0,15	0,21	0,87	1,87	78.450	4.350.000	55,45	103,69
Mahgoub et al. (2010)	-	-	-	0,01	0,01	3.700.000	304.775.000	82,37	0,90
Slagstad et al. (2014)	-	0,17	0,00	0,14	0,31	171.000	13.900.000	81,29	25,20
Média	0,30	0,19	0,06	0,30	0,69	1.542.167	113.475.291,60	83,52	48,74

Fonte: Barjoveanu et al. (2014), Lassaux et al. (2006), Lemos et al. (2013), Mahgoub et al. (2010) e Slagstad et al. (2014).

No sistema de tratamento de água ou produção de água potável, o maior consumo de eletricidade desse processo é das bombas, que coletam água de rios, lagos, etc. (LAUSSAX et al., 2006). Na distribuição de água, a eletricidade pode ser reduzida por meio dos sistemas de gravidade. Na coleta do esgoto para o tratamento, a utilização da gravidade também reduz a necessidade da energia elétrica para bombear os resíduos. O valor total de 0,01 kWh/m³ encontrado por Mahgoub et al. (2010) considera apenas o uso de energia no sistema de tratamento de esgoto. Nesses artigos pode-se analisar que o uso de eletricidade na produção de 1m³ de água variou de 0,04 kWh à 0,64 kWh.

Segundo Balestieri e Vilanova (2014), o consumo médio de energia elétrica da maior companhia de tratamento e abastecimento água no Brasil é de 0,69 kWh/m³, valor este um pouco acima das literaturas estudadas. Os autores também citam que em 2012 as estimativas de perdas de água resultaram em uma taxa de aproximadamente 40%.

Ainda de acordo com as literaturas estudadas, o resultado de consumo de água por consumidor em um ano foi entre 55,45m³ e 139,07m³. No Brasil, o consumo diário de água por

consumidor no ano de 2012, foi de 0,1663 m³, resultando em um consumo anual de 60,6993 m³, valor este dentro do encontrado nas literaturas estudadas (SABESP, 2012).

Segundo Monteiro et al. (2005), as equações de potência (12) e consumo de energia (13) podem ser definidas como:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times HMT}{\eta_b \times \eta_M} \quad (12)$$

$$C = P \times t \quad (13)$$

Onde:

- P é a potência absorvida da rede elétrica;
- γ é o peso específico da água transportada;
- Q é a vazão de água bombeada;
- HMT é altura manométrica total;
- η_b é o rendimento da bomba;
- η_M é o rendimento do motor elétrico;
- C é o consumo de energia;
- t é o tempo.

Analisando essas duas fórmulas, observa-se que são cinco elementos que interferem no cálculo da potência elétrica, sendo que dois (rendimento da bomba e o rendimento do motor), influem de forma inversamente proporcional e os outros três (peso específico, vazão bombeada e altura manométrica total) afetam diretamente no resultado da potência necessária para realizar tal trabalho. As ações implementadas devem focar na redução de P, γ , Q, HMT e t, e no aumento de η_b e η_M . Isso implicará, ao menos a redução do consumo de energia e, espera-se, dos custos, ou seja, as medidas a serem implementadas devem ou reduzir o numerador dessa relação (kWh) ou aumentar o denominador (m³ faturado) (MONTEIRO et al., 2005).

3.11. Tarifas de energia elétrica (sistema tarifário)

De acordo com Machado et al. (2005), devido às crises energéticas e a necessidade de controle das despesas de operação nas companhias, os estudos sobre soluções para a diminuição dos custos de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água, estão se tornando cada vez maiores nos últimos anos. Uma das soluções para reduzir os custos de energia elétrica está relacionado ao entendimento detalhado das características do sistema tarifário brasileiro, visando conhecer a forma de cobrança mais adequada para obter a redução dos custos. Segundo Tsutiya (2005) e Cunha (2009), os consumidores podem optar por três tipos de tarifas: a tarifa convencional, tarifa horo-sazonal azul e tarifa horo-sazonal verde.

A Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL) é uma autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia e foi criada para regular o setor elétrico brasileiro. A agência define os critérios de classificação dos consumidores, a forma de cobrança e as tarifas aplicadas. Existe uma diferenciação de preço em algumas tarifas considerando o consumo de energia no horário de ponta ou fora do horário de ponta. O horário de ponta é o período de três horas consecutivas exceto sábado, domingos e feriados nacionais definidos pela concessionária em função das características do sistema elétrico. Já o horário fora de ponta refere-se as demais 21 horas do dia (GUEDES, 2011). Ainda segundo Guedes (2011), outra diferenciação que há em determinadas tarifas é referente ao período seco e úmido. Sendo que o período seco está definido entre maio a novembro e o úmido de dezembro a abril. Os consumidores ainda são classificados de acordo com o nível de tensão em que são atendidos.

De acordo com a resolução Normativa 414/2010 da Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL), a tarifa em energia elétrica é exemplificada como sendo o valor monetário fixado em reais por unidade de energia elétrica ativa ou da demanda de potência ativa. O sistema tarifário brasileiro é dividido em dois grandes grupos, conforme demonstrado abaixo:

Grupo A: grupo composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômica e subdividido nos seguintes subgrupos:

- subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- subgrupo A3 a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV;

- subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

Grupo B: grupo composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia e subdividido nos subgrupos abaixo:

- subgrupo B1 – residencial;
- subgrupo B2 – rural;
- subgrupo B3 – demais classes;
- subgrupo B4 – Iluminação Pública.

Na tarifa convencional estão inclusos os consumidores de alta ou baixa tensão (residencial, rural, iluminação pública e subterrânea). Entretanto, nesta modalidade exige-se um contrato específico com a concessionária em que há apenas um valor da demanda. De acordo com Guedes (2011), os consumidores do grupo A (subgrupos A3a, A4 ou AS) somente podem ser enquadrados nesta modalidade caso a demanda contratada seja inferior a 300 kW. A conta de energia elétrica é composta pela soma das parcelas referentes ao consumo, demanda e ultrapassagem.

Na Tarifa horo-sazonal azul estão inclusos os consumidores de alta tensão (A1, A2 e A3). Nesta modalidade existe preços diferenciados de demanda e consumo, de acordo com as horas e o período do ano utilizado, sendo que existe também uma variação do preço da demanda em períodos de fora ou dentro do horário de ponta (GUEDES, 2011).

De acordo com Guedes (2011), exige-se um contrato mais específico em que há uma diferenciação do consumo, fora ou dentro de ponta, realizado em períodos secos ou úmidos. A conta de energia é calculada considerando as parcelas de consumo, demanda e ultrapassagem.

Na tarifa horo-sazonal verde estão inclusos os consumidores de alta tensão. Nesta modalidade existe um preço único de demanda, mas diferenciados de acordo com a hora e com os períodos do ano, seco ou úmido. Podem ser enquadrados os consumidores do grupo A (subgrupos A3a, A4 e AS) (GUEDES, 2011).

3.12. Análise do ciclo de vida do sistema de tratamento e distribuição de água

A análise do ciclo de vida (ACV) é considerada como um instrumento ou uma metodologia utilizada para avaliar os potenciais danos ambientais causados pela produção de um produto com uma abordagem dita “do berço ao túmulo” (LUNDIE et al., 2004; MUNOZ E FERNANDEZ-ALBA, 2008).

A ISO 14040 (2006) tem como principal conteúdo uma metodologia padrão para a elaboração de uma análise do ciclo de vida. Demonstra os princípios e quatro fases diferentes para esta avaliação, sendo: a definição do objetivo e escopo da ACV, a fase de análise de inventário do ciclo de vida (LCI), que contém todas os dados de entradas e saídas do sistema analisado, a fase de análise do impacto do ciclo de vida (LCIA), que define as categorias da fase do LCI em impacto (ponto médio), “midpoint”, e em danos (ponto final), “endpoint” e a fase de interpretação do ciclo de vida.

O ciclo de vida da água em uma rede de tratamento e distribuição começa na sua extração (bombeamento) dos rios, aquíferos, lagos ou oceanos. Quando a água é provinda dos rios ou lagos, geralmente o seu tratamento consiste na remoção dos microrganismos e dos sólidos suspensos. Em outros casos, um avançado tratamento é necessário para remover compostos orgânicos e outras partículas para garantir a qualidade da água (PLAPPALLY et al., 2012).

Segundo Loubet et al. (2014), tem aumentado progressivamente o uso da metodologia de ACV para avaliar o desempenho ambiental de rede de tratamento e distribuição de água. A análise do ciclo de vida vem sendo aplicada em recentes pesquisas sobre o sistema de tratamento de água potável e também no tratamento das águas residuais (GODSKESEN et al., 2013, STOKES E HORVATH, 2010). Em estudos realizados sobre o tema, Lassaux et al. (2006) avaliaram o impacto do uso de 1m³ de água do sistema de tratamento de água da Região de Wallon, na Bélgica. Os resultados mostraram que o impacto ambiental do sistema de água é menor do que o impacto ambiental do sistema de tratamento de águas residuais (esgoto).

Venkatesh e Brattebø (2011) estudaram o consumo de energia em sistemas de água urbanos, os custos e o impacto ambiental do ciclo da água em Oslo. Os resultados demonstraram que o sistema de tratamento de águas residuais possui o maior impacto ambiental, principalmente da acidificação e eutrofização. Atualmente existem vários modelos

computacionais ou softwares de ACV, como o Simapro, GaBi e openLCA que auxiliam no desenvolvimento da análise (CLAVREUL et al., 2014). Mesmo com muitas pesquisas de ACV em redes de tratamento e distribuição de água potável, ainda existem poucos estudos que focam em todo o sistema de tratamento água potável e águas residuais (SLAGSTAD e BRATTEBØ, 2014).

Outra grande e importante preocupação observada ao se estudar melhor os impactos relacionados com os sistemas de tratamento e distribuição de água potável são as perdas (vazamentos) em grande demanda dessa água. De acordo com Balestieri e Vilanova (2014), no Brasil, aproximadamente, 40% da água produzida nos sistemas de distribuição viram perdas, tornando, portanto, muito importante um amplo estudo para entender e quantificar os impactos causados por todo o processo, a fim de alcançar um patamar mais sustentável e eficiente na produção de água potável, reduzindo também as emissões de CO₂.

A matriz energética brasileira é bem diversificada, sendo que boa parte da energia elétrica gerada se deve às usinas hidrelétricas. As emissões para a geração de energia no Brasil em 2012 liberaram para cada 1 m³ de água nos municípios brasileiros 0,0504 kg de CO₂eq, sendo 0,0141 kg CO₂eq/m³ associados aos volumes de perda de água. Em 2012, os sistemas brasileiros de abastecimento de água representaram mais de 1,9% do consumo de energia elétrica. Quase 30% dessa energia foi desperdiçada devido às perdas de água nos sistemas de distribuição. Esses resultados apontam a baixa eficiência dos sistemas de água brasileiros em relação às perdas de água. A redução desses vazamentos poderia contribuir para diminuir as emissões de CO₂, minimizando os impactos ambientais (BALESTIERI e VILANOVA, 2014).

3.13. Parâmetros hidráulicos e elétricos

O controle operacional do parâmetro de pressão é de extrema importância no gerenciamento de perdas de água causadas por vazamentos. O monitoramento da pressão pode providenciar, entre outros fatores, a redução do desperdício e custos com o abastecimento de água. De acordo com Gonçalves et al. (2009), esse processo contribui para a redução da frequência de ruptura das tubulações e dos danos, reduzindo as interrupções de fornecimento, fornecendo ao usuário final um serviço com pressões mais estabilizadas e confiável.

Existem várias formas de operar um sistema de bombeamento em situações nas quais são necessárias a variação da vazão, como acionar as bombas somente no momento requerido

(operação com carga parcial), utilização de by-pass para retornar parte da vazão bombeada ao tanque de sucção, utilização de um reservatório de sucção com nível variado, inserção de perdas de carga no sistema através do estrangulamento de válvulas de controle, alteração da rotação da bomba através de acoplamentos hidráulicos ou elétricos entre bomba e motor, utilização de bombas operando em paralelo e, finalmente, utilização de inversores de frequência nos motores (KAYA et al., 2008).

De acordo com Neto (2008), o fator de carga é um índice que reflete o regime de funcionamento de uma dada instalação. Um fator de carga elevado, próximo a 1, demonstra que as cargas elétricas foram devidamente distribuídas ao longo do tempo. Por outro lado, um fator de carga baixo, apresenta que houve concentração de consumo de energia elétrica em um curto período de tempo, determinando uma demanda elevada.

Na condição de controlar e melhorar o fator de carga, deve-se buscar ações que influenciem demanda e consumo, seja por meio da redução da demanda com o deslocamento de cargas para o período de fora de ponta, reduzindo desta forma a demanda máxima registrada ou pelo aumento da produção nos períodos de baixa demanda (PROCEL, 2014).

De acordo com Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (2014), o baixo fator de carga demonstra que ocorreu concentração no consumo de energia elétrica em um período curto de tempo. Isso, pode ocorrer quando a empresa liga quase simultaneamente todos os equipamentos elétricos por um pequeno intervalo de tempo. A condição ideal é trabalhar com a menor demanda (kW) no maior intervalo de tempo. O custo da energia elétrica decresce exponencialmente em relação ao crescimento do fator de carga. Outra forma de aumentar o fator de carga é por meio da redução da demanda, limitando-a ao mínimo necessário. Assim, deve-se evitar a ligação simultânea de cargas de grande porte, programando e organizando melhor a produção, com funcionamento escalonado dos equipamentos ao longo do período.

Segundo Moura (2010), o fator de carga é um importante índice que pode ser utilizado como indicador de racionalidade do uso da energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água.

Tsutiya (2001), classificou o fator de carga em intervalos de operação, conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8. Classificação fator de carga.

Fator de carga	Classificação
0 – 0,35	Péssimo
0,35 – 0,55	Ruim
0,55 – 0,75	Regular
0,75 – 0,90	Bom
0,90 – 1,00	Ótimo

Fonte: Tsutiya (2001).

A Resolução 414 de 9 de setembro de 2010, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), demonstra que o fator de carga é considerado como a razão da demanda média pela demanda máxima da unidade consumidora, no mesmo intervalo de tempo especificado. A Equação 14 é utilizada para encontrar o fator de carga.

$$FC = \frac{P_m}{D_{m\acute{a}x}} \quad (14)$$

Onde,

FC: é o fator de carga;

P_m : é a energia média;

$D_{m\acute{a}x}$: é a demanda de potência máxima.

O parâmetro de fator de carga apresenta como a potência é solicitada ao longo do tempo. Quanto mais próximo da unidade, mais constante tende a ser a forma de usar a energia. De acordo com o Programa de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (2005), existe outra forma para calcular o fator de carga. Esse parâmetro pode ser calculado por meio do conhecimento da energia total consumida e do tempo do período de medição, dados esses presentes na fatura mensal de consumo de energia elétrica. A Equação 15 também é utilizada para calcular o fator de carga.

$$FC = \frac{E_T}{H_T \times D_{M\acute{A}X}} \quad (15)$$

Onde,

E_T : é a energia total;

H_T : é a quantidade de horas totais;

$D_{M\acute{A}X}$: é a demanda máxima.

Alguns parâmetros elétricos são essenciais para monitorar o funcionamento da estação de elevação e garantir uma boa eficiência, sendo os parâmetros da potência elétrica, consumo de energia elétrica e carga instalada.

A potência elétrica pode ser caracterizada com uma grandeza utilizada na especificação dos equipamentos elétricos, determinando o quanto o motor elétrico é capaz de produzir trabalho ou carga mecânica que pode suportar o seu eixo (MEDEIROS FILHO, 1997).

O consumo de energia elétrica pode ser definido através do cálculo de multiplicação potência elétrica do equipamento pelo tempo de funcionamento, ou seja, é a potência realizada ao longo do tempo (OLIVEIRA e SÁ JR, 1998).

A demanda de energia elétrica é definida como a média das potências instantâneas solicitadas à concessionária de energia pela unidade consumidora e integradas num determinado intervalo de tempo.

A energia ativa (kWh) é caracterizada por ser capaz de produzir trabalho, sendo nos motores a energia responsável pelo movimento de rotação. A energia reativa (kVarh) é a componente da energia elétrica que não realiza trabalho. Essa energia é solicitada por alguns equipamentos elétricos, sendo necessária para a manutenção dos fluxos magnéticos. O fator de potência é obtido da relação entre a energia ativa e reativa horária, a partir das leituras de aparelhos de medição. O valor do fator de potência indica a eficiência com que o motor elétrico está consumindo a energia (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 2005b).

De acordo com Tsutiya (2004), o consumo de energia elétrica em sistema de abastecimento de água é aproximadamente 0,6 kWh/m³ de água produzida, sendo que os motores elétricos utilizados nas estações elevatórias de água consomem 90% dessa energia. A cada etapa dos processos do sistema de abastecimento existem perdas de água. Como o desenvolvimento econômico do Brasil encontra-se atualmente relativamente limitado, essa indisponibilidade de recursos impedem os investimentos na produção da energia elétrica, necessária ao crescimento econômico do país. O setor de saneamento é uma das indústrias que mais desperdiça energia e o planejamento para redução de perdas neste setor deve levar em consideração tanto a água quanto a energia, pois para cada metro cúbico de água perdida se perde a energia demandada no seu processo.

Grande parte das cargas das unidades consumidoras consomem energia reativa indutiva, como os motores, transformadores, reatores para lâmpadas, fornos de indução, dentre outros. As cargas indutivas precisam de campo eletromagnético para seu funcionamento, por isso sua operação requer dois tipos de potência, a Potência Ativa (kW) que efetivamente realiza trabalho gerando calor, luz, movimento, etc. Já a Potência Reativa (kvar) é a potência usada apenas para criar e manter o campo eletromagnético das cargas indutivas. Ou seja, enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa (NETO, 2008).

O fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência aparente. O resultado demonstra a eficiência do uso da energia. Se o fator de potência for alto, indica uma eficiência elevada e inversamente, caso apresente um fator de potência baixo, indica baixa eficiência energética. O triângulo retângulo é frequentemente utilizado para representar as relações entre kW, kvar e kVA (NETO, 2008).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2010), o fator de potência é um dos parâmetros operacionais que permite obter a quantidade de energia ativa que realmente está sendo consumida pelo sistema, e pode ser compreendido como a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período específico de tempo. Em caso de o sistema estar com o fator de potência abaixo de 0,92, significa que ele está consumindo energia reativa além da permitida, em que serão faturadas mais duas parcelas, referentes à energia reativa e à demanda reativa excedente.

A solução mais empregada para fazer esse tipo de correção é a instalação de capacitores como fontes internas de energia reativa. Este investimento tem um retorno entre três a oito meses (ANEEL, 2010).

A Resolução 414 de 9 de setembro de 2010, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), regulamenta os critérios para fornecimento de energia elétrica e estabelece que o fator de potência deve ser mantido acima de 0,92. Quando o fator de potência for menor do que isso, a concessionária aplicará multa à unidade consumidora (usuário final).

De acordo com Tsutiya (2005), as principais causas do baixo fator de potência em instalações de saneamento são devidas aos motores operando em vazio,

superdimensionamentos dos motores, transformadores operando em vazio, transformadores superdimensionados, nível de tensão acima da nominal ou pela grande quantidade de motores de pequena potência. Quando os motores elétricos operam em vazio, consomem praticamente a mesma quantidade de energia reativa necessária à manutenção do campo magnético quando operados em plena carga. Entretanto, o mesmo não acontece com a energia ativa, que é diretamente proporcional à carga mecânica aplicada no eixo do motor. Sendo assim, quanto maior for a carga, maior será a energia ativa consumida e quanto menor a carga mecânica aplicada, menor a energia consumida, e conseqüentemente, menor o fator de potência.

Geralmente os motores superdimensionados resultam do projeto inadequado, pela substituição de um motor por outro de maior potência por meio da manutenção de reparos dos motores, provocando baixo fator de potência. Transformadores operando em vazio consomem grande quantidade de energia reativa quando comparada com a energia ativa, provocando baixo fator de potência. O superdimensionamento de transformadores alimenta pequenas cargas durante longos períodos de tempo. Nível de tensão acima da nominal proporcional à tensão aplicada aos motores de indução além da nominal, quanto mais intensa, maior será a quantidade de energia reativa consumida. Ou seja, menor será o fator de potência. A utilização simultânea de muitos motores de pequena potência gera baixo fator de potência.

De acordo com Tsutiya (2006), no Brasil, geralmente, nos sistemas de abastecimento de água da zona alta, utiliza-se reservatório elevado alimentado por uma estação elevatória com bombas de rotação constante. O reservatório elevado tem a principal função de garantir a pressão na rede, sendo o seu volume insuficiente para que lhe seja atribuída a finalidade de reserva. No sistema de abastecimento, onde o bombeamento de água é levado diretamente ao consumidor, é necessário controlar a vazão em função da demanda. Esse modelo de abastecimento é aplicado para atender regiões onde os estudos econômico financeiros se mostram mais elevados para implantação de sistemas tradicionais de abastecimento com utilização de reservatórios.

As bombas são normalmente selecionadas visando garantir a máxima vazão necessária ao sistema, nas condições de rendimento máximo. Porém, quando o sistema precisa de uma vazão menor, é necessário efetuar o controle de vazão da bomba por meio da mudança de suas características ou das características do sistema de bombeamento. O controle da vazão das bombas, devido às modificações das características do sistema de bombeamento, deve ser realizado através pelas manobras de válvulas. Já o controle de vazão pelas variações da curva

característica da bomba pode ser efetuado por meio do controle do número de bombas e pela variação da rotação das bombas.

A bomba centrífuga, para uma determinada rotação e um diâmetro do rotor, opera segundo uma curva Vazão (Q) x Altura Manométrica (H) e um rendimento, para cada ponto de operação ao longo desta curva característica. No momento que ocorre o deslocamento deste ponto de operação seja pela variação da demanda de água ou da altura manométrica, o motor poderá vir a operar fora do ponto de trabalho nominal e em condições de baixo rendimento, além de demandar uma potência acima das necessidades.

A rotação de motores elétricos de indução é dada pela Equação 16:

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (16)$$

Onde,

N_s: é a rotação síncrona (RPM);

F: é a frequência (Hz);

P: é o número de polos.

O inversor de frequência é um equipamento eletrônico que varia a frequência da tensão aplicada e, portanto, a rotação do motor. No caso de bombas centrífugas, isso possibilita o controle da vazão. Além disso, o inversor pode ser utilizado para partida e parada suave do motor, uma vez aumentando ou diminuindo sua rotação, por meio de uma rampa de aceleração, faz-se com que a corrente de partida ou parada possa ser controlada.

De acordo com Gibson (1994), os dispositivos para a variação de velocidade são alternativas energeticamente eficientes para controlar a vazão das bombas e podem ser utilizados igualmente as alternativas tradicionais, como as válvulas redutoras de pressão. A efetividade de dispositivos de controle de velocidade no controle da vazão depende da interação entre a curva característica da bomba (relação entre altura de elevação e vazão) e a curva do sistema. Essa interação inclui a magnitude da variação de velocidade necessária para que sejam obtidas as vazões máximas e mínimas requeridas, e sua relação com as regiões instáveis da curva da bomba, geralmente localizada na faixa de vazão inferior a 35% da nominal.

Inversores de frequência são indicados normalmente para sistemas com pressurização na rede, tipo booster, quando é necessário manter constante a pressão na rede independentemente da demanda de água (SNSA, 2007).

A principal vantagem de um inversor de frequência é a montagem simples. A corrente do motor é controlada de forma suave (sem picos), o que permite variar a rotação do motor em função da variação da frequência da tensão. As proteções elétricas (sobrecorrente, supervisão trifásica, etc.) são incorporadas no próprio equipamento, reduzindo o número de componentes e o tamanho do painel, elevando o fator de potência próximo de 1, eliminando a necessidade de correção por meio de condensadores e proporcionando economia de energia elétrica. As desvantagens são o custo elevado e as gerações harmônicas que fluem para o sistema elétrico da instalação e para a rede elétrica externa, causando interferências com outros consumidores (MARQUES, 2007).

De acordo com Moraes et al. (2010), o consumo de energia elétrica é a segunda maior despesa das empresas de saneamento de água, perdendo apenas para a despesa com pessoal. No sistema de bombeamento de água ocorrem variações na demanda de vazão diária e o reservatório deve ser abastecido com água para atender a demanda solicitada.

Segundo Barros et al. (2007), o inversor de frequência ou variador de velocidade; é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação nos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, causando uma variação de sua rotação e; fazendo com que o consumo de energia elétrica seja proporcional à rotação do motor, utilizando apenas a energia necessária.

Tsutiya (2006) enfatiza que o inversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação dos valores de frequência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação da sua rotação ou velocidade. Assim, a utilização de inversor de frequência é uma das alternativas mais eficientes para otimizar o uso de energia elétrica sem afetar a operação do sistema de bombeamento, pois permite o controle do funcionamento do conjunto motor-bomba em função da variação da demanda de água ao longo das horas do dia. Adequar a rotação do motor promove a alteração da curva da bomba sem maiores prejuízos para a curva do sistema ou instalação.

O equipamento Booster é uma alternativa utilizada para fornecer pressão suplementar para pequenos trechos de rede ou reservatórios terciários localizados em cotas elevadas ou para complementar a carga hidráulica de forma que a vazão proveniente de adutoras primárias atinja

reservatórios secundários instalados em cotas topográficas elevadas. No campo energético, os boosters permitem ajustar os níveis de pressão/vazão nas zonas especiais que apresentam características topográficas diferentes em relação ao restante do sistema. Com isso, conjuntos motor-bomba de grandes dimensões podem ser dimensionados considerando alturas manométricas menores, sendo o excedente requerido por zonas elevadas complementado, de forma ponderada, pelos boosters (VILANOVA, 2012).

Segundo Moreno et al. (2007), o consumo de energia elétrica que é atribuído à movimentação de água se dá pela utilização de conjuntos motor-bombas. Esses equipamentos são associados às instalações hidráulicas (tubulações, componentes hidromecânicos, dentre outros) e quando apresentam operação com baixa eficiência, devem ser tomadas medidas de eficiência hidráulica e energética nesse tipo de sistema.

3.14. Aplicação às instalações do sistema de abastecimento de água

De acordo com Souza (2011), para obter os dados de volumes de água utilizados e dos volumes de perdas, devem-se utilizar as ferramentas de macro e micromedição, em que a macromedição oferece a confiabilidade na determinação dos volumes de água captados, aduzidos, tratados, armazenados e distribuídos, e a micromedição, o volume de água comercializado.

Para a redução do consumo de energia e dos custos com energia elétrica, é necessário reduzir a altura manométrica ou o volume bombeado, assim como aumentar o rendimento dos conjuntos motor-bomba.

Também pode ser considerado o diâmetro adequado da tubulação para o recalque, a elaboração de projetos de estações elevatórias de água (observando sempre a eficiência dos equipamentos das instalações), a redução do atrito da parede interna da tubulação com a água, a altura manométrica, a eliminação do ar no interior das tubulações, as perdas físicas de água no sistema de abastecimento de água, a mistura de setores de abastecimento de água, o uso racional da água, o aumento do rendimento dos conjuntos motor-bomba, a redução dos custos de energia elétrica pela alteração da operação do sistema, a ampliação da reserva de água e a utilização de inversores de frequência nos conjuntos motor-bomba.

Segundo Pereira et al. (2010), a perda de energia elétrica relativa ao volume de água perdido pode ser calculada pela multiplicação do volume médio de água perdido (P) (perda na rede) pelo o consumo médio de energia (E), sendo representado pela Equação 17:

$$\text{Perda} = P \times E \quad (17)$$

Já a relação entre o valor de custo de bombeamento das perdas de água do sistema pode ser calculada pela multiplicação da perda de energia elétrica pelo custo unitário em kwh de energia elétrica vigente.

Pilscikovs e Dzelzitis (2013), enfatizam que o controle de pressão proporcional das bombas centrífugas pode aumentar significativamente a eficiência dos sistemas de abastecimento de água em termos de consumo de energia elétrica e perdas de água. O objetivo da pesquisa foi a derivação do conceito de aproximação para avaliar o potencial de melhoria da eficiência, aplicando o controle de pressão proporcional para bombas de velocidade variável no abastecimento de água.

O controle de pressão proporcional foi comparado com o controle de pressão constante. Por este motivo, as análises de cálculo de energia foram feitas para as bombas. O conceito de avaliação do potencial de melhoria da eficiência foi derivado e testado experimentalmente. A interação entre o consumo de energia, perdas de água e declinação da curva de controle de pressão proporcional da bomba foi encontrada no perfil de carga.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Descrição geral

As atividades desenvolvidas ao longo do período foram divididas em etapas conforme demonstrado na Figura 3 e trabalhada juntamente com o grupo multidisciplinar NUMMARH.

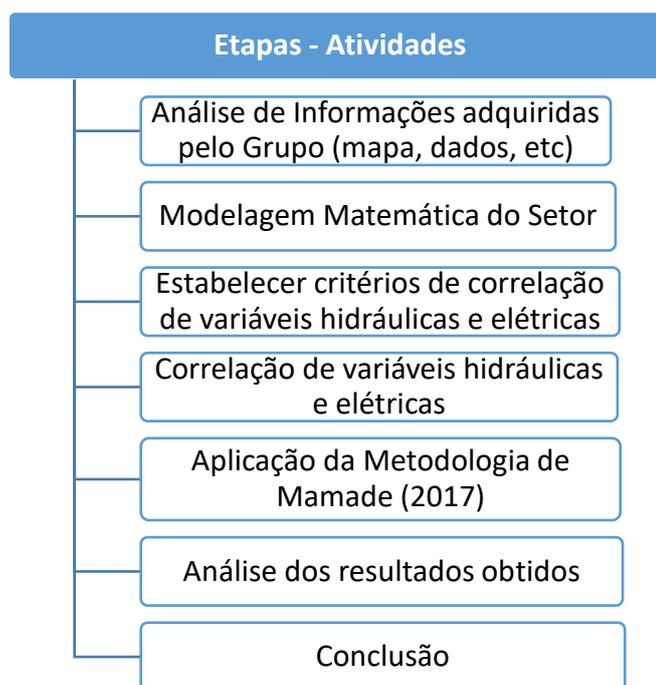


Figura 3. Atividades Desenvolvidas ao longo do Trabalho.

Fonte: O autor.

4.2. Descrição do sistema

Esse capítulo compreende a descrição dos métodos experimentais utilizados para a realização da pesquisa que trata do desenvolvimento de uma metodologia de análise da correlação entre parâmetros hidráulicos e elétricos em busca da eficiência energética de sistemas de abastecimento de água.

Para iniciar o presente estudo, foi necessário a coleta dos dados de interesse. Estes foram adquiridos por meio de vários trabalhos de campo. Após a definição do município que seria local de estudo e a escolha do setor de interesse, foram feitos testes, treinamentos e calibrações dos equipamentos de medição em laboratório.

Em seguida, por meio de uma visita de campo foram coletados os dados de interesse, tais como: cotas topográficas, utilizando o equipamento DGPS, dados de vazão em vários pontos, utilizando o equipamento de medidor de vazão ultrassônico e dados de pressão, utilizando o equipamento medidor de pressão. Para a coleta dos dados de energia foi feita uma parceria com a equipe de pesquisa envolvida nos estudos da REDECOPE – “Desenvolvimento de tecnologias e procedimentos eficientes para a gestão hidroelétrica em sistemas de abastecimento de água”, financiada pelo convênio REDECOPE / FINEP 983-10.

Trabalhos desenvolvidos no mesmo setor de interesse por Andrade (2016) e Soares (2016), foram utilizados como base para inclusão de mais dados pertinentes ao presente estudo.

4.3. Município no sul de Minas

A cidade escolhida está localizada ao sul do estado de Minas Gerais, Brasil, possui um sistema de abastecimento de água com características de setorização. O município fica aproximadamente, 110 km da cidade de Itajubá, sede da Universidade Federal de Itajubá, 151 km da cidade de São Paulo e 420 km de Belo Horizonte.

A cidade está localizada na região da Serra da Mantiqueira, com altitude máxima de 2.050 m e mínima de 680 m, topografia montanhosa e clima agradável, tropical de altitude e população de 26.488 pessoas (IBGE, 2010). A área total do município é de 242,859 km², altitude de 860m, com uma população estimada de 29.165 habitantes (IBGE, 2017). O município se destaca pelo intenso desenvolvimento industrial, devido à sua localização às margens da Rodovia Fernão Dias, BR-381, que liga aos principais polos do Brasil, São Paulo e Belo Horizonte.

4.4. Abastecimento de água no município

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), o sistema de abastecimento urbano de água da cidade escolhida capta água em sua maior parte no rio (ou Ribeirão) das Antas, afluente do Rio Itaim, pertencente à sub-bacia do Rio Sapucaí. Outra parte da água é captada no Córrego Rio do Peixe.

A Tabela 9 apresenta os dados referentes à captação de água do sistema de abastecimento urbano de água da cidade, considerando as condições de captação média e máxima. Durante a campanha de campo, o SAAE informou que não houve redução no fornecimento de água, mesmo com a atípica escassez de chuvas ocorrida na região durante todo o ano de 2014. A redução de fornecimento de água ocorreu após a campanha de campo e durou em média 30 dias, com vazões de captação reduzidas em aproximadamente 24%.

Tabela 9. Características SAAE.

	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

Fonte: O autor.

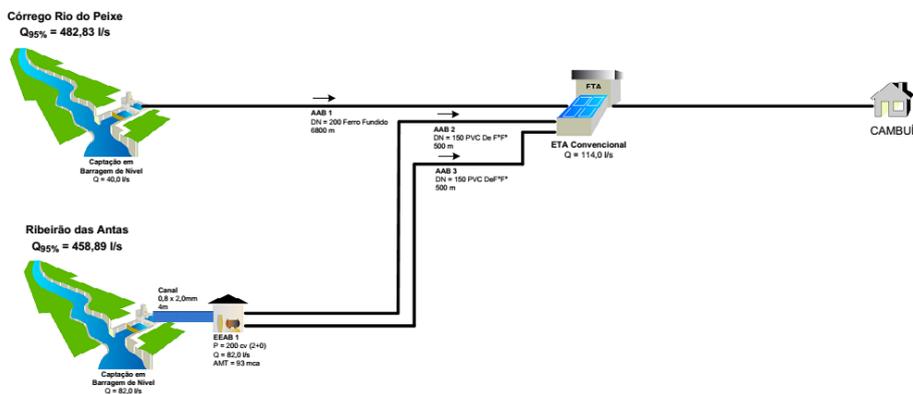
Na Figura 4 são demonstrados dados dos sistemas de distribuição de água do município do ano de 2010 e cenário de 2015. Estes dados foram adquiridos no Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água da Agência Nacional de Águas (ANA).

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 Croquis 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	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 4. Características SAAE.

Fonte: <http://atlas.ana.gov.br/>

A Figura 5 foi obtida no Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água da Agência Nacional de Águas (ANA) e ilustra um croqui de captação de água do sistema do ano de 2010.



POPULAÇÃO URBANA (hab)	SISTEMA PRODUTOR	TIPOS DE CAPTAÇÃO	SITUAÇÃO	SISTEMA ISOLADO CAMBUI	Nº
Baixo/Cliente/Povoado Até 5.000 De 5.000 a 50.000 De 50.000 a 250.000 De 250.000 a 1.000.000 Mais de 1.000.000	Adutora Estação Elevatória Estação de Tratamento de Água Desalinizador	Tratamento Reservatório Aplicado Reservatório Elevado Existente Projetado Em Obras	Captação Fio d'Água Tomada Direta Barragem/Agude Poço Bateria de n. poços Chafariz Córrego	Município: Cambuí Estado: MG Data: 12/04/2010 consórcio ENGECORPS cobrape	0000 Código Fonte SAAE

Figura 5. Características do SAAE.

Fonte: <http://atlas.ana.gov.br/>

O volume médio de água captada e tratada na cidade é de aproximadamente 7 milhões de litros de água por dia, o que equivale à média de 264,27 litros diário por pessoa, considerando o censo do IBGE 2010. O tratamento das águas captadas do Rio das Antas e do Córrego Rio do Peixe são realizadas na mesma Estação de Tratamento de água (ETA) e são misturadas na mesma rede adutora, o que pode representar perda de receitas, uma vez que a qualidade da água captada no Córrego Rio do Peixe é superior à do Rio das Antas. Na Figura 5 são demonstradas as localizações dos pontos de captação e da ETA.

Os comprimentos das tubulações que saem da captação até a ETA foram obtidos juntamente ao SAAE, sendo:

- Do Córrego Rio do Peixe até a ETA: aproximadamente 6,5 km de tubulação, em maior parte composta por tubos de ferro fundido de 200 mm de diâmetro. Existe no trajeto aproximadamente 300 m de tubulação de PVC de 250 mm, do tipo pba (ponta bolsa anel);
- Do Rio das Antas: 2 adutoras de aproximadamente 630 m de tubulação de PVC de 250 mm.

4.5. Setor de estudo e interesse

O setor de estudo foi escolhido por ser um setor isolado, onde é possível conhecer as entradas e saídas do sistema. Esse setor engloba parte da área abastecida pelos reservatórios R3 e R4 como identificados no SAAE e contempla os bairros Água Branca, Vale das Montanhas, Vale do Sol, Vila Mariana e Vale das Rosas. A Figura 06 representa o diagrama do setor de estudo.

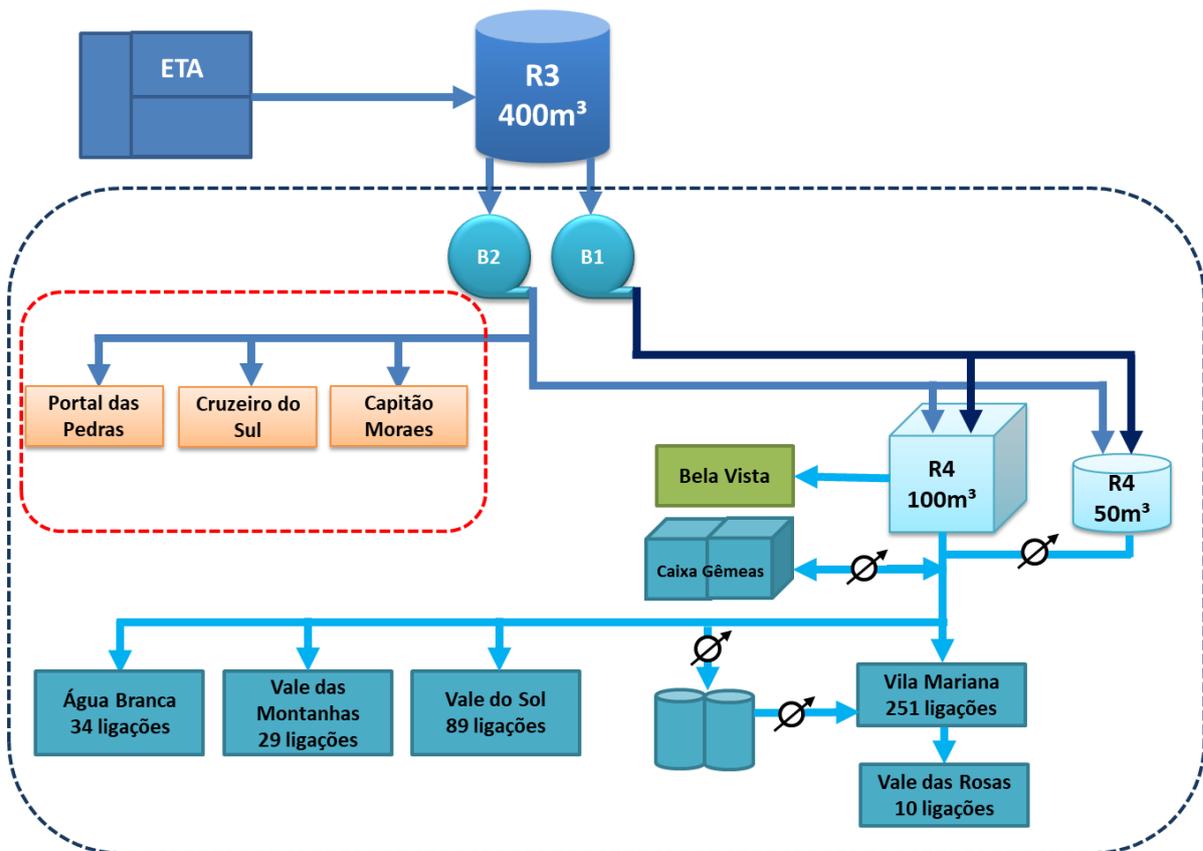


Figura 6. Desenho do esquema do setor de estudo.

Fonte: Adaptado de ANDRADE (2016).

No reservatório R3 (916,73m relação ao nível do mar) estão instalados dois conjuntos motor-bombas iguais para fazer a elevação da água através de duas tubulações isoladas. Um desses sistemas bombeia e abastece direto o reservatório R4 (958,73m relação ao nível do mar) (tubulação com diâmetro de 150 mm, diferença de altitude de aproximadamente 42 metros entre eles e distância de 1,41 km seguindo o trajeto da tubulação). O outro sistema abastece 3 reservatórios que não fazem parte do setor de interesse, sendo: Cruzeiro do Sul (30 m³), Cléber

ou Capitão Moraes (30 m³), Portal das Pedras (50 m³). A vazão restante desta tubulação segue para o reservatório R4. O setor de estudo possui ao total 413 ligações. A Figura 07 ilustra o desenho do esquema do setor de estudo.

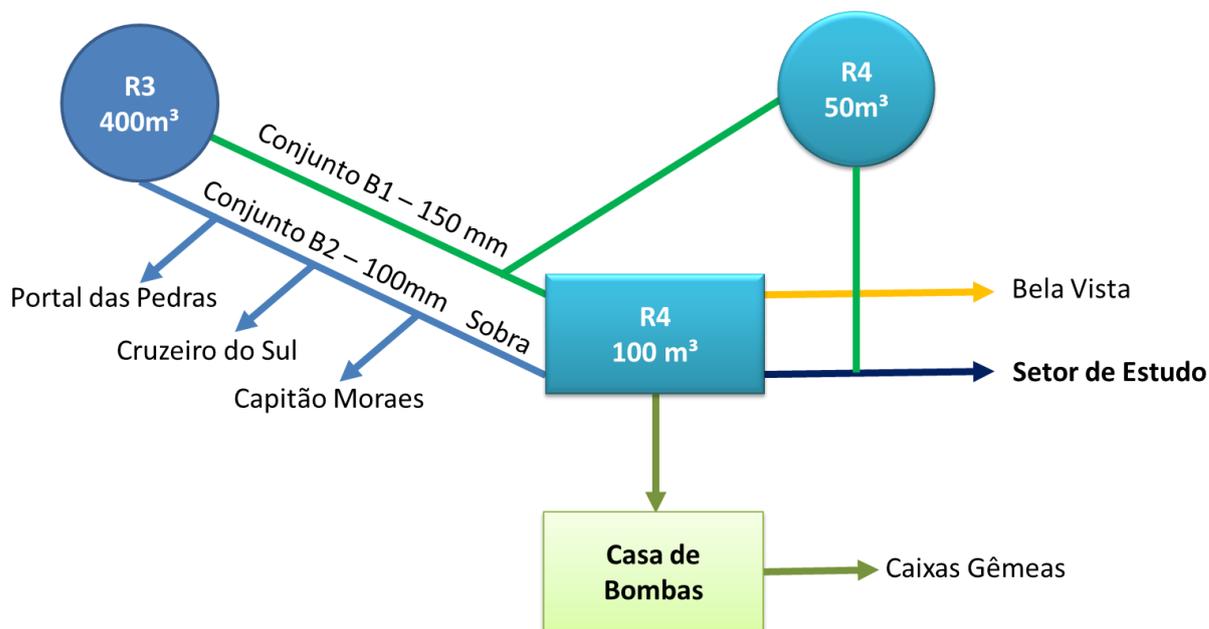


Figura 7. Diagrama do setor de estudo.

Fonte: Adaptado de ANDRADE (2016).

O setor de estudo inicia-se no reservatório R3 (capacidade máxima de 400 m³), onde parte da água é bombeada por meio de dois conjuntos motor-bombas (B1 e B2) para o reservatório R4. O sistema de reservatório R4 compreende 2 reservatórios, sendo um deles retangular com capacidade de 100 m³ de água. Esse reservatório retangular é conectado a um reservatório tubular com capacidade de 50 m³ de água que apenas começa a encher após abastecer totalmente o retangular.

O reservatório retangular possui 3 tubulações de saída: a primeira abastece o bairro Bela Vista e se interliga com o reservatório tubular de 50 m³ (existe uma válvula de retenção antes); a segunda tubulação 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. Essa tubulação também se interliga com o reservatório tubular (existe uma válvula de retenção antes).

O reservatório retangular 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 apenas 69,6 m³ contra 100 m³ de

sua capacidade total. Este reservatório possui sistema de controle de nível por meio de boia, transferindo o fornecimento de água para o reservatório cilíndrico quando o primeiro estiver abastecido.

O reservatório cilíndrico possui 3,20 m de diâmetro e altura total de nível de água de 6,20 m. A altura do nível útil foi definida pela posição do sensor de máximo (5,92 m), resultando em um volume útil total de 47,61 m³ contra 50 m³ de sua capacidade total. Este reservatório possui sistema de monitoramento de nível para acionamento dos conjuntos motor-bomba. Esse monitoramento é feito apenas do nível cheio ou vazio. Existem 2 reservatórios antes de chegar ao Bairro Vila Mariana, abastecidos também pelo R4, mas a água desses reservatórios somente é utilizada em dias de alto consumo, principalmente durante os fins de semana. Na semana da coleta dos dados, a válvula de retenção que isola estes reservatórios permaneceu fechada, isolando esta parte o setor.

A Figura 8 demonstra o posicionamento do reservatório e dos nós ao longo do setor de estudo. O nó 90 possui a maior altitude (957,2992m). O nó de menor altitude é o nó 110 (858,2409m). A média de altura dos nós é de 887,0592m.

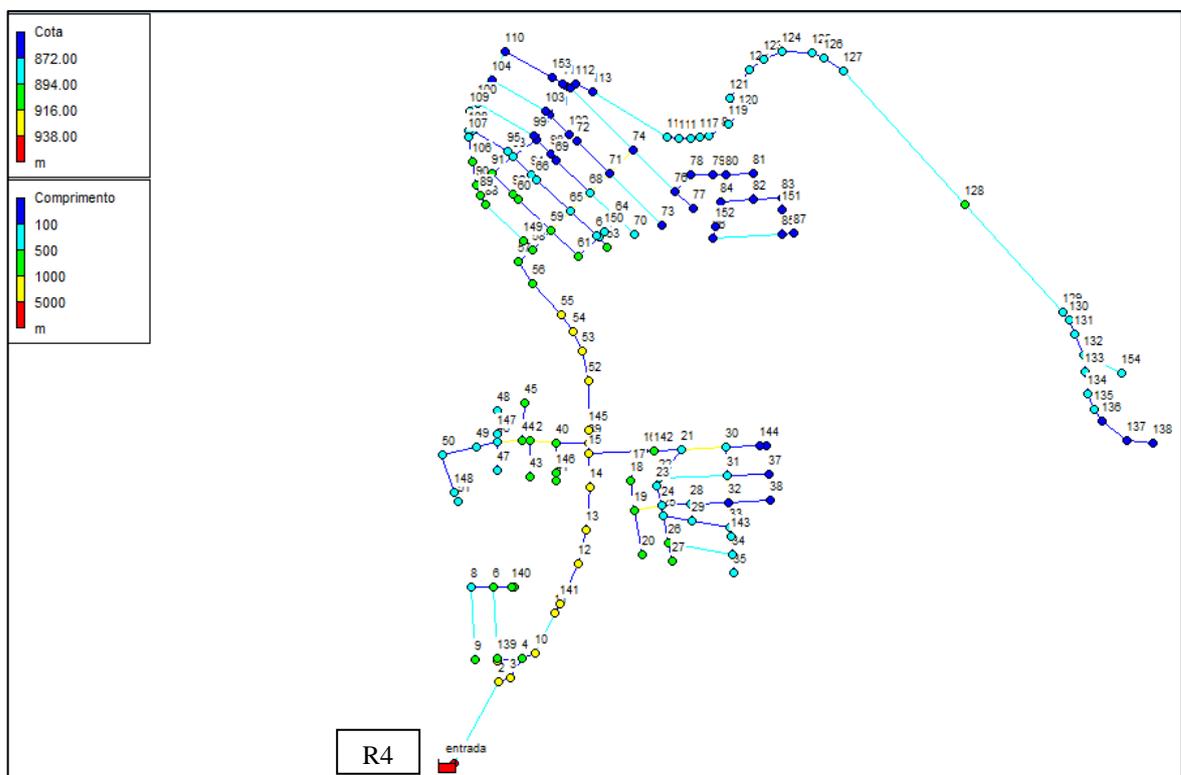


Figura 8. Mapa de localização dos nós e da vazão de saída do reservatório R4 com monitoramento de pressão, gerado pelo EPANET.

Fonte: Adaptado de GOULART (2015).

A Figura 9 representa o mapa com as zonas de pressão gerado pelo EPANET, pode-se observar as diferentes faixas de altitudes, resultando em diferentes faixas de pressão dentro do setor de estudo. O reservatório R4 (entrada do setor de estudo) está localizado em uma altitude de 958,73m e a distribuição de água acontece por gravidade em todos os pontos do setor de estudo. A variação de altitude dos nós pode chegar a 99m, gerando elevados valores de pressão em pontos de altitudes mais baixos. O setor de estudo caracteriza-se pelas altitudes acentuadas por esta localizada em uma região de morros.

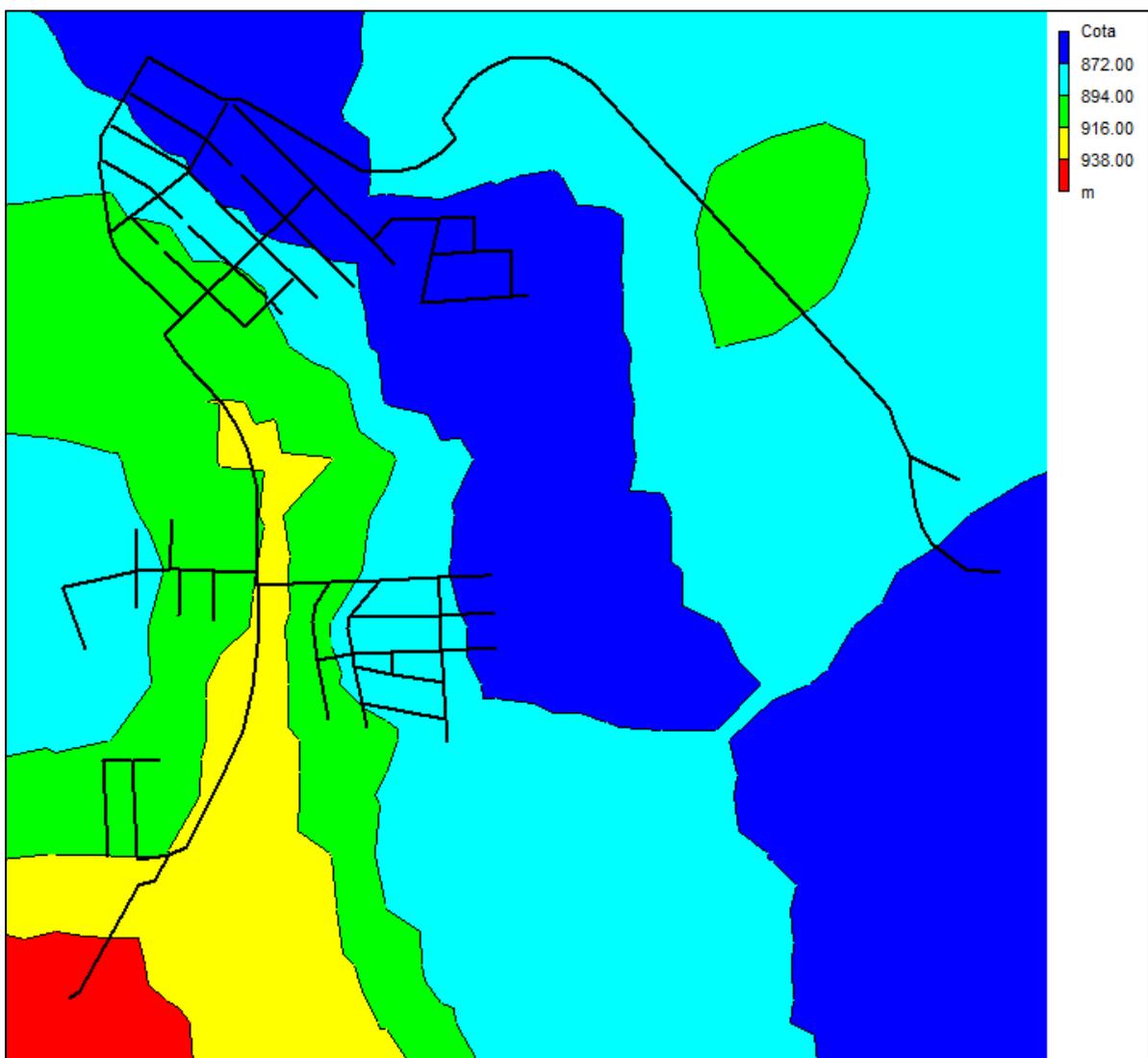


Figura 9. Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão através das dimensões de cotas, gerado pelo EPANET.

Fonte: Adaptado de GOULART (2015).

A Figura 10 ilustra o mapa com as zonas de pressão e a localização dos nós monitorados gerado pelo EPANET.

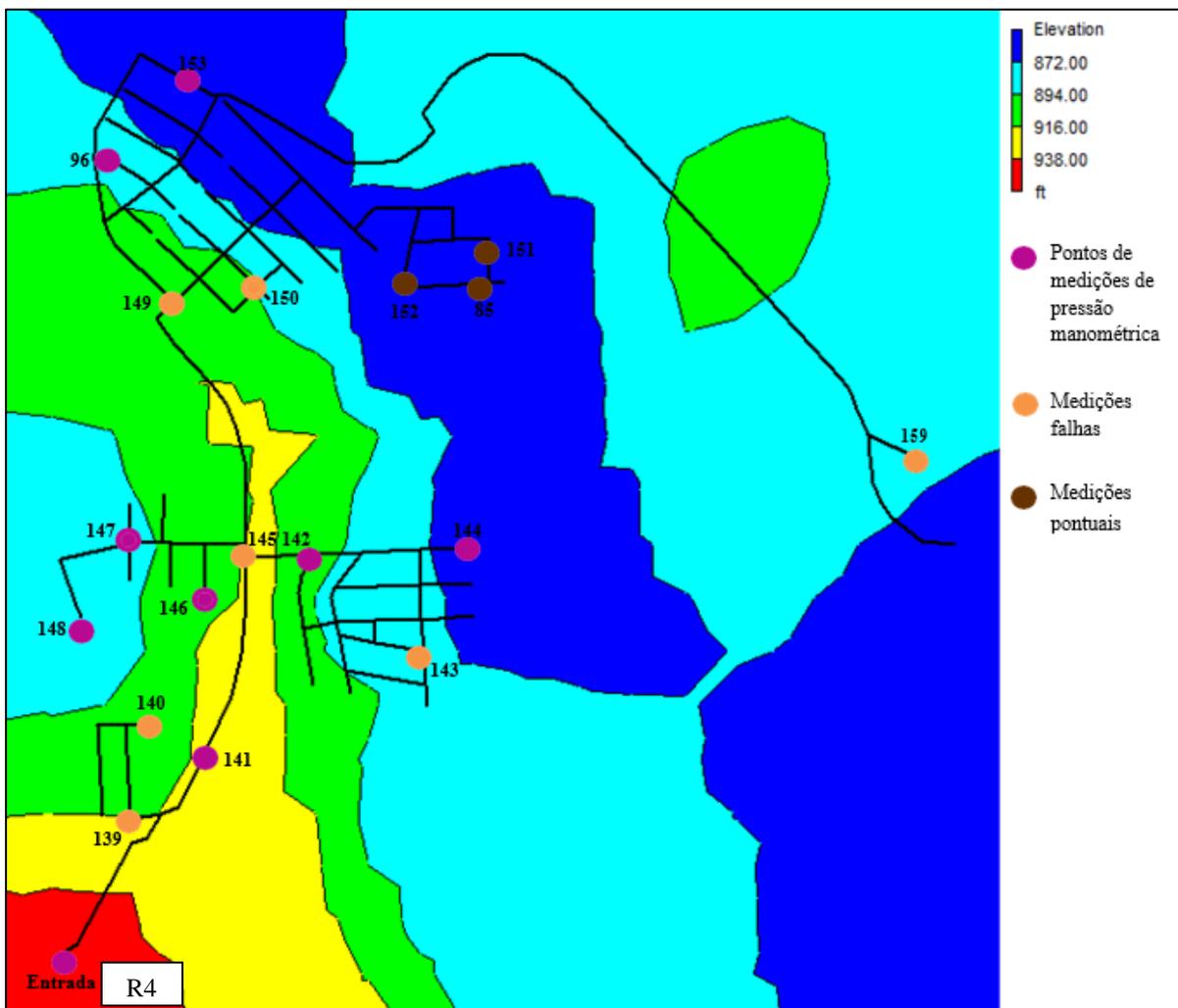


Figura 10. Mapa de localização dos nós com monitoramento de pressão, gerado pelo EPANET.

Fonte: Adaptado de GOULART (2015).

4.6. Gestão das atividades

O trabalho foi composto por uma equipe multidisciplinar responsável pelas atividades propostas para a cidade estudada. Dentre os profissionais envolvidos estavam engenheiros ambientais, hídricos, mecânico, de controle e automação e civil (mestrados em Engenharia de Energia), graduandos, além de outros colaboradores. As atividades foram divididas de acordo com o tema e delimitação escolhida.

Os trabalhos tiveram início do final de 2014 e continuaram em 2018, gerando materiais a serem estudados. Todas as informações coletadas e materiais importantes foram disponibilizados em uma pasta virtual, acessível a todos participantes. Reuniões semanais foram feitas a fim de apresentar os resultados adquiridos e discutir os passos seguintes.

A aquisição de relatórios internos do SAAE foi realizada por meio de visitas a campo. Foram coletados dados de consumos de água, energia, reagentes, diâmetros das tubulações em estudo, mapa da rede, dentre outras informações. Todos esses dados foram avaliados para definição das etapas posteriores.

Os equipamentos foram programados para começar a medição a partir das 00h do dia 08 de outubro de 2014, com intervalo de 1 minuto. Os medidores instalados no reservatório R3 foram de responsabilidade técnica da empresa contratada (financiada pelo convênio REDECOPE / FINEP 983-10). Foram utilizados medidores de vazão na saída da bomba 1 e da bomba 2 e também foi feita a medição elétrica das bombas deste sistema. Essa empresa é prestadora de serviços nas áreas de energia e saneamento, auxiliando na medição de parâmetros hídricos e elétricos no setor de interesse.

O analisador de energia modelo RE 6000 foi utilizado para obter as grandezas elétricas. Esse aparelho apresenta exatidão de 0,50 % e foi usado no circuito de alimentação dos conjuntos motor-bomba monitorados. O analisador registra grandezas como níveis de tensão, corrente elétrica, fator de potência, frequência, distorções harmônicas, demanda de potência e de energia elétrica consumida. Os dados foram coletados durante uma semana, com intervalos de medição de 1 minuto.

O sensor hidrostático com exatidão de 0,50 % foi instalado internamente ao reservatório retangular para monitorar o nível de coluna d'água disponível. Este sensor foi conectado ao *datalogger* para o monitoramento. O nível do reservatório cilíndrico foi monitorado por meio de um transdutor com exatidão de 0,50%, instalado externamente ao reservatório, obtendo a coluna d'água disponível. Esse sensor também foi conectado ao *datalogger* para o monitoramento.

Na medição da vazão bombeada no reservatório R3, dos dois conjuntos motor-bomba, foram utilizados dois medidores de vazão ultrassônicos, com exatidão de 2%, que foram instalados na saída das adutoras. Os dados foram registrados individualmente por meio de *dataloggers* e sincronizados com o restante das medições.

A equipe instalou 23 dataloggers e 4 medidores de vazão (ultrassom). Os equipamentos foram distribuídos da seguinte maneira:

- 1 datalogger (Logger 18) e 1 ultrassom (empresa) no reservatório R3 – tubulação da bomba que distribui água para os bairros e direciona a sobra para o R4;
- 1 datalogger (Logger 16) e 1 ultrassom (empresa) no reservatório R3 – tubulação da bomba que abastece direto o reservatório R4;
- 1 datalogger (Logger 07) e 1 ultrassom (sem fita) na tubulação da sobra de água que chega no reservatório R4;
- 1 datalogger (Logger 01) e 1 ultrassom (com fita) no reservatório R4 – Entrada do setor;
- 18 dataloggers espalhados na rede de distribuição do setor. Por falta de local ideal para a instalação 3 nós no bairro Vale das Rosas eles foram monitorados pontualmente por 30min em diferentes horários do dia;
- 1 logger (Logger 04) foi mantido em reserva.

4.7. Sistema do setor de estudo

A estação elevatória do reservatório R3 tem um sistema automatizado de acionamento dos conjuntos motor-bomba, através do monitoramento do nível do reservatório R4. O sistema é composto por dois conjuntos motor-bomba, de mesmo modelo e que alimentam duas linhas distintas e isolada, entretanto, possuem um registro de ligação logo após a saída da casa de máquinas para uma possível ligação em paralelo. Durante a coleta de dados foram realizados monitoramentos no reservatório R3, onde está localizada a estação elevatória, e no reservatório R4, entrada do setor. A Tabela 10 apresenta as características das bombas 1 e 2.

Tabela 10. Dados nominais das bombas 1 e 2.

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

Fonte: O autor.

Os dois conjuntos motor-bomba possui motores de indução trifásicos com potência nominal unitária de 25cv, com partida realizada com auxílio de soft-starter. Uma das tubulações de saída de R3 possui diâmetro (DN 100 mm) e abastece outros três reservatórios antes de chegar em R4. A outra tubulação possui diâmetro (DN 150 mm) e segue direto para os reservatórios em R4. Durante o período de medição, a ligação entre as duas tubulações de saídas de R3 ficaram fechadas, isolando os dois sistemas.

A Tabela 11 demonstra os dados nominais dos motores.

Tabela 11. Dados nominais dos motores.

	Motor 1	Motor 2
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

4.8. Adequação dos pontos de medição

Adequações nos pontos de medição foram feitas a fim de obter o correto monitoramento das grandezas elétricas e mecânicas. Além disso, foram realizadas medições pontuais nos conjuntos motor-bomba, visando obter o rendimento desses conjuntos. Os seguintes parâmetros foram coletados:

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

Os dados no ponto de *shutoff*, quando a válvula de recalque é completamente fechada, também foram coletados, possibilitando assim a obtenção da curva de operação das bombas por

meio do método de interpolação de três pontos. Todos os equipamentos de medição foram sincronizados, de forma a correlacionar as grandezas monitoradas ao longo desse período.

4.9. Ensaio de rendimento dos conjuntos

A norma DIN EN ISO 9906 (março de 2013) foi utilizada para a realização dos ensaios dos conjuntos motor-bomba. Com o propósito de obter os rendimentos dos conjuntos motor-bomba, foram medidas as pressões na entrada e na saída das bombas, assim como a vazão e a potência elétrica.

4.10. Medições de pressão nas bombas

As medições de pressão foram obtidas por meio de transdutores de pressão instalados na sucção e no recalque das bombas. Esses sensores foram conectados aos dataloggers para a aquisição e monitoramento dos dados. Também foi realizada a medição dos diâmetros de sucção e recalque das bombas, além da diferença de cotas entre os sensores.

Os transdutores possuem exatidão de 0,50% foram conectados a um sistema de aquisição de dados software e horário sincronizado. Os transdutores da sucção tinham faixa de operação de -10m a 10m e do recalque das bombas tinham faixa de 0 a 100m.

4.11. Balanço energético

Mamade et al. (2017) propôs uma nova metodologia para balanço energético e indicadores de desempenho a fim de avaliar a eficiência energética em sistemas de abastecimento de água. Essa avaliação da eficiência energética engloba três etapas. A primeira é a caracterização do sistema e a coleta de dados relacionados aos ativos físicos, hidráulicos, mecânicos e elétricos. A segunda etapa é calcular os componentes do balanço de energia e a terceira é o cálculo e análise de indicadores de desempenho para entender as oportunidades de melhorias de eficiência.

Na etapa de caracterização do sistema e coleta de dados são definidos claramente os limites do sistema, o layout e os principais ativos (tubulações, tanques, estações de

bombeamento). A análise pode incluir todo o sistema, desde a entrada até o ponto de entrega ou somente a parte do sistema considerada relevante (por exemplo, um setor de rede).

Uma avaliação simplificada requer dados mínimos e pode ser aplicada ao sistema, fornecendo uma visão geral dos principais componentes de consumo de energia. É mais utilizada quando a concessionária não tem modelos hidráulicos. Uma avaliação completa requer um sistema hidráulico calibrado e o modelo da rede, fornecendo uma avaliação detalhada de consumo de energia em todos os componentes do balanço. Os cálculos podem ser realizados usando a simulação através do software EPANET.

Na avaliação simplificada são requeridos os dados de volume de entrada de água e altura hidráulica nos pontos de entrega, tanques de armazenamento e estações de bombeamento, bem como o consumo de energia elétrica em cada estação de bombeamento visando o cálculo preliminar da eficiência da estação de bombeamento. Esse cálculo preliminar é importante para comparar os dados fornecidos pelo fabricante da bomba e motor elétrico e verificar se o equipamento está operando dentro das condições nominais. O sistema deve ser dividido em áreas com requisitos de pressão semelhantes, em que o consumo autorizado é conhecido. Finalmente, a porcentagem de perdas de água e consumo autorizado no sistema devem ser coletados e calculados as perdas. Na avaliação completa são requeridas as informações prévias, incluindo dados do balanço hídrico e também um modelo hidráulico confiável do sistema.

No cálculo do balanço de energia deve-se realizar uma auditoria que permita calcular a energia consumida no sistema. Isso pode ser adquirido por meio do tempo integração da equação de energia.

O esquema de balanço de energia proposto por Mamade et al. (2017) é demonstrado na Tabela 12.

Tabela 12. Balanço energético baseado na metodologia de Mamade et al. (2017).

Energia Natural de Entrada	Energia Total de Entrada do Sistema	Energia associada com o consumo autorizado	Energia associada com a água fornecida aos consumidores	Energia mínima requerida
			Energia dissipada devido às perdas de carga contínuas e singulares	Energia Excedente
				Atrito da Tubulação
				Válvulas redutoras
				Ineficiência das estações de bombeamento
		Energia Recuperada	Micro usina hidrelétrica	
		Energia associada com as perdas de água	Associado com o consumo autorizado	
			Associado com as perdas de água	
			Energia dissipada no consumo dos nós	
			Atrito da Tubulação	
Válvulas redutoras				
Energia de Entrada do Eixo			Energia dissipada devido às perdas de carga contínuas e singulares	Ineficiência das estações de bombeamento
			Micro usina hidrelétrica	

Não requer modelagem matemática

Requer modelagem matemática

Fonte: Adaptado de Mamade et al. (2017).

Neste processo são utilizadas informações dos balanços hídricos de Andrade (2016) para separar a energia associada ao consumo de água e às perdas de água, proporcionando uma percepção intuitiva das melhorias de eficiência que podem ser alcançadas pela redução das perdas de água (perdas reais e aparentes). Consequentemente, a porcentagem de energia associada às perdas de água é igual à porcentagem de perdas de água no sistema, supondo que as perdas sejam distribuídas uniformemente pelo sistema para avaliação simplificada e detalhada.

Na avaliação simplificada, o cálculo dos itens se restringe às partes em branco da Tabela 12, enquanto que na avaliação completa inclui-se todos os componentes. Cada componente do esquema de balanço energético deve ser calculado em relação a um nível de referência. Recomenda-se que o nó de menor elevação seja adotado como referência para que, ao fazer a

comparação de diferentes sistemas, todos os cálculos refiram-se ao mesmo nível de referência. Para este trabalho foi utilizada a avaliação simplificada. Todas as equações foram adaptadas devido aos limites do sistema, ao layout e aos principais ativos (tubulações, tanques, estações de bombeamento) do sistema estudado.

A Figura 11 ilustra os conceitos necessários para calcular os componentes do balanço de energia para os sistemas de elevação e distribuição. Neste exemplo o sistema de bombeamento eleva a água e a entrega a um reservatório que a fornece a um setor específico da rede.

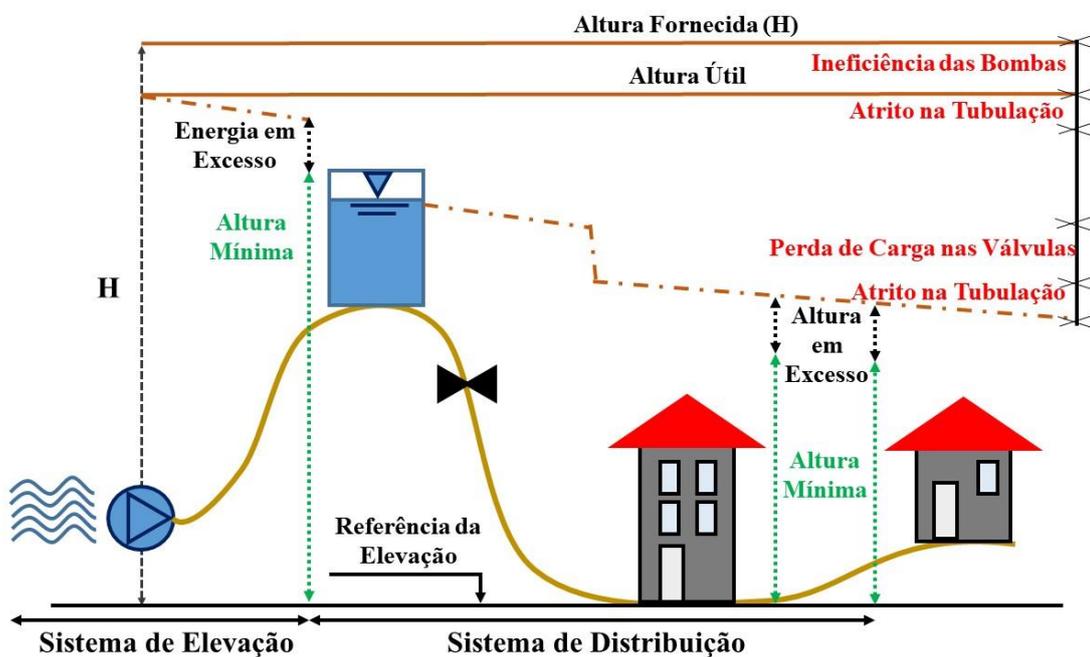


Figura 11. Representação esquemática dos diferentes conceitos necessários para calcular os componentes do balanço de energia para os sistemas de elevação e distribuição.

Fonte: Adaptado de Mamade et al. (2017).

De acordo com Mamade et al. (2017), a parcela de energia total de entrada do sistema possui dois componentes principais, sendo que o primeiro é, a energia de entrada do eixo que se refere à energia fornecida pela estação elevatória (R3). A Equação 18 exemplifica o cálculo deste componente.

$$E_{EE} = B + \gamma * \left(V_p * (h_p - z_0) \right) * \alpha \quad (18)$$

Onde,

V_p : é o volume anual de água bombeada (m³);

B: é o valor anual do consumo de energia elétrica da estação elevatória R3;

hp: é a altura hidráulica (m) a jusante da bomba;

z₀: é a elevação de referência (m);

γ: é o peso específico da água (N/m³);

α: é o fator de conversão de Ws para kWh, $1 / (1000 \times 3600) = 2,78 \times 10^{-7}$.

O segundo componente é a energia de entrada natural que se refere à energia potencial gravitacional fornecida pelos reservatórios (MAMADE et al., 2017). A Equação 19 descreve a forma como a energia natural de entrada é calculada.

$$E_N = \gamma * (V_r * (H_r - z_0)) * \alpha \quad (19)$$

Onde,

z₀: é a elevação de referência (m);

γ: é o peso específico da água (N/m³);

H_r: é a altura do reservatório (m);

V_r: é o volume anual fornecido pelo reservatório / tanque (m³);

α: é o fator de conversão de Ws para kWh, $1 / (1000 \times 3600) = 2,78 \times 10^{-7}$;

Para calcular a energia total de entrada pode-se utilizar a Equação 20.

$$E_{TOT} = E_{EE} + E_N \quad (20)$$

Do total da energia de entrada (natural e do eixo), uma parte é utilizada para fornecer o consumo autorizado (ECA) e a outra está associada às perdas de água (EPA), como relacionado nos balanços hídricos (LAMBERT e HIRNER, 2000, apud MAMADE et al., 2017). Esses componentes são calculados pelas Equações 21 e 22.

$$E_{CA} = E_{TOT} * \frac{V_{CA}}{V_{TOT}} \quad (21)$$

$$E_{PA} = E_{TOT} - E_{CA} \quad (22)$$

Onde,

V_{CA} : é o consumo anual autorizado (m^3);

V_{TOT} : é o volume anual de entrada do sistema (m^3).

Uma parte da energia total associada ao consumo autorizado é a energia mínima necessária para abastecer os consumidores (MAMADE et al., 2017). Este componente é calculado por meio da Equação 23.

$$E_{MIN} = \gamma * \left(V_{CA} * (z_{CG} + p_{REQ} - z_0) \right) * \alpha \quad (23)$$

Onde,

V_{CA} : a é o consumo anual autorizado (m^3);

z_{CG} : a é o centro de massa do consumo;

p_{REQ} : é a pressão mínima requerida (m) na área de análise.

No cálculo da energia mínima na avaliação simplificada (E_{MIN}), o sistema deve ser dividido em áreas homogêneas de acordo com a pressão e consumo, onde o consumo anual autorizado necessita ser conhecido. Logo, o centro de massa de consumo deve ser estimado e uma pressão mínima necessária também deve ser assumida para toda a área (MAMADE et al., 2017). Este valor de pressão depende das características da área (tamanho, tipo de moradias) e também deve levar em consideração os valores exigidos pela Norma Técnica NBR nº 12.218/1994. A pressão fornecida pode ser maior do que a pressão requerida, criando uma energia excedente no sistema (E_{EXC}). A Equação 24 exemplifica o cálculo desta energia em excesso.

$$E_{EXC} = \gamma * \left(\sum_{n=1}^{n_n} \sum_{t=1}^{n_t} q_n^t * (H_n^t - z_0) * \Delta_t \right) * \alpha - E_{MIN} \quad (24)$$

$d = \frac{CA}{TOT}$

Onde,

H_n^t : é a altura do nó (m) no tempo t;

n_t : é o número do intervalo de tempo;

n_n : é o número de nós;

$d = CA/TOT$: refere-se à simulação sem perdas de água (ou seja, definindo um multiplicador de demanda como a porcentagem do consumo autorizado fornecido pelos balanços hídricos);

q_n^t : é o consumo do nó (m^3/s) no tempo t ;

Δt : é a variação do tempo.

Uma parte da energia total fornecida é dissipada pelo atrito nas tubulações, ou em válvulas ou nas bombas. Esta energia dissipada também pode ser dividida entre consumo autorizado e perdas de água (MAMADE et al., 2017). A energia de atrito do tubo associada ao consumo autorizado é calculada por meio da Equação 25.

$$E_{DISS} = \gamma * \left(\sum_{i=1}^{n_p} \sum_{t=1}^{n_t} q_i^t * J_i^t * L_i * \Delta_t \right)_{d=\frac{CA}{TOT}} \quad (25)$$

Onde,

q_i^t : é a taxa de fluxo do tubo (m^3/s) no tempo t ;

J_i^t : é a perda de capacidade da unidade (m/m) no tempo t ;

N_p : é o número de bombas;

L_i : é o comprimento do tubo (m).

Para obter o atrito do tubo associado às perdas de água é necessário executar uma simulação com um multiplicador de demanda $d = 1$ e subtrair os resultados da energia dissipada associada ao consumo autorizado, como visto na Equação 26 (MAMADE et al., 2017).

$$E_{DISSPA} = \gamma * \left(\sum_{i=1}^{n_p} \sum_{t=1}^{n_t} q_i^t * J_i^t * L_i * \Delta_t \right)_{d=1} * \alpha - E_{DISS} \quad (26)$$

A perda de energia nas válvulas associadas ao consumo autorizado pode ser calculada por meio da Equação 27. A perda de energia nas válvulas associadas as perdas de água podem ser calculadas pela Equação 28 (MAMADE et al., 2017).

$$E_{DISSVA} = \gamma * \left(\sum_{i=1}^{n_v} \sum_{t=1}^{n_t} q_i^t * \Delta H_i^t * \Delta_t \right)_{d=\frac{CA}{TOT}} * \alpha \quad (27)$$

$$E_{DISSVAPA} = \gamma * \left(\sum_{i=1}^{n_v} \sum_{t=1}^{n_t} q_i^t * \Delta H_i^t * \Delta_t \right)_{d=1} * \alpha - E_{DISSVA} \quad (28)$$

Onde,

q_i^t : é a vazão de água (m³/s) através da válvula no tempo t;

ΔH_i^t é a perda de carga (m) no tempo t.

A energia dissipada nas estações de bombeamento pode ser calculada por meio das Equações 29 e 30 (MAMADE et al., 2017).

$$E_{DISSECA} = \sum_{S=1}^{n_s} E_S * (1 - \eta_S) * \frac{V_{CA}}{V_{TOT}} \quad (29)$$

$$E_{DISSEPA} = \sum_{S=1}^{n_s} E_S * (1 - \eta_S) * \frac{V_{PA}}{V_{TOT}} \quad (30)$$

Onde,

η_S : é o rendimento do conjunto motor-bomba;

E_S : é a energia gasta do conjunto motor-bomba;

n_s : é o número de bombas do sistema;

V_{PA} : é o volume de perda de água na estação de bombeamento.

A energia associada às perdas de água nos nós de consumo inclui as perdas aparentes que correspondem aos erros de consumo não autorizados e de medição do consumidor (MAMADE et al., 2017). Também inclui as perdas reais, que correspondem as perdas reais de água na rede de água em todo sistema. Por meio da Equação 31 pode-se calcular a energia associada às perdas de água.

$$E_{DISSNO} = \gamma * \left(\sum_{n=1}^{n_n} \sum_{t=1}^{n_t} (q_n^t * (H_n^t - z_0)) \right) * \Delta T - E_{MIN} - E_{EXC} \quad (31)$$

Para avaliar a eficiência energética é necessário calcular os indicadores de desempenho como o consumo de energia específico por volume de água bombeada (kWh/m³) (ISO, I. O. f. S. 2015) ou o consumo de energia padronizado (kWh/m³/100m) (ALEGRE et al. 2006).

O indicador de consumo específico de energia é muito utilizado, entretanto não permite comparar a eficiência da bomba em sistemas com diferentes topografias, já o consumo de energia padronizado atende somente à eficiência dos sistemas de bombeamento, não fornecendo informações específicas sobre a eficiência global do sistema e não permitindo monitorar o impacto de diferentes soluções alternativas, caso elas não tenham um impacto direto nas estações de bombeamento (MAMADE et al., 2017).

Mamade et al. (2017) propôs três indicadores de desempenho (E1, E2 e E3) para avaliar melhor a eficiência energética do sistema. Esses indicadores baseiam-se nos conceitos de energia mínima e de energia em excesso (ALEGRE, 1992).

O indicador E2 (Equação 32) representa o potencial teórico de redução de energia por volume de consumo autorizado. E2 apresenta sempre valor positivo, sendo que, quanto mais baixo melhor. Como o denominador é o consumo autorizado, este indicador reflete o impacto das medidas de controle de vazamento. Em caso de as perdas reais forem reduzidas, E2 terá um valor menor, uma vez que o numerador diminui e o denominador é o mesmo (se as perdas aparentes não mudarem). O indicador E2 também pode ser avaliado em termos de energia de entrada natural (E2 (natural)) e energia de entrada do eixo (E2 (eixo)) de acordo com as Equações 33 e 34 (MAMADE et al., 2017).

$$E2 = (E_{TOT} - E_{MIN}) / V_{CA} \text{ (kWh/m}^3\text{)} \quad (32)$$

$$E2 \text{ (natural)} = (E_N - E_{MIN}) / V_{CA} \text{ (kWh/m}^3\text{)} \quad (33)$$

$$E2 (eixo) = (E_{EE} - E_{MIN})/\nabla_{CA} \text{ (kWh/m}^3\text{)} \quad (34)$$

O indicador E3 (Equação 35) representa uma relação da energia teórica em excesso que é fornecida ao sistema em comparação com a energia mínima necessária. O valor do indicador E3 deve ser o mais baixo possível, sempre positivo, uma vez que a energia total fornecida inclui perdas de carga. O E3 pode ser avaliado em termos de energia em excesso devido à operação e layout da rede (E3 (rede)), levando em consideração a energia excedente e a energia dissipada em tubulações e válvulas devido ao consumo. O potencial de melhoria da bomba é dado pela avaliação do E3 com a energia dissipada nas bombas (E3 (bombas)). O potencial de melhoria de perdas de água é dado pela avaliação de E3 com energia associada a perdas de água (E3 (perdas)).

$$E3 = (E_{TOT} - E_{MIN})/E_{MIN} \quad (35)$$

$$E3 (sistema) = (E_{EXC} + E_{DISS} + E_{DISSVA})/E_{MIN} \quad (36)$$

$$E3 (bomba) = (E_{DISSECA})/E_{MIN} \quad (37)$$

$$E3 (perdas) = (E_{PA})/E_{MIN} \quad (38)$$

O esquema de balanço de energia de Mamade et al. (2017), juntamente com os indicadores são aplicados a este trabalho de forma simplificada.

4.12. Correlação dos parâmetros hidráulicos com os elétricos

Para estabelecer a correlação dos parâmetros hidráulicos e elétricos, foi estruturada uma metodologia com a finalidade de melhorar a eficiência energética do sistema de abastecimento de água do sul de Minas Gerais.

Na primeira etapa, tomando como base os dados obtidos de vazão na saída do reservatório R4 nos 07 dias de campanha, foi possível estimar um consumo médio do setor de interesse. A curva do consumo médio diário de água do setor de estudo representa a vazão total que deve ser fornecida pelo sistema de bombeamento. Nesta pesquisa foram utilizados dados obtidos por meio de medições de campo da Rede.

Na segunda etapa, por meio das medições das vazões bombeadas por cada conjunto motor-bomba instalados no reservatório R3, foi possível estimar uma média da vazão bombeada de cada conjunto. O sistema internacional de unidades foi utilizado para as grandezas das unidades.

Na terceira etapa, o rendimento global dos conjuntos motor-bombas foi obtido pela relação do produto entre o rendimento do motor e da bomba. Para as bombas, geralmente, os rendimentos são apresentados junto com a curva da bomba em catálogos de fabricantes. É importante a adoção de critérios ao estimar o rendimento da bomba durante os projetos de sistemas de bombeamento já que se trata de uma das grandezas com maior relevância para o consumo energético do sistema. Nos ensaios dos conjuntos motor-bomba, a norma DIN ISSO ISSO 9906, de março de 2013, foi utilizada para determinar os rendimentos dos conjuntos. Foram medidas as pressões na entrada e na saída das bombas, assim como a vazão e a potência elétrica. Para calcular o ponto de operação os conjuntos motor-bomba foram testados da seguinte forma:

- Ensaio do conjunto 1 isoladamente;
- Ensaio do conjunto 2 isoladamente;
- Ensaio dos conjuntos 1 e 2 em paralelo.

Para isolar o conjunto, fechou-se a válvula que liga as duas tubulações de recalque e desligou o outro conjunto. Para os ensaios, mediu-se 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*). Uma equação e a curva característica dos conjuntos foram geradas. Para obter o ponto de operação do sistema adquirido deve-se encontrar a curva do sistema, que é obtida por meio da Equação 39:

$$H = H_0 + K \cdot Q^2 \quad (39)$$

Onde,

H: é a altura manométrica do sistema (m);

H_0 : é a altura geométrica (m);

K: é a constante referente às perdas de cargas localizadas $\left[\frac{H_N - H_S}{Q_N^2} \right]$;

HS: altura total de elevação para vazão zero [m];

HN: altura total de elevação no ponto nominal [m];

Q: é a vazão do sistema (m³/s);

Q_N: é a vazão nominal do sistema (m³/s).

Para calcular a altura total de elevação foram utilizadas as Equações 40, 41 e 42.

$$H = \left(\frac{P_3}{\rho \cdot g} - \frac{P_2}{\rho \cdot g} \right) + \frac{v_3^2 - v_2^2}{2 \cdot g} + Z_3 - Z_2 \quad (40)$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} \quad (41)$$

$$v_3 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_3^2} \quad (42)$$

Onde:

H - altura total de elevação [m];

p₃ / ρ.g - pressão no transdutor na saída da bomba [mca];

p₂ / ρ.g - pressão no transdutor na entrada da bomba [mca];

v₃ - velocidade média de escoamento na saída da bomba [m/s];

v₂ - velocidade média de escoamento na entrada da bomba [m/s];

D₂[m] - diâmetro interno na posição 2;

D₃[m] - diâmetro interno na posição 3.

Para calcular a potência hidráulica foi utilizada a Equação 43.

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (43)$$

Onde:

P_h - potência hidráulica [kW];

ρ - massa específica da água [kg/m³];

g - aceleração da gravidade [m/s²];

Q - vazão [m³/s];

H - altura total de elevação [m].

O valor da massa específica considerado: ρ=10³ [kg/m³].

O valor da aceleração da gravidade considerado: g = 9,81 [m/s²].

Na sequência, foi realizado um ensaio com as bombas operando em paralelo. Para retificar os valores calculados para a correção da rotação, utilizando a rotação nominal das bombas (3500 rpm), foram utilizadas as Equações 44, 45 e 46.

A vazão varia proporcionalmente com a velocidade:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (44)$$

A pressão varia proporcionalmente com o quadrado da velocidade:

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right) = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (45)$$

A potência varia proporcionalmente com o cubo da velocidade:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \quad (46)$$

Onde,

Q_2 – vazão corrigida [m³/h];

Q_1 – vazão medida no ensaio [m³/h];

H_2 – altura total de elevação corrigida [m];

H_1 – altura total de elevação medida no ensaio [m];

N_2 – rotação nominal da bomba [rpm];

N_1 – rotação medida no ensaio [rpm];

P_2 – potência corrigida [kW];

P_1 – potência medida no ensaio [kW].

Para calcular o rendimento da bomba, foi desenvolvida uma metodologia para relacionar o rendimento com a velocidade de rotação específica e que permitisse calcular o rendimento da bomba. Este rendimento do conjunto pode ser expresso pela Equação 47.

$$\eta_c = \frac{P_h}{P_{el}} \quad (47)$$

Onde:

η_c - rendimento do conjunto motor-bomba [%];

P_h - potência hidráulica [kW];

Pel - potência elétrica [kW].

Na quarta etapa, o consumo de energia em sistemas reais foi estabelecido por meio das faturas de energia e pelas medições em campo, utilizando-se o analisador de energia portátil que permite a medição, em tempo real, da tensão, corrente, potência, energia, entre outros.

Na quinta etapa foi calculada a quantidade de energia consumida pelo sistema. O cálculo da energia pode ser obtido pela Equação 48.

$$E = \text{Pot (i)} \times \Delta t \quad (48)$$

O consumo de energia (kWh/mês) indica o gasto de energia que foi dispendido para a operação do sistema ao longo de um mês. Esse indicador engloba as questões operacionais, em que se avalia o consumo de energia, mas não inclui questões administrativas, visto que o custo do kWh apresenta valores diferenciados ao longo do dia, ou seja, dois sistemas que tenham valores idênticos para esse indicador podem gastar valores distintos em função da tarifa contratada. O consumo específico (kWh/m³) demonstra a relação entre o consumo de energia e o volume bombeado. Esse indicador é bastante útil para avaliar a situação do sistema de bombeamento ao longo da sua vida útil.

Na sexta etapa, é aplicado a metodologia de Lenzi et al. (2013), em que é proposta uma nova definição da energia mínima necessária para operar uma rede de distribuição de água e um Indicador de Eficiência Energética (EEI). Essa metodologia é definida de forma mais geral, a fim de ser extensível e aplicável à maioria das redes de água em que uma ou mais bombas são incluídas. A energia mínima inevitável requerida (UME) é calculada em cada dispositivo e envolve a definição de uma altura manométrica (H_{ref}).

H_{ref} é a altura manométrica mínima a ser concedida na seção a jusante de cada bomba, a fim de satisfazer o nível determinado (ou seja, um valor mínimo de pressão) em toda a rede, durante todo o dia, considerando que não ocorram vazamentos. Assim sendo:

$$UME = \frac{\gamma * W * (H_{ref} - H_{ups})}{3600000} \quad (49)$$

Onde,

UME é a energia mínima inevitável requerida na bomba (kWh);

γ é a gravidade específica da água (N / m³);

W é o volume total elevado pela bomba (m³), durante o período considerado;

H_{ref} é a altura manométrica de referência definido acima (m) na seção própria da bomba;

H_{ups} é a altura manométrica média a montante na seção da bomba (m).

A relação entre a (UME) e a energia efetivamente consumida (E_{cons}) dá origem ao Indicador de Eficiência Energética (EEI):

$$EEI = \frac{UME}{E_{cons}} \quad (50)$$

O valor de E_{cons} é avaliado diariamente; portanto, além da energia efetivamente consumida pela bomba (E_{PC} como definido em Lenzi et al. (2013)), também é contabilizado o possível excesso (ou déficit) do volume de água armazenado no reservatório no final do dia. Diferentemente da energia de compensação definida em Cabrera et al. (2010), em que o excesso ou a deficiência de volume de água no reservatório no final do dia é contabilizado como uma energia potencial (ΔE_T), considera a energia efetivamente gasta pela bomba para elevar o volume de excesso ou déficit no reservatório.

$$E_{cons} = E_{PC} - \Delta E_T = E_{PC} - \frac{\gamma * A * (H_{fin} - H_{ini}) * H_P}{\eta * 3600000} \quad (51)$$

Onde,

E_{PC} é a energia consumida pela bomba, considerando sua eficiência eletromecânica (kWh);

A é a área da seção transversal do reservatório (m²);

H_{fin} e H_{ini} são as alturas manométricas no reservatório (m);

H_P e η são respectivamente a altura manométrica média da bomba e a eficiência média da bomba.

Na sétima etapa, foram utilizados dados de Andrade (2016), que determinou o valor das perdas de água do setor de estudo por meio do Método do Mínimo Noturno. O índice de perdas da IWA foi calculado para comparar os valores financeiros ocasionado pelas perdas de água.

Para calcular o consumo de energia elétrica do setor de estudo, utiliza-se a razão de proporcionalidade, na qual o setor de estudo é delimitado pelos números de ligações versus a média de habitantes por residência (ligação) a partir de dados do IBGE (2018). Com esse número de habitantes do setor de estudo, é possível calcular a porcentagem de participação do setor por meio do número total de habitantes da cidade de estudo fornecido pelo IBGE (2018).

$$VP \text{ (Valor proporcional)} = NL * NH / NTH \quad (52)$$

Onde,

VP: Valor proporcional do setor de estudo dentro da cidade de estudo através de valores de proporcionalidade de habitantes (%);

NL: Número de ligações do setor de estudo;

NH: Número médio de habitantes por residência (ligação) de acordo com dados do IBGE (2018).

NTH: Número total de habitantes de acordo com dados do IBGE (2018).

Por meio da porcentagem do setor e com dados de consumo de energia elétrica mensal dos setores de captação, estação de tratamento de água e da estação elevatória R3 fornecidos através de contas (SAAE) é possível calcular o consumo de energia elétrica mensal do setor de estudo.

$$CE = CAP * VPC + ETA * VPE + R3 * VPR \quad (53)$$

Sendo:

$$VPC = VOL_CAP / VOLMED_SETOR \quad (54)$$

$$VPE = VOL_ETA / VOLMED_SETOR \quad (55)$$

$$VPR = VOLT_R3 / VOLMED_SETOR \quad (56)$$

Onde,

CE: Consumo de energia elétrico do setor de estudo (kWh/mês);

CAP: Dado mensal do consumo de energia elétrica do setor de Captação (água captada dos rios e direcionada para a estação de tratamento de água);

ETA: Dado mensal do consumo de energia elétrica do setor de Estação de tratamento de água;

R3: Dado mensal do consumo de energia elétrica do setor de Estação elevatória R3;

VPC: Valor proporcional do setor de estudo referente a captação;

VPE: Valor proporcional do setor de estudo referente a estação de tratamento de água (ETA);

VPR: Valor proporcional do setor de estudo referente a estação elevatória R3.

Baseado nos dados mensais dos volumes em m³ de água dos setores de captação e estação de tratamento de água fornecidos pelo SAAE e nos dados de medição média diária do volume bombeado pela estação elevatória R3 (normalizado para média mensal) é possível correlacionar a porcentagem de participação de consumo do setor de estudo por meio da seguinte Equação:

$$VOL_R3 = VOLMED_SETOR / VOL_MED \quad (57)$$

Onde,

VOL_R3: Valor proporcional do setor de estudo dentro do volume de água bombeado pela estação elevatória R3 (%);

VOLMED_SETOR: Dados de medição média diária do volume consumido pelo setor de estudo (m³) (normalizado para média mensal);

VOL_MED: Dados de medição média diária do volume bombeado (m³) pela estação elevatória R3 (normalizado para média mensal) que chega ao reservatório R4 pelos conjuntos motor-bombas 1 e 2;

O cálculo do indicador para encontrar o consumo elétrico na produção e distribuição de água potável de um SAAE (IT), pode ser descrito como:

$$INDICADOR\ TOTAL\ (IT) = IR3 + ICAP + IETA; \text{ (kWh/m}^3\text{)} \quad (58)$$

Sendo:

$$\text{IR3 (INDICADOR DE CONSUMO DE R3)} = \text{R3} / \text{VOLT_R3}; (\text{kWh/m}^3) \quad (59)$$

$$\text{ICAP (INDICADOR DE CONSUMO CAPTAÇÃO)} = \text{CAP} / \text{VOL_CAP}; (\text{kWh/m}^3) \quad (60)$$

$$\text{IETA (INDICADOR DE CONSUMO ETA)} = \text{ETA} / \text{VOL_ETA}; (\text{kWh/m}^3) \quad (61)$$

Onde:

IR3: indicador do consumo elétrico na estação elevatória de água R3;

ICAP: indicador do consumo elétrico na captação;

IETA: indicador do consumo elétrico na estação de tratamento de água;

VOLT_R3: volume total de água bombeada pelos dois conjuntos de R3;

VOL_CAP: volume total de água captada;

VOL_ETA: volume total de água tratada.

Para computar o volume de água perdida no sistema de estudo deve-se calcular o índice de perdas da IWA, conforme item 3.7 da revisão bibliográfica do presente trabalho. Como a perda de água pode ser relacionada diretamente com a perda de energia elétrica, pode-se calcular a perda de energia elétrica por meio da seguinte Equação:

$$\text{P_EN} = \text{CE} * \text{I} \quad (61)$$

Onde,

P_EN: é a perda de energia elétrica relacionada a perdas de água do setor de estudo (kWh/mês);

CE: Consumo de energia elétrica do setor de estudo (kWh/mês);

I: Índice de perdas (%);

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Parâmetros hidráulicos

A figura 12 apresenta a curva de consumo médio do setor de interesse durante o período da coleta de dados.

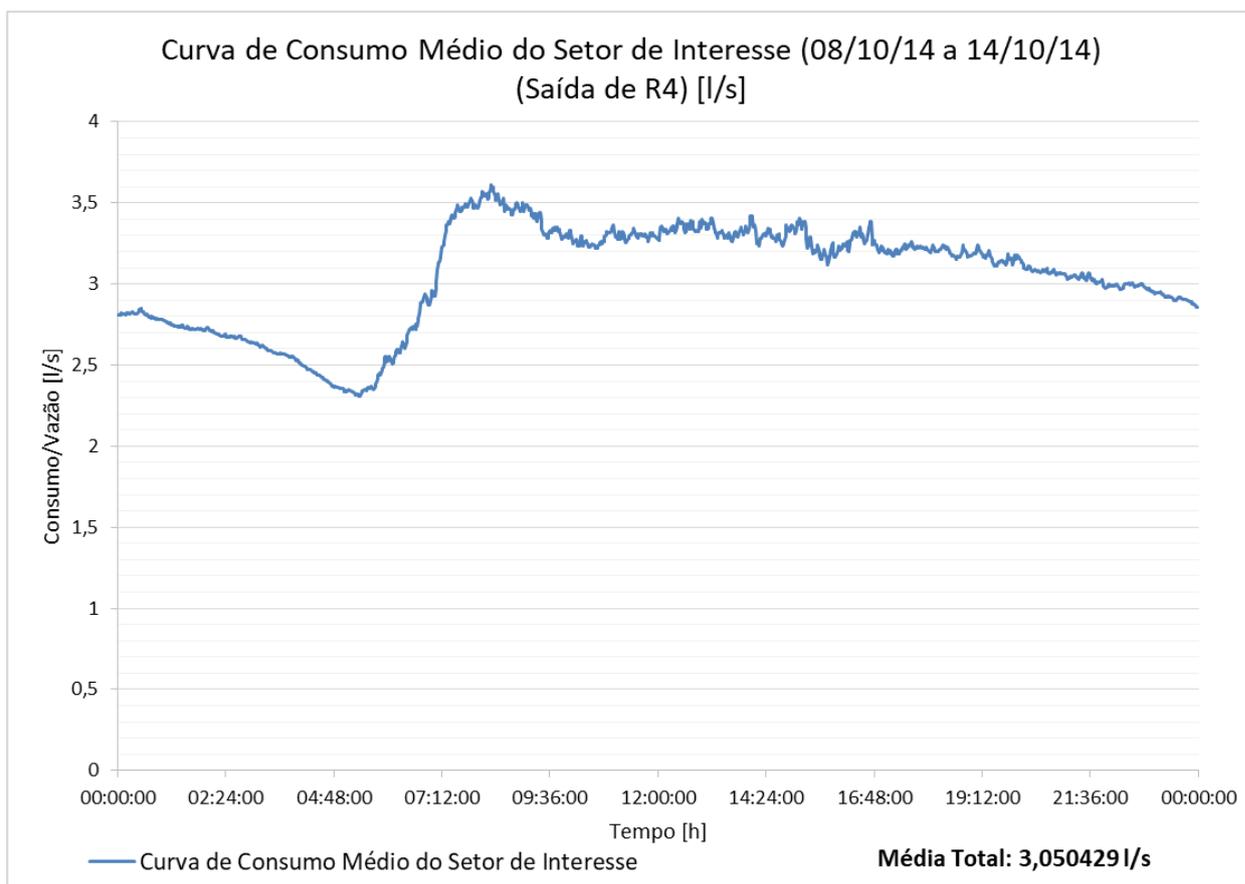


Figura 12. Curva de consumo.

Fonte: O autor.

A Tabela 13 apresenta os dados sobre o consumo do setor de interesse.

Tabela 13. Consumo do setor.

Média Total:	3,050429	l/s
Consumo médio máximo:	3,612286	l/s
Consumo médio mínimo:	2,308143	l/s

Fonte: O autor.

A curva de consumo médio do setor de estudo apresenta crescimento do consumo a partir das 7 horas da manhã e pico de consumo às 08:18 horas da manhã com consumo médio máximo de 3,612286 l/s ou aproximadamente 13,00 m³/h. O intervalo de tempo de menor consumo começa às 03:00h e vai até às 06:00 horas da manhã. O consumo médio total do setor de interesse foi de 263,55707 m³/dia. Cabe enfatizar que, em geral, os sistemas de bombeamento não são projetados para atender a totalidade da população de um município. Usualmente, os sistemas são divididos em setores de abastecimento, definidos a partir do conhecimento das condições topográficas e do perfil dos consumidores da área a ser atendida.

O setor de estudo possui 413 ligações. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) constatou que, entre os censos de 2000 e 2010, diminuiu o número de pessoas que moram no mesmo domicílio. No referido período, o número médio de pessoas em cada residência passou de 3,79 para 3,34. Embora a população tenha crescido, o Instituto destaca que o número de domicílios no Brasil aumentou. Sendo assim, para este estudo foram considerados 4 pessoas por ligação (casa/família), ou seja, 1652 consumidores de água do setor de estudo.

Como o consumo médio de água do setor de estudo foi de aproximadamente 263,557 m³/dia, resultando em 0,159538 m³/dia/habitante, ou aproximadamente 160 litros/dia/habitante. O padrão de consumo de água por pessoa, preconizado pela Organização das Nações Unidas (ONU) é de 110 litros por dia. Esse indicador *per capita* é a quantidade de água suficiente para atender às necessidades básicas diárias de uma pessoa. A média nacional é de 154 litros diários por habitante. Portanto, pode-se afirmar que o consumo médio de água per capita do setor de estudo está um pouco acima dos valores mencionados.

A Tabela 14 apresenta os dados sobre a vazão bombeada do Conjunto B1.

Tabela 14. Vazão.

Conjunto Motor-Bomba B1 – 150mm – Vazão Média bombeada entre os dias 08 a 14/10/2014
Vazão Média Total Bombeada para R4: 511,6250 m³/dia

Fonte: O autor.

A Tabela 15 apresenta os dados sobre a vazão bombeada do Conjunto B2.

Tabela 15. Vazão bombeada B2.

Conjunto Motor-Bomba B2 – 100mm – Vazão Média bombeada entre os dias 08 a 14/10/2014	
Vazão Média Total:	399,85174 m ³ /dia
Vazão Média que abastece o setor de não interesse:	154,68707 m ³ /dia
Vazão Média que chega em R4:	245,16467 m ³ /dia

Fonte: O autor.

Alguns bairros como Água Branca e Bela Vista, além da Rua Miguel Lousada, não estão no setor de estudo, mas consomem parte da água, sendo necessário calcular o consumo proporcional relativo ao setor.

A Tabela 16 apresenta os dados sobre a vazão consumida por parte do setor.

Tabela 16. Vazão consumida.

	Q - Vazão (m³/dia)	Nº de Ligações	Nº de Pessoas Estimado
<i>Água Branca</i>	33,61433	64	256
<i>Bela Vista</i>	9,646667	28	112
<i>Rua Miguel Lousada</i>	2,170333	6	24
Total	45,43133	98	392

Fonte: O autor.

Pela Figura 13, pode-se notar que o sábado foi quando o sistema apresentou a maior vazão bombeada, exigindo mais do sistema pelo alto consumo nos finais de semana.

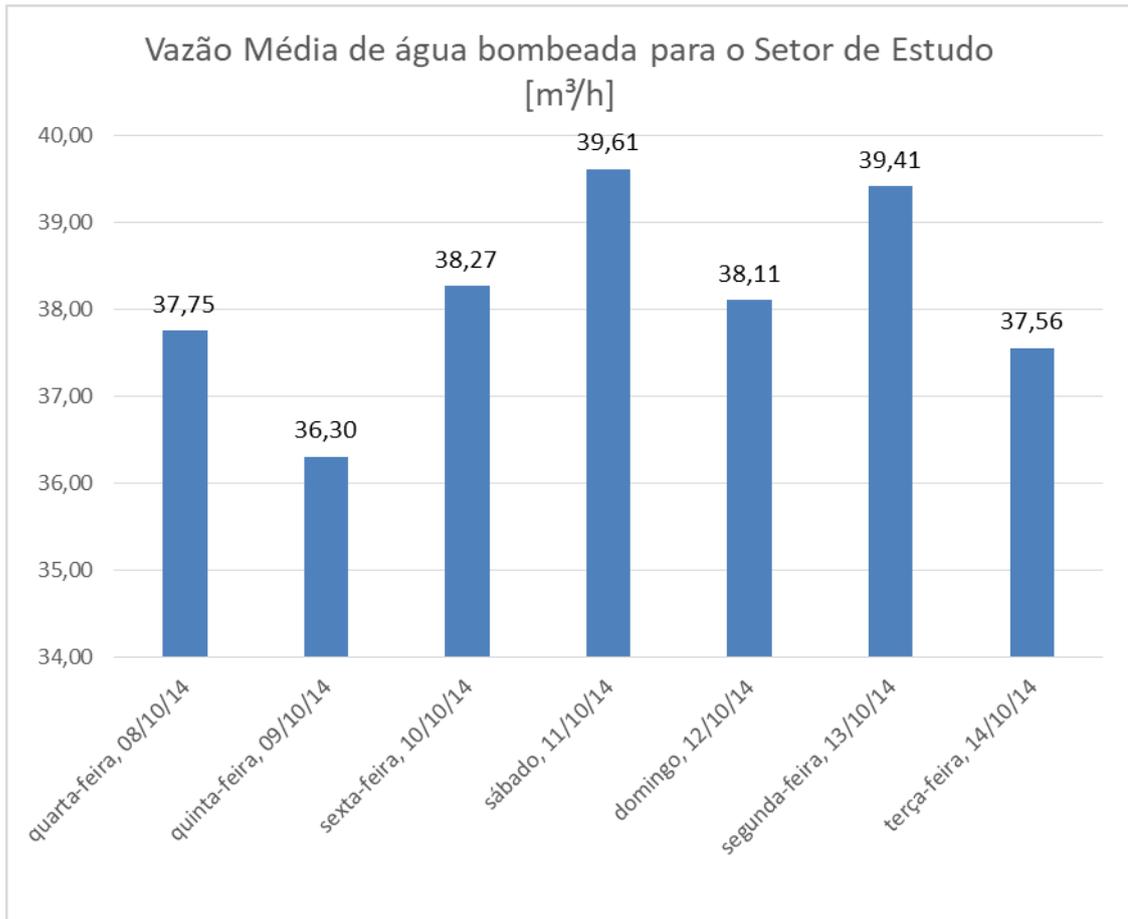


Figura 13. Vazão média bombeada.

Fonte: O autor.

Pela Figura 14, pode-se notar a vazão bombeada dos dois sistemas no dia 08/10/14.

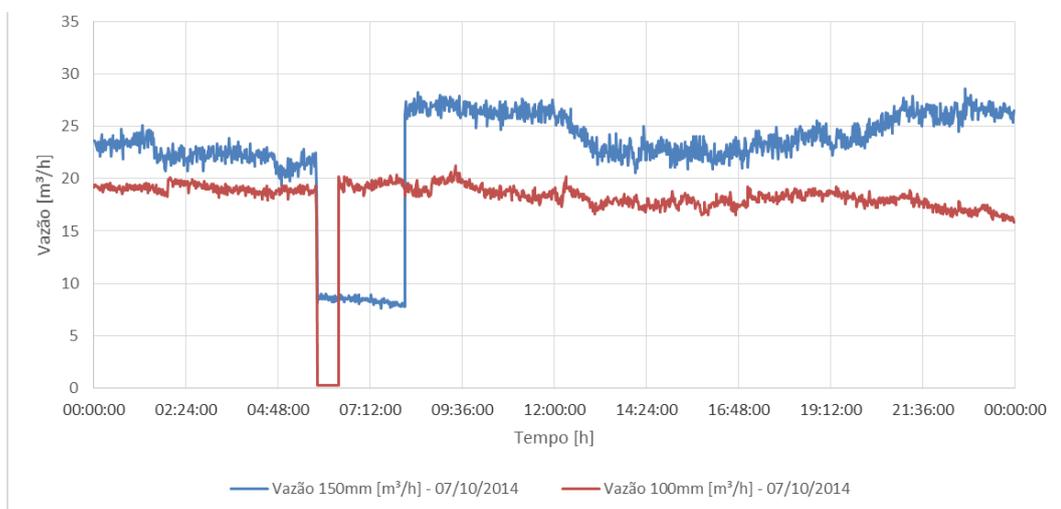


Figura 14. Vazão dos conjuntos B1 (150mm) e B2 (100mm).

Fonte: O autor.

A Figura 15 apresenta os dados de pressão, vazão e velocidade do conjunto B1 no dia 08/10/14.

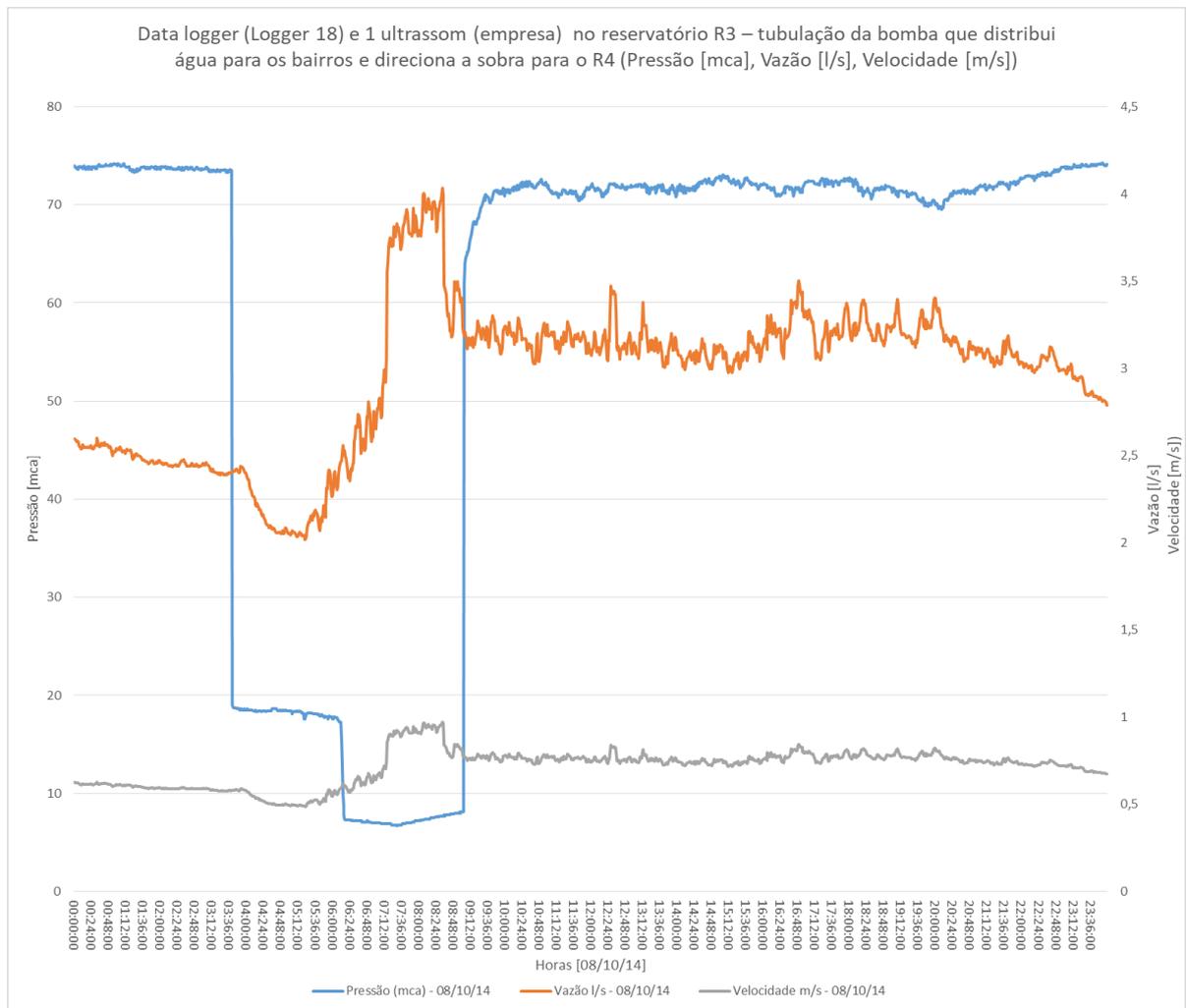


Figura 15. Pressão x vazão.

Fonte: O autor.

A Figura 16 apresenta os dados de pressão, vazão e velocidade do conjunto B2 ao chegar em R4 no dia 08/10/14.

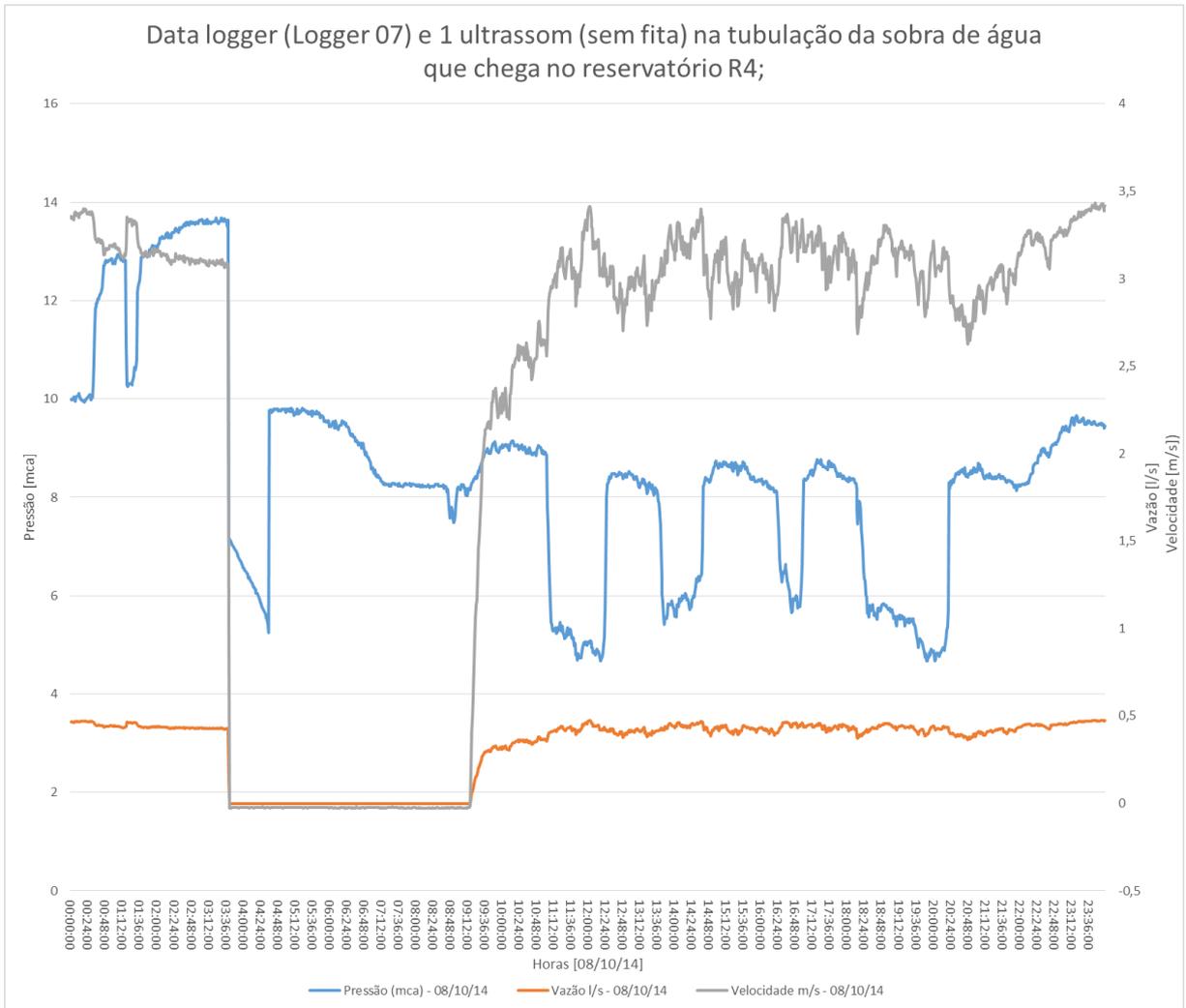


Figura 16. Pressão x vazão.

Fonte: O autor.

A Figura 17 apresenta os dados de pressão, vazão e velocidade da saída do reservatório R4 para o setor de estudo no dia 08/10/14.

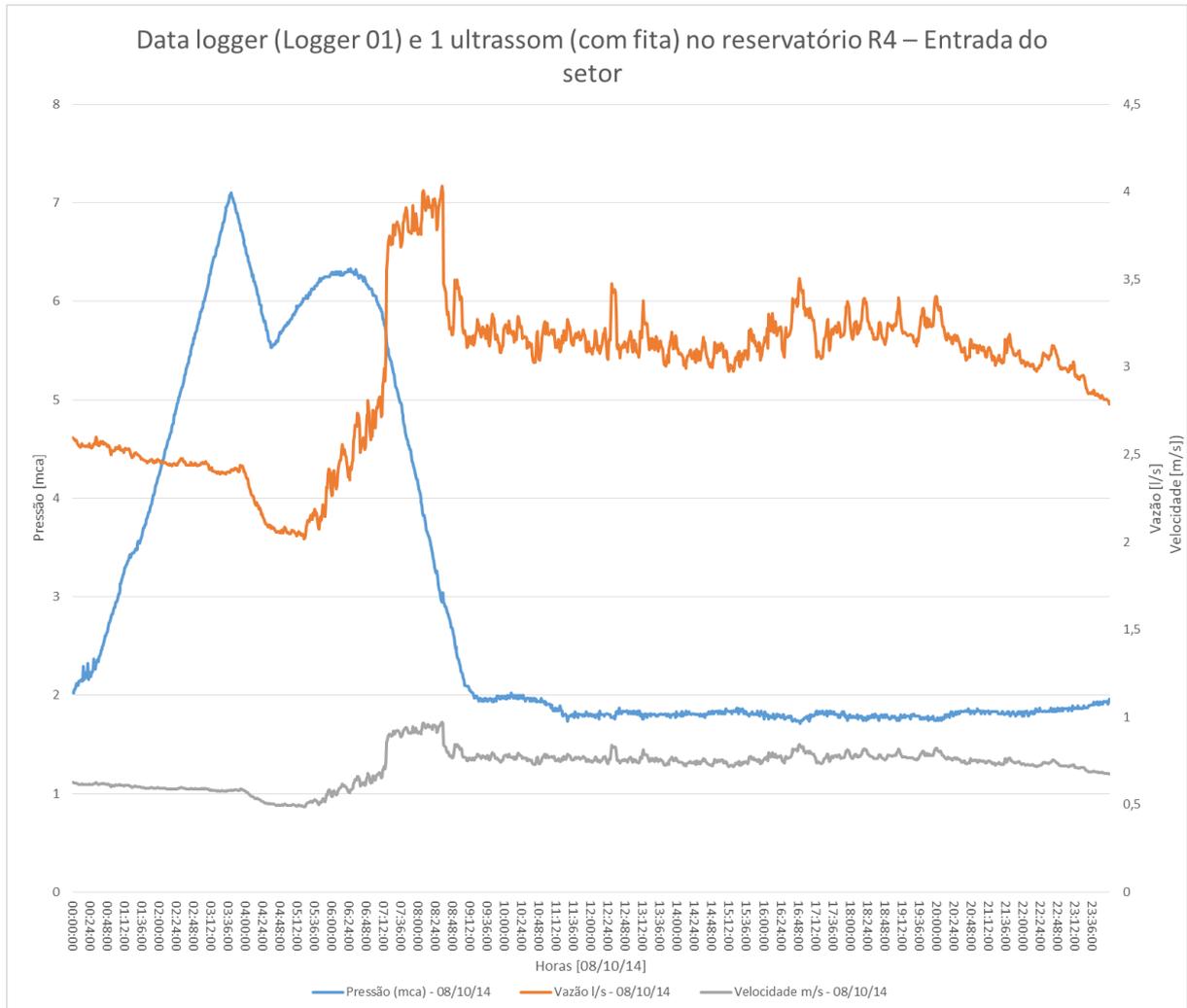


Figura 17. Pressão x vazão x velocidade.

Fonte: O autor.

Para os conjuntos motor-bomba B1 e B2 operando isoladamente, foi possível gerar a curva de operação por meio da Equação 47. Com isto, os pontos de operação dos dois conjuntos foram obtidos.

$$H_{1S} = 42 + 0,008726*Q^2$$

$$H_{1B} = 63,12 - 0,00627*Q^2$$

$$H_{2S} = 42 + 0,049906*Q^2$$

$$H_{2B} = 69,16 - 0,00327*Q^2$$

A Figura 18 apresenta a curva característica do Conjunto motor-bomba 1 (Legenda: Laranja: Curva da Bomba 1, Azul: Curva do Sistema 1).

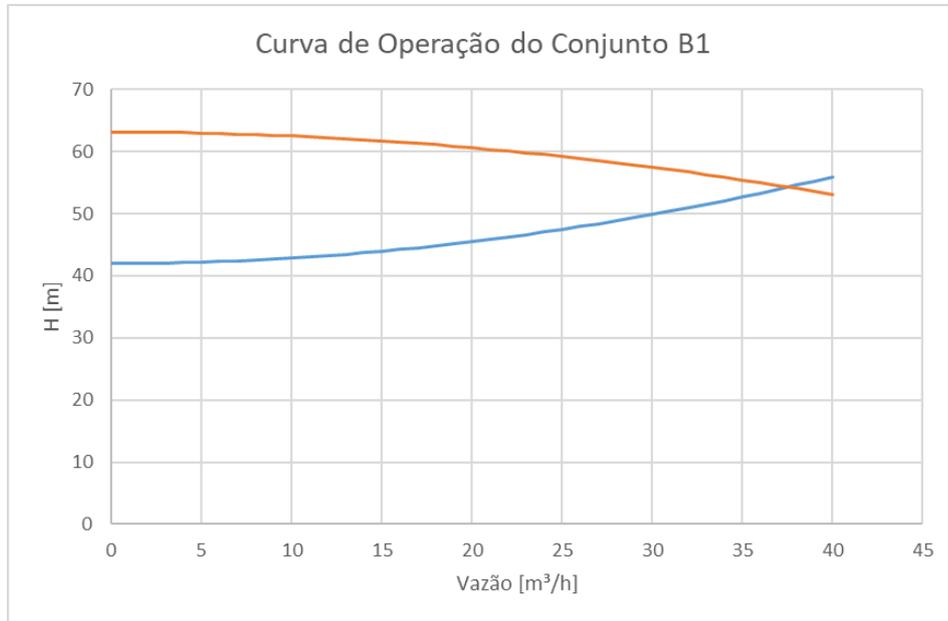


Figura 18. Curva de operação B1.

Fonte: O autor.

A Figura 19 apresenta a curva característica do Conjunto motor-bomba 2 (Legenda: Laranja: Curva da Bomba 2, Azul: Curva do Sistema 2).

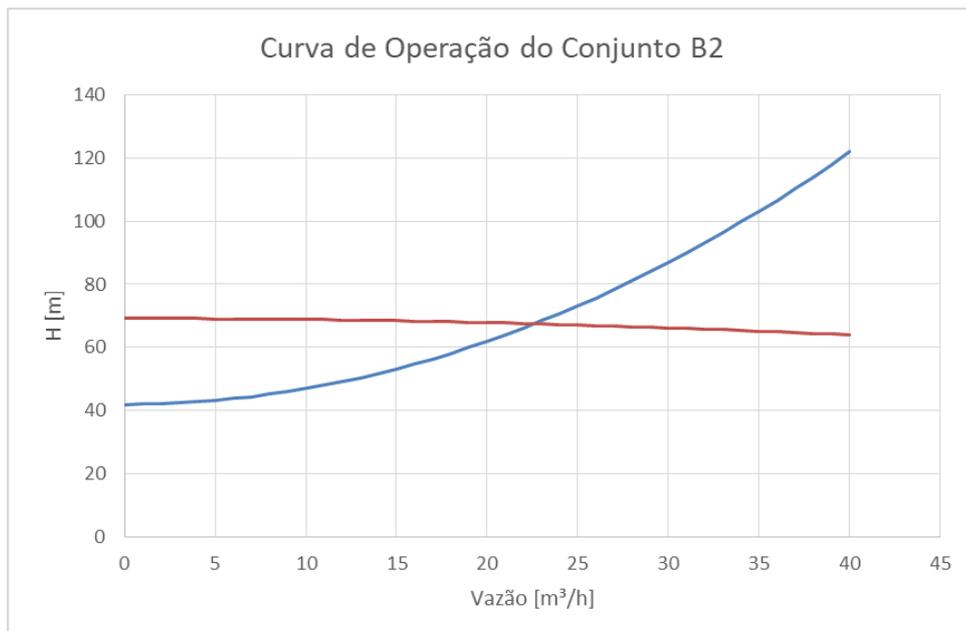


Figura 19. Curva de operação B2.

Fonte: O autor.

O SAAE não possuía a informação do diâmetro do rotor das bombas. O fabricante por meio do número de OP, fixado na placa da bomba, disponibilizou as informações do teste de laboratório das bombas fornecidas. A Tabela 17 apresenta os dados principais de cada bomba.

Tabela 17. Dados fornecidos pelo fabricante.

Bomba ETA 50-20 – Diâmetro do rotor - 196 mm

n [rpm]	Q [m³/h]	H [m]	η_t [%]	Pe [kW]	NPSH_r [m]
3500	40	72	65	16,4	4

Fonte: Fabricante.

Na Tabela 36 do Anexo II, as alturas manométricas dos conjuntos B1 e B2, na operação isolada, se apresentam inferiores à bomba original testada em laboratório. O conjunto B1 opera com 18,7m abaixo, enquanto que o conjunto B1, atua com 6,8m, também abaixo.

Os rendimentos operam muito abaixo da bomba original. O conjunto B1 com 27% a menos e o conjunto B2 com 18%. Com isso, fica evidente que a manutenção das bombas tem sido ineficiente. As pressões insuficientes, se comparadas à bomba original, caracterizam que internamente as bombas estão com problemas, ou seja, os anéis de desgaste necessitam ser substituídos e o rotor de cada bomba pode estar danificado ou desgastado, necessitando de uma manutenção corretiva ou até mesmo de uma substituição.

O comportamento das pressões e da vazão bombeada no Conjunto B1 (Figura 20) não apresentaram comportamento divergente, pois a pressão em função da vazão tem comportamento inversamente proporcional, ou seja, o aumento de vazão é acompanhado da diminuição da pressão. Entretanto, no Conjunto B2 houve maior queda da pressão no período da madrugada.

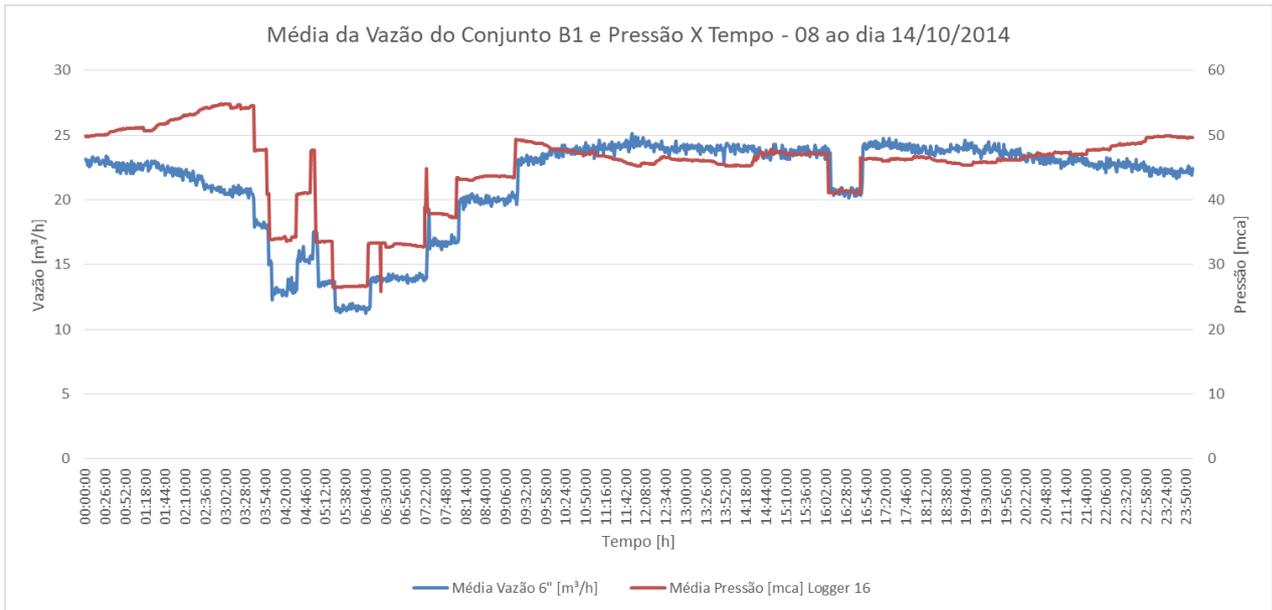


Figura 20. Vazão média B1.

Fonte: O autor.

A Figura 21 mostra a vazão média bombeada pelo conjunto B2 e a sobra de vazão que abastece R4.

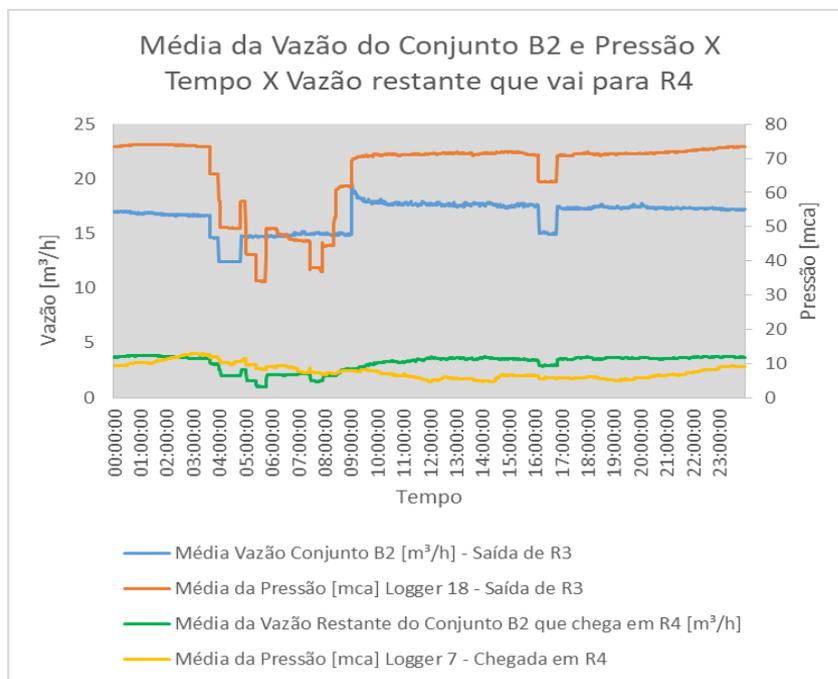


Figura 21. Vazão média B2.

Fonte: O autor.

O volume máximo de armazenamento do reservatório retangular é de 69,60m³. Na Figura 22, é possível notar que nos dias analisados, o nível de água deste reservatório se manteve maior nos períodos das 22:00h às 07:00h devido ao menor consumo de água da população durante a madrugada. Com a demonstração do nível deste reservatório, pode-se concluir que os conjuntos motor-bombas B1 e B2 operam nos horários de pico, podendo acarretar em um futuro acréscimo das contas de energia, caso a empresa opte pelo novo sistema de tarifação vigente.

O nível médio do reservatório retangular ao longo do dia é de 79,40%, representando uma média de 55,26m³ de água reservada. Este valor demonstra um excesso de água bombeada ao longo do dia, sendo que, na maior parte do tempo, o nível do reservatório retangular ficou acima de 70%. No dia 09/10/2014, constatou um período de reserva próximo de 20%. Tal valor se distancia da média dos dias analisados e pode ser decorrente de algum erro de coleta de dados. O nível de água reservado tem relação direta com as pressões dos nós no setor de estudo e será demonstrado ao longo desta discussão.

Este reservatório é interligado com o reservatório cilíndrico e apenas começa encher após completar o reservatório retangular. Como pode ser identificado na figura 23, o reservatório cilíndrico somente aproxima-se do seu maior nível entre as 02:00h às 07:00h, demonstrando que os conjuntos motor-bombas B1 e B2 são ativos quase o dia inteiro, desligando ou operando em vazio, apenas neste intervalo de tempo.

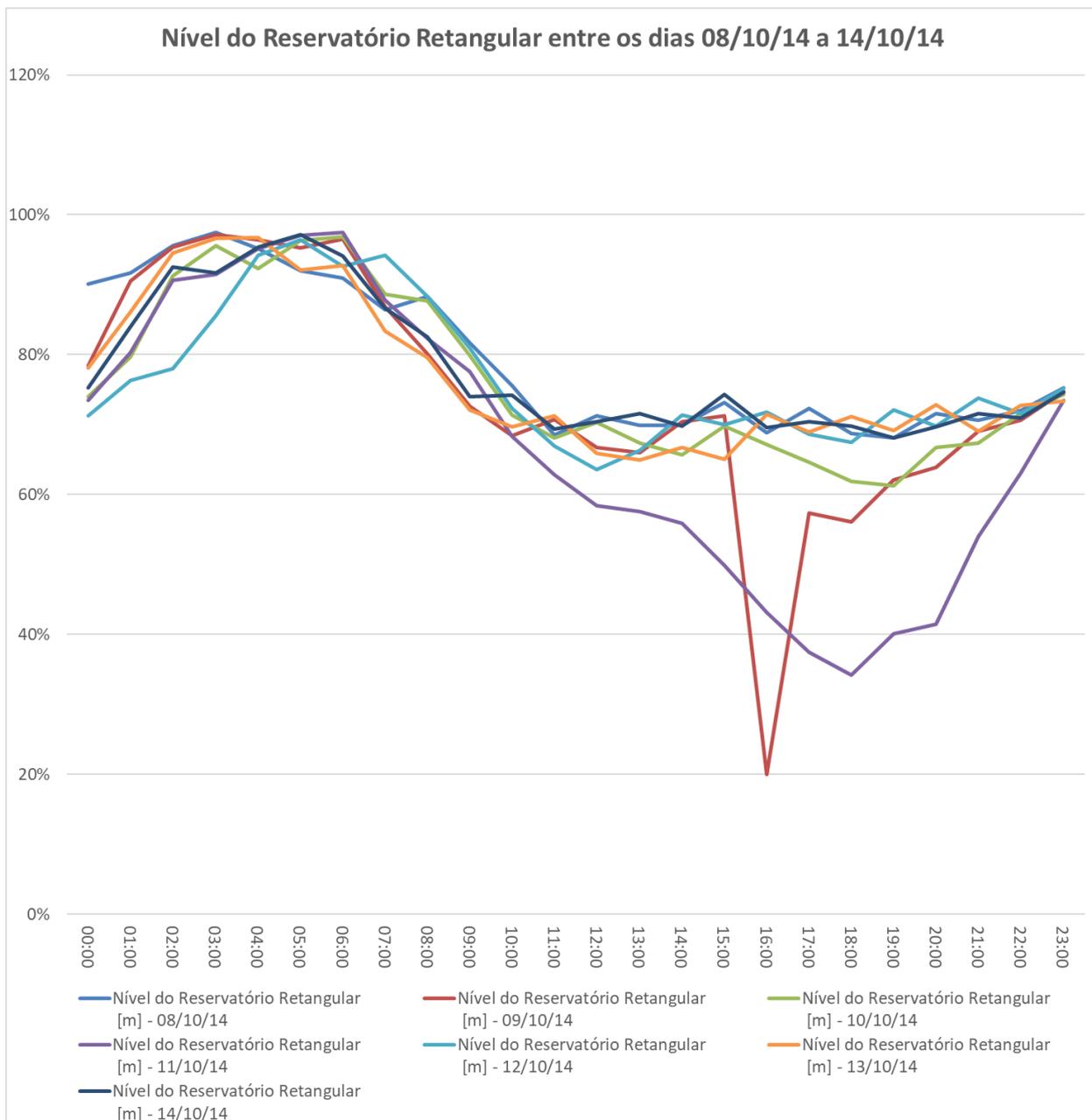


Figura 22. Nível do reservatório retangular R4 nos dias de medições.

Fonte: O autor.

O volume máximo de armazenamento do reservatório cilíndrico é de 47,61m³. Ao analisar a Figura 23 é possível notar que entre os dias analisados o nível de água deste reservatório manteve-se maior no período das 02:00h às 07:00h. Isso deve-se ao menor consumo de água da população na madrugada e ao enchimento do reservatório retangular.

O nível médio do reservatório cilíndrico ao longo do dia é de aproximadamente 27,80%, representando uma média de 13,24m³ de água reservada. No maior período do dia, entre 08:00h

às 01:00h, o nível do reservatório retangular ficou abaixo de 20% e de 10:00h até às 15:00h, o volume reservado chegou próximo de 0m³. Ao longo de todos os dias analisados, pode-se notar que o comportamento de abastecimento do reservatório cilíndrico se manteve de forma semelhante.

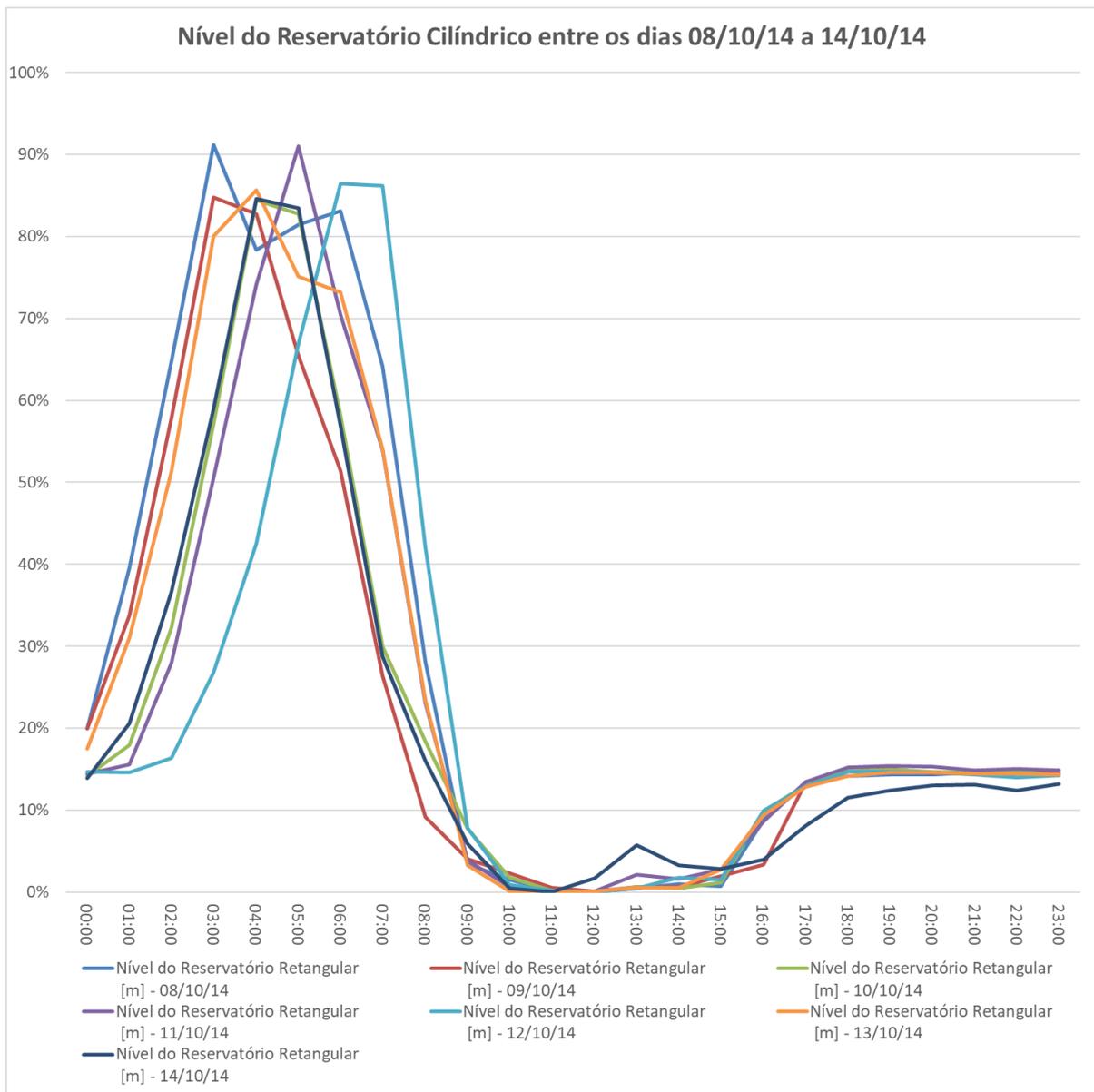


Figura 23. Nível do reservatório cilíndrico R4 nos dias de medições.

Fonte: O autor.

Ao analisar a Figura 24, pode-se observar o comportamento da pressão no nó 96 em relação à reserva de água dos reservatórios cilíndrico e retangular. É possível notar que no dia

08/10/14 os maiores valores de pressão acontecem no período da madrugada, período em que o volume dos reservatórios atinge valor próximo de 120m³ de água e o consumo da população é mínimo. O comportamento da pressão vai se alterando com o volume de água dos reservatórios que abastecem o setor de estudo e a relação do consumo de água da população. Após o período da madrugada, a pressão média do nó 96 é de aproximadamente 15 mca.

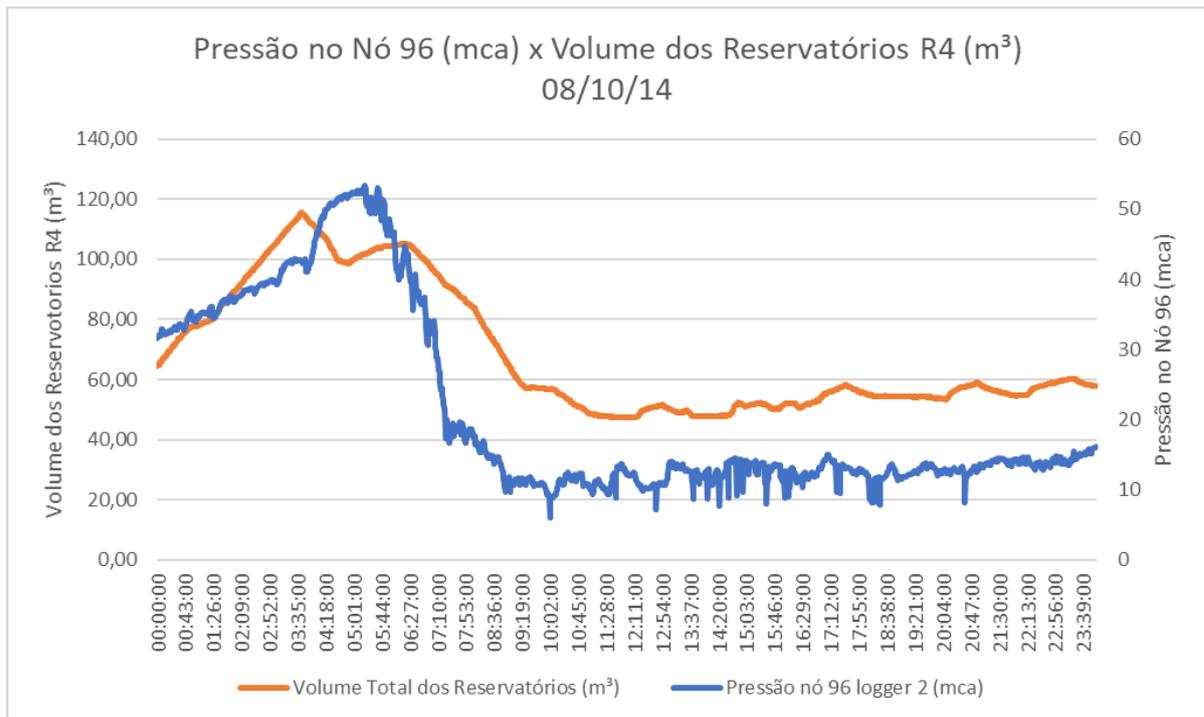


Figura 24. Pressão no nó 96 versus volume dos reservatórios R4 no dia 08/10/14.

Fonte: O autor.

Na Figura 25, pode-se observar o mesmo comportamento da pressão do nó 96 em relação à reserva de água dos reservatórios cilíndrico e retangular. No dia 10/10/2014, é possível notar que existem valores de pressão negativos e isso pode ter ocorrido devido ao alto consumo de todos os nós no período e ao fato de este nó (146) está em uma região mais alta do setor de estudo, necessitando de um booster para evitar falta de água para o consumidor ao longo do dia.

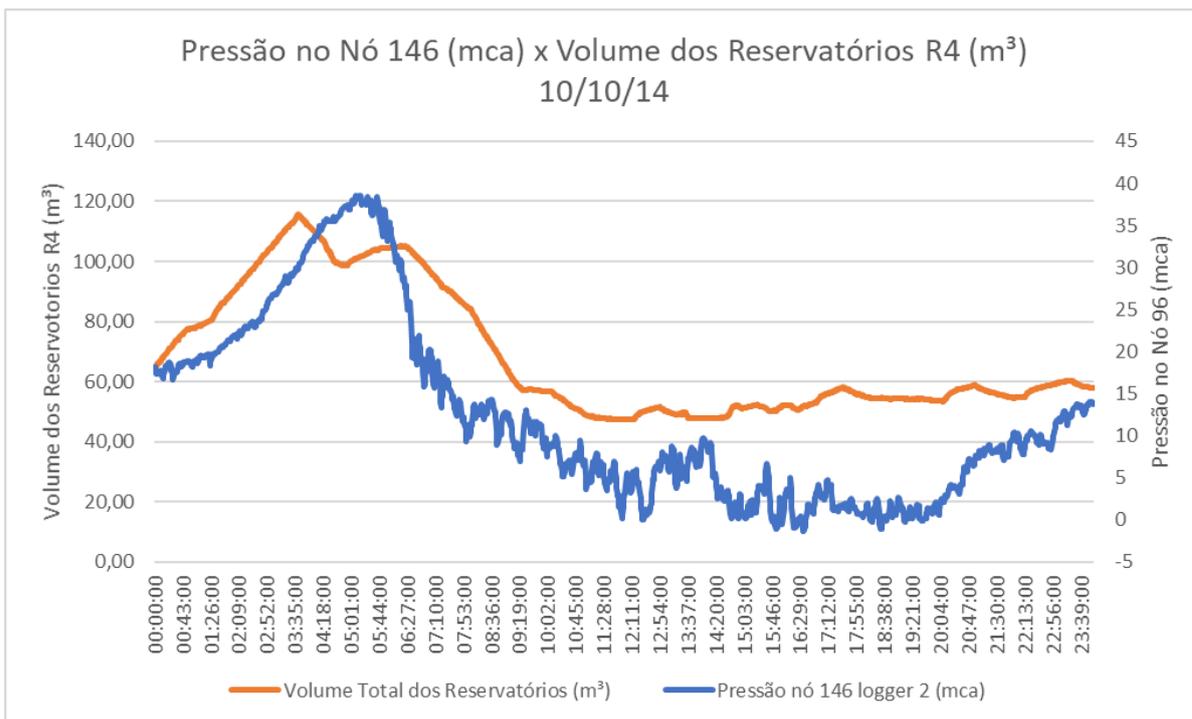


Figura 25. Pressão no nó 146 versus volume dos reservatórios R4 no dia 10/10/14.

Fonte: O autor.

A pressão manométrica no nó 150 variou muito ao longo do dia 12/10/14, tendo em grande parte do tempo pressão próxima de 0 mca, mesmo com os reservatórios acima da metade de sua capacidade. De acordo com a NBR 12.218 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), é recomendado que a pressão de abastecimento se mantenha dentro dos limites de 10 a 50 mca. Dessa forma, observa-se que este nó apresenta característica que foge do recomendado pela NBR 12.218.

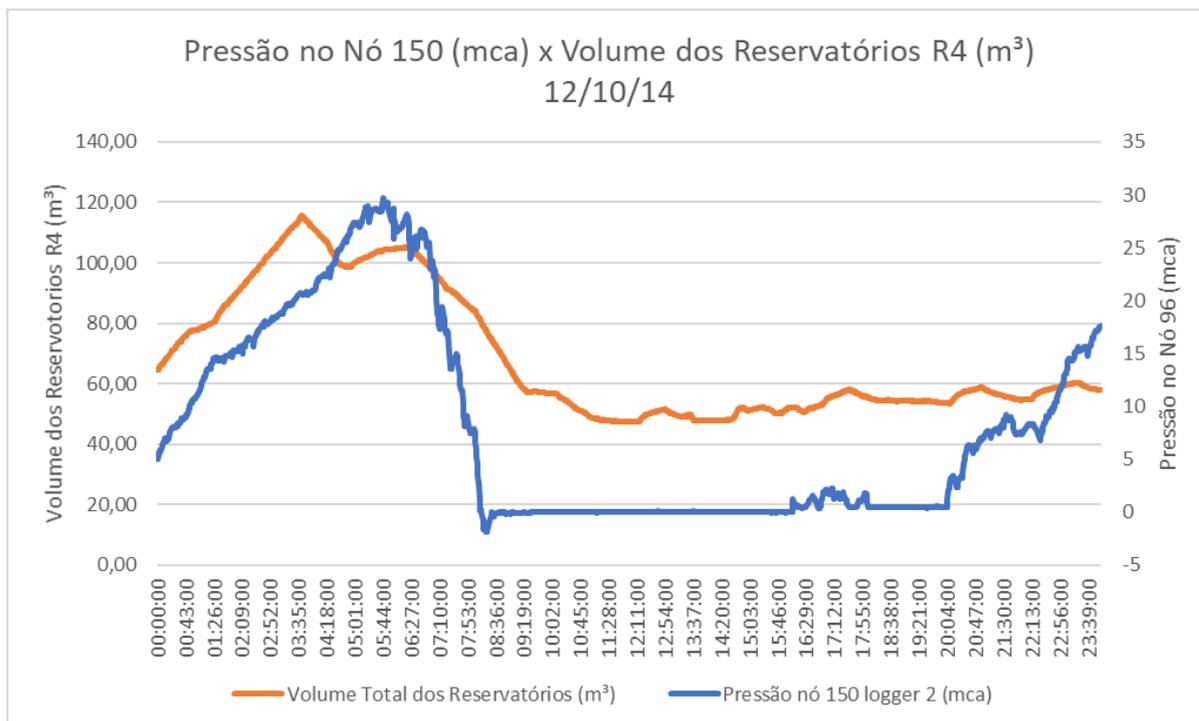


Figura 26. Pressão no nó 150 versus volume dos reservatórios R4 no dia 12/10/14.

Fonte: O autor.

A pressão do nó 154 no dia 09/10/14 somente em poucas horas do dia teve a mínima aceitável. É possível notar valores de pressões negativas, proveniente do alto consumo das outras ligações e da falta de pressão na rede durante o tempo observado. Os maiores valores de pressão acontecem no período da madrugada, horário em que o volume dos reservatórios atinge valor próximo de 120m³ de água e o consumo da população é mínimo. O comportamento da pressão vai se alterando com o volume de água dos reservatórios que abastecem o setor de estudo e com a relação do consumo de água da população, tornando-se muito baixo após as 06:30h.

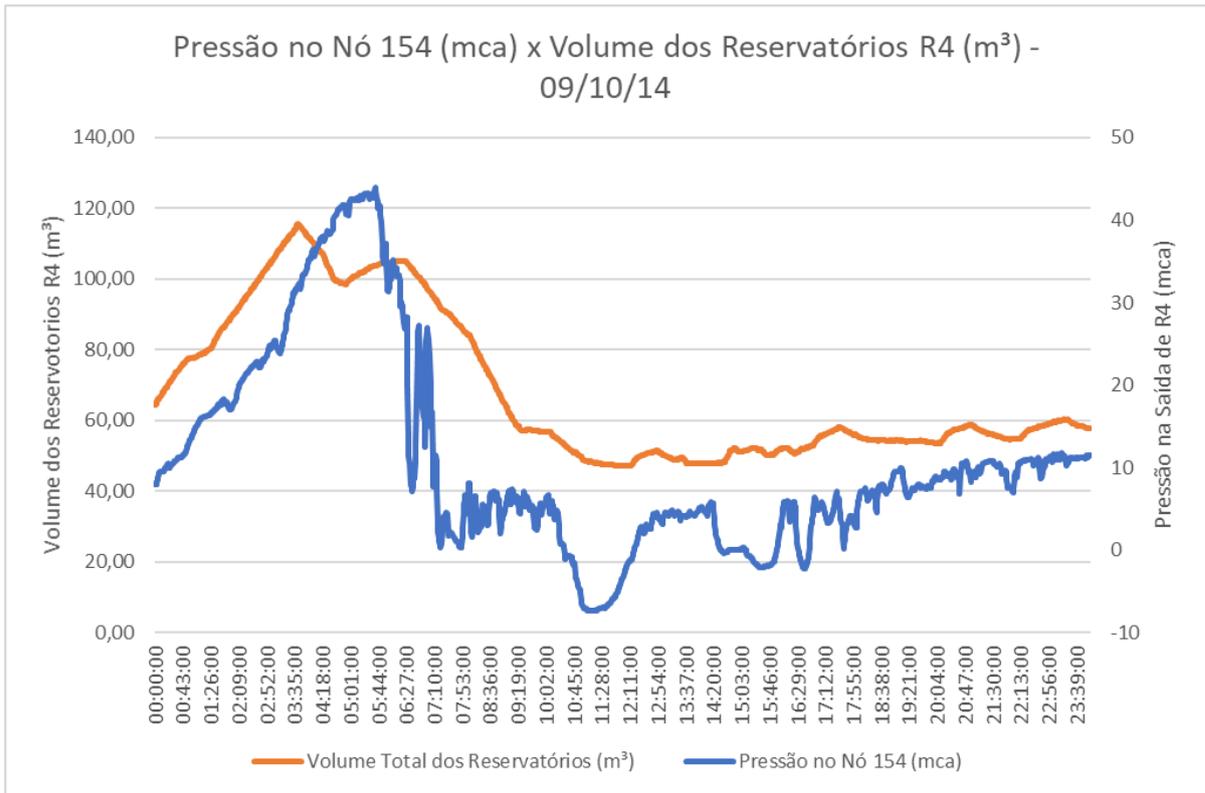


Figura 27. Pressão no nó 154 versus volume dos reservatórios R4 no dia 09/10/14.

Fonte: O autor.

Ao comparar o volume dos reservatórios e a vazão na saída dos reservatórios R4 com a pressão do nó 154 é possível ver que quanto maior a vazão na tubulação maior a pressão exercida nos nós.

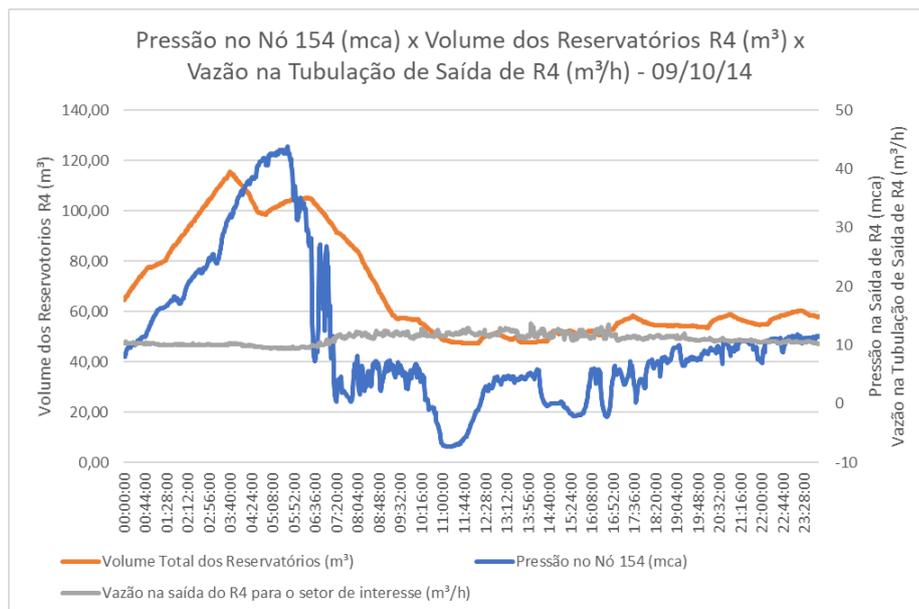


Figura 28. Pressão no nó 154 versus volume dos reservatórios R4 no dia 09/10/14.

Fonte: O autor.

Na saída do reservatório R4 para o setor de interesse foram medidos dados de pressão, resultando em um comportamento bem proporcional, com a pressão aumentando à medida que o volume do reservatório aumentava e o fluxo de consumo de água pelos consumidores diminua.

As Figuras 29 e 30 apresentam a pressão na saída de R4 relacionada ao volume dos reservatórios R4 com a vazão na tubulação de saída de R4 (entrada do setor) no dia 13/10/14.

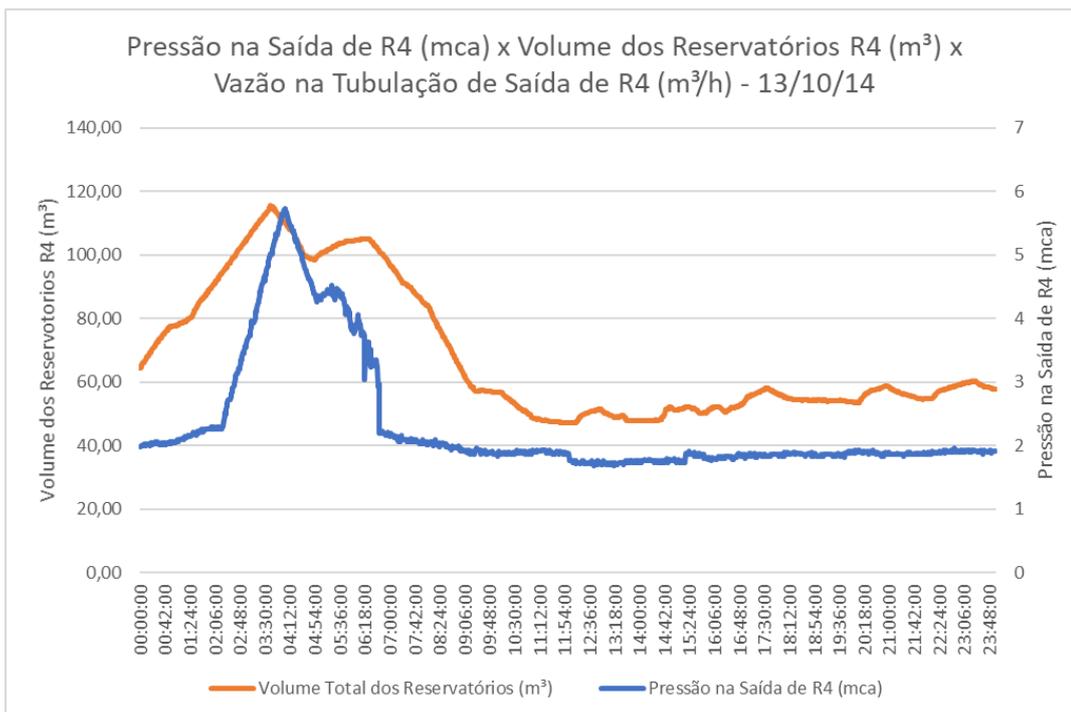


Figura 29. Pressão na saída de R4 versus volume dos reservatórios R4 versus a vazão na tubulação de saída de R4 (entrada do setor) no dia 13/10/14.

Fonte: O autor.

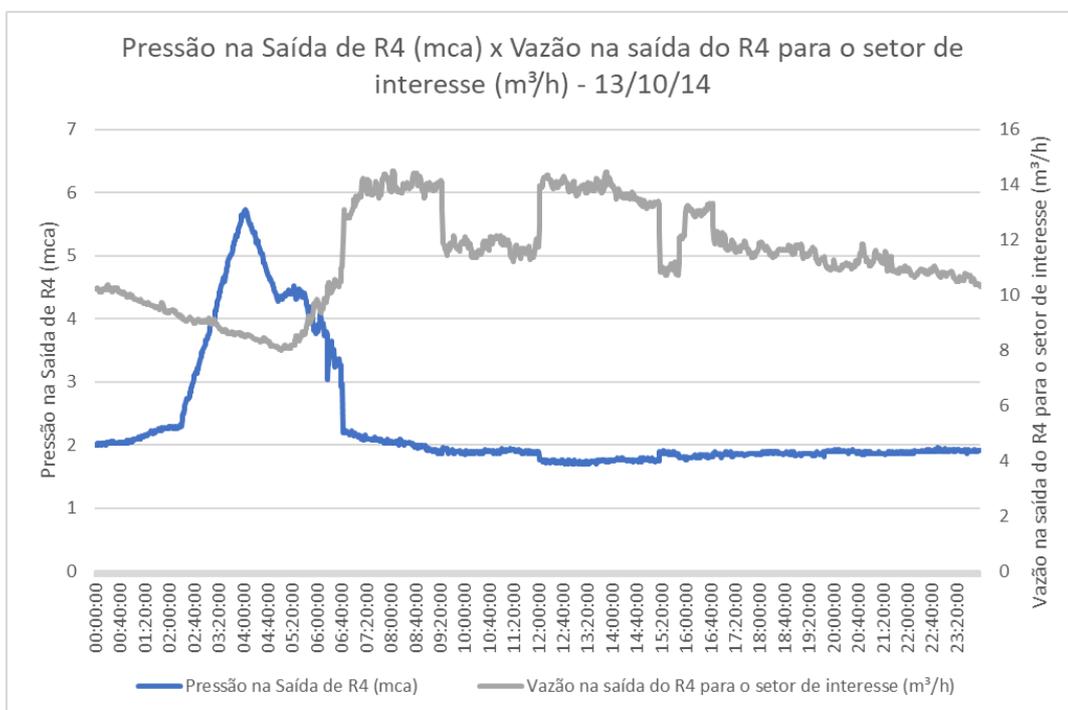


Figura 30. Pressão na saída de R4 versus a vazão na tubulação de saída de R4 (entrada do setor) no dia 13/10/14.

Fonte: O autor.

A vazão é uma consequência da diferença de pressão. A vazão é a razão entre um determinado volume e uma unidade de tempo, ou seja, é o volume dividido pelo tempo. A pressão é a força aplicada à parede de um volume de controle, ou seja, é a força por unidade de área.

O aumento da vazão, não necessariamente aumentará a pressão, entretanto ao aumentar a pressão, entretanto, ao aumentar a pressão na entrada e a pressão na saída permanecer constante, a vazão aumentará, pois o que causa a vazão é a diferença de pressão.

Ao medir a pressão que o fluido exerce sobre as paredes de um tubo, a pressão variará dependendo da velocidade com que o fluido escoar. Sendo assim, quanto maior a velocidade com que o fluido escoar, menor será a pressão sobre a parede do tubo.

Pode-se observar na Figura 31, a variação da pressão da tubulação de saída do conjunto motor-bomba B1 em relação à vazão bombeada pelo mesmo conjunto ao longo do dia 14/10/2014.

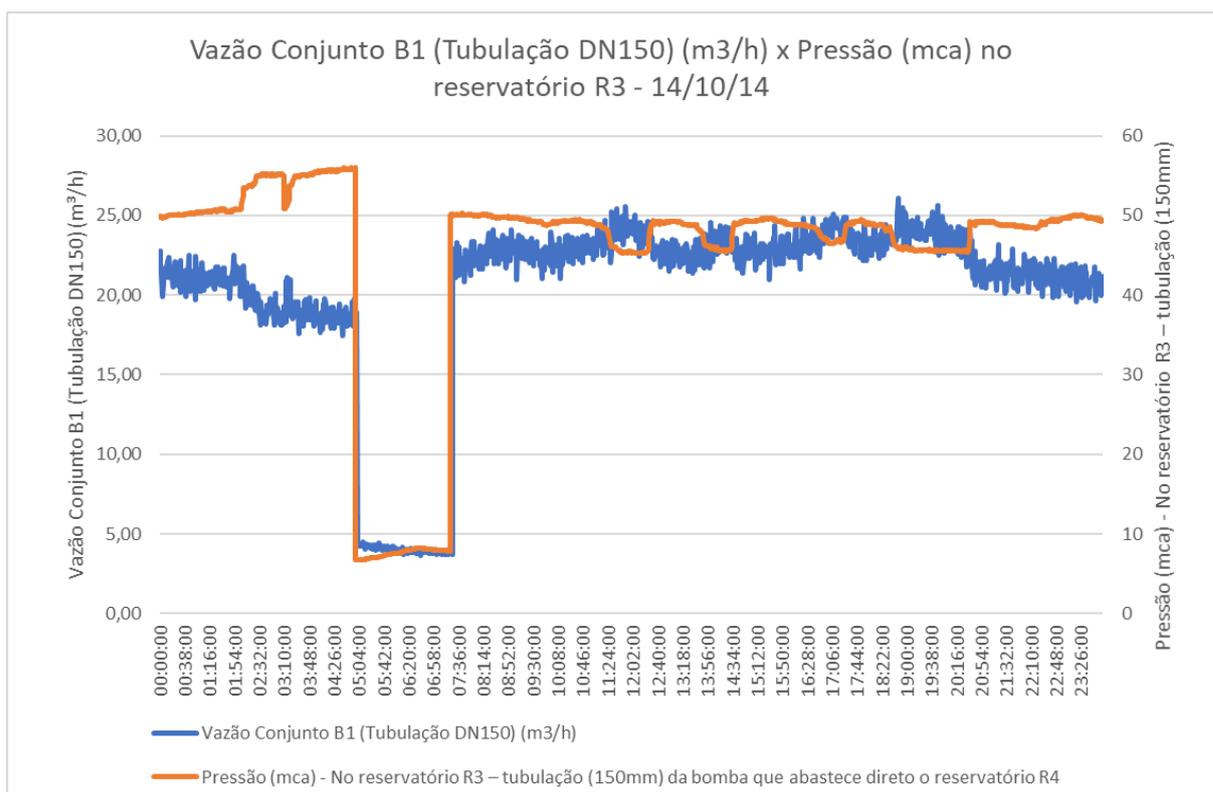


Figura 31. Variação da pressão da tubulação de saída do conjunto motor-bomba B1 em relação a vazão bombeada pelo mesmo conjunto ao longo do dia 14/10/2014.

Fonte: O autor.

Pode-se analisar na Figura 32, a variação da pressão da tubulação de saída do conjunto motor-bomba B2 em relação a vazão bombeada pelo mesmo conjunto ao longo do dia 11/10/2014.

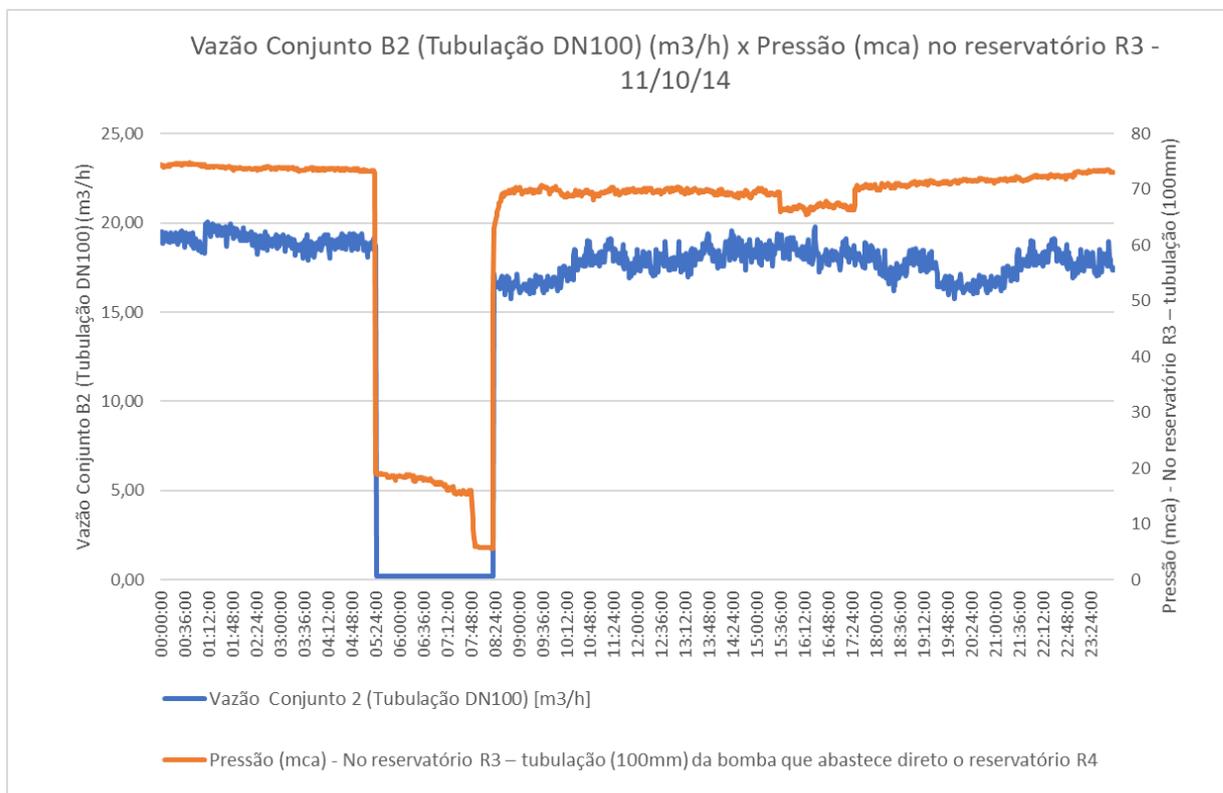


Figura 32. Variação da pressão da tubulação de saída do conjunto motor-bomba B2 em relação a vazão bombeada pelo mesmo conjunto ao longo do dia 11/10/2014.

Fonte: O autor.

5.2. Parâmetros elétricos

Na campanha 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 apresentou 0,33%, enquanto que o desequilíbrio de corrente resultou em 2% em operação. A distorção harmônica total de tensão medida foi de 3,17%, e a de corrente 4,3%. Os valores de desequilíbrio e os valores das distorções harmônicas estão abaixo dos limites recomendados, demonstrando o bom funcionamento dos componentes dos comandos elétricos. A média do fator de potência foi de 0,86. O maior fator de potência foi de 0,878, valor de acordo com os dados nominais do motor, porém abaixo do limite recomendado de 0,92. Sugere-se a correção do fator de potência, evitando custos adicionais por consumo excessivo de reativo.

A Figura 33 demonstra a variação da tensão média durante a campanha de campo. Os picos médios ocorreram durante a madrugada, período em que a vazão bombeada é menor.

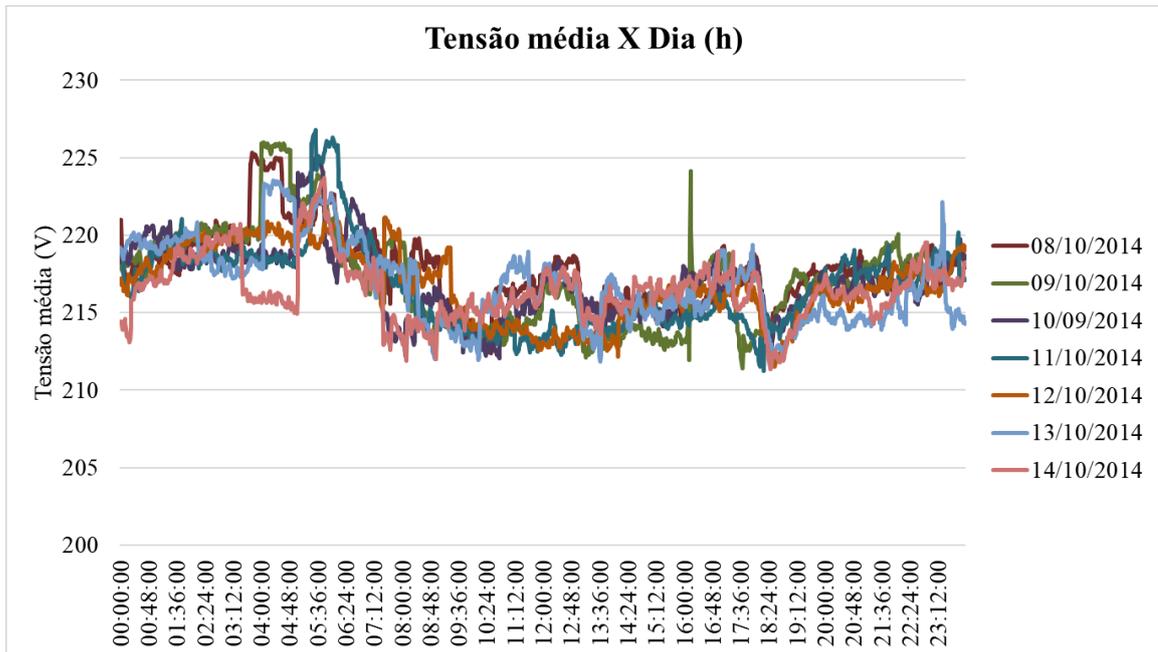


Figura 33. Tensão média.
Fonte: O autor.

A Figura 34 demonstra a variação da corrente média dos sistemas.

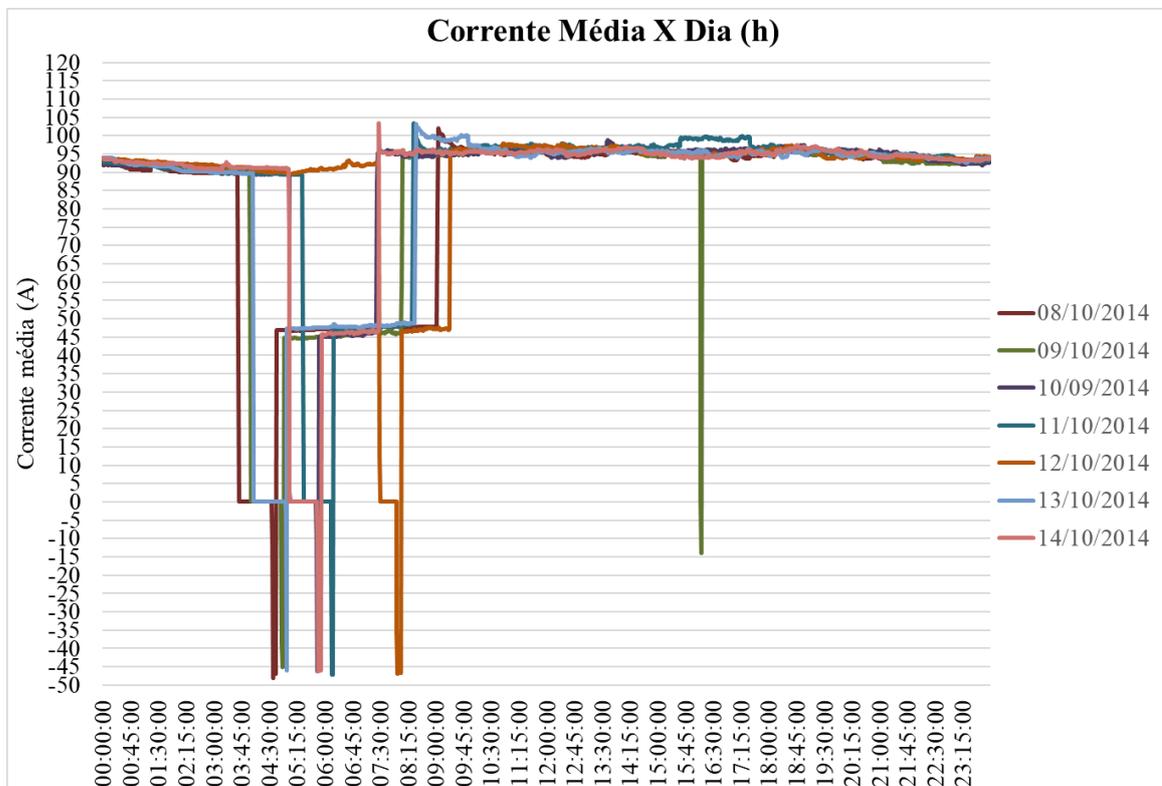


Figura 34. Variação da corrente média dos sistemas.
Fonte: O autor.

A Figura 35 apresenta o desequilíbrio de tensão de cada dia de campanha dos sistemas analisados. No que tange à qualidade de energia elétrica, a Figura 35 demonstra que praticamente não há desequilíbrio na tensão e, conseqüentemente, as correntes são equilibradas. O desequilíbrio de tensão aumenta a medida do horário do dia, na Figura 35 pode-se perceber que a partir da 06:00h da manhã o desequilíbrio de tensão vai subindo conforme o consumo da energia principalmente nos horários de pico.

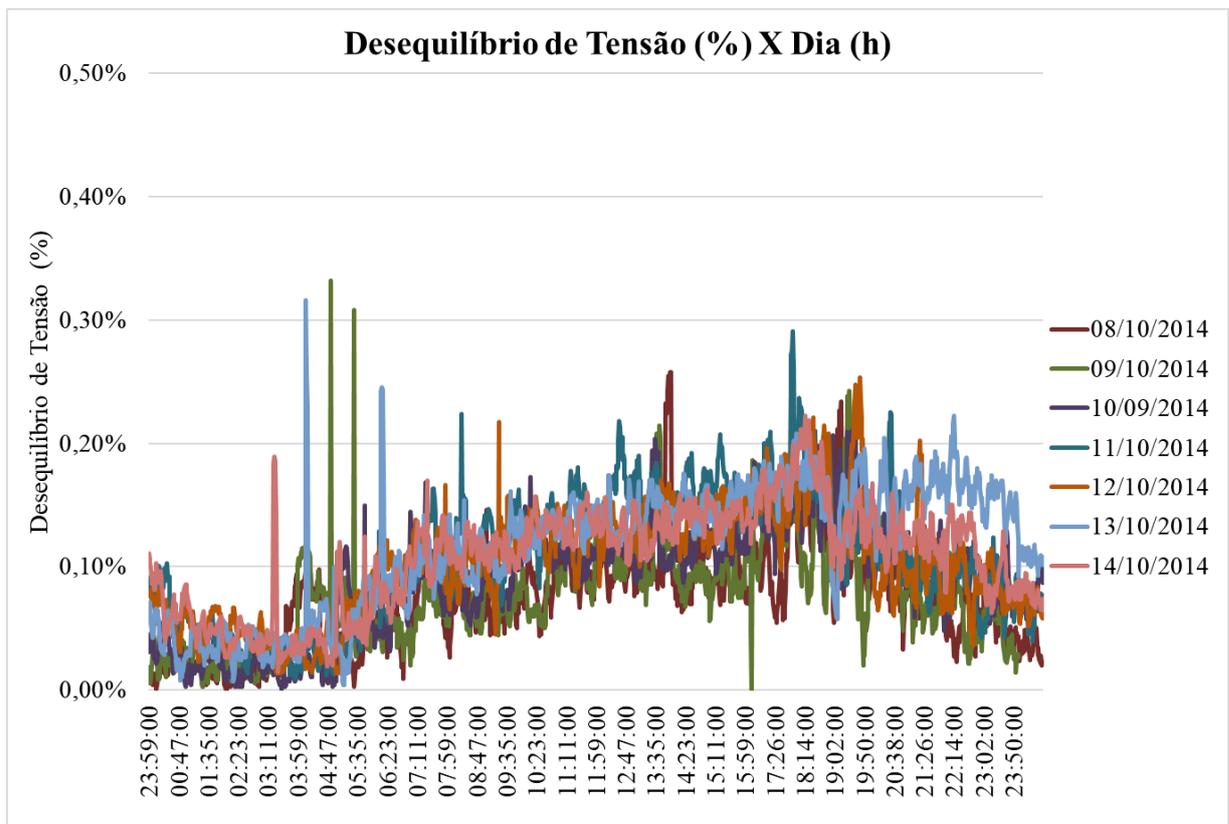


Figura 35. Desequilíbrio de tensão.

Fonte: O autor.

A Figura 36 ilustra a variação da potência ativa dos sistemas estudados.

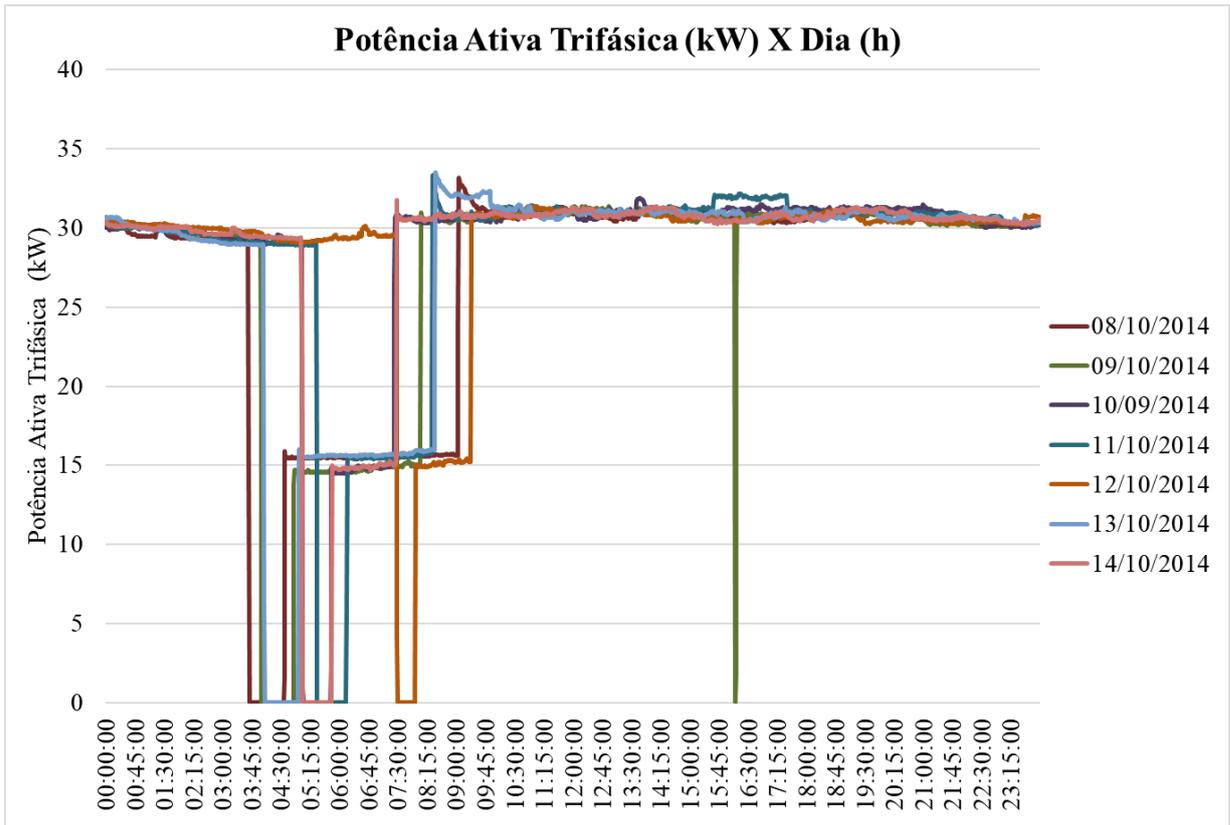


Figura 36. Potência ativa.

Fonte: O autor.

A Figura 37 demonstra a variação da potência reativa dos sistemas estudados.

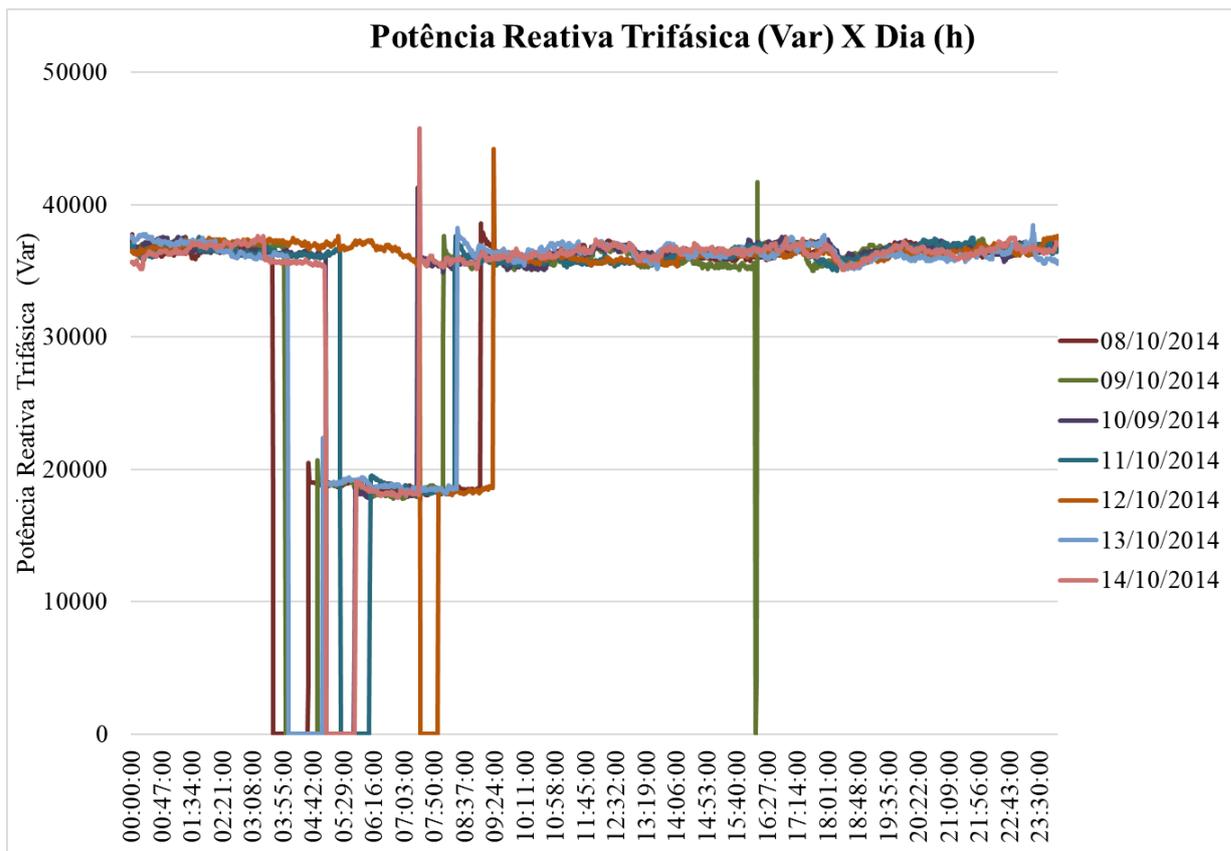


Figura 37. Potência reativa.

Fonte: O autor.

A Figura 38 apresenta a variação da potência aparente dos sistemas estudados.

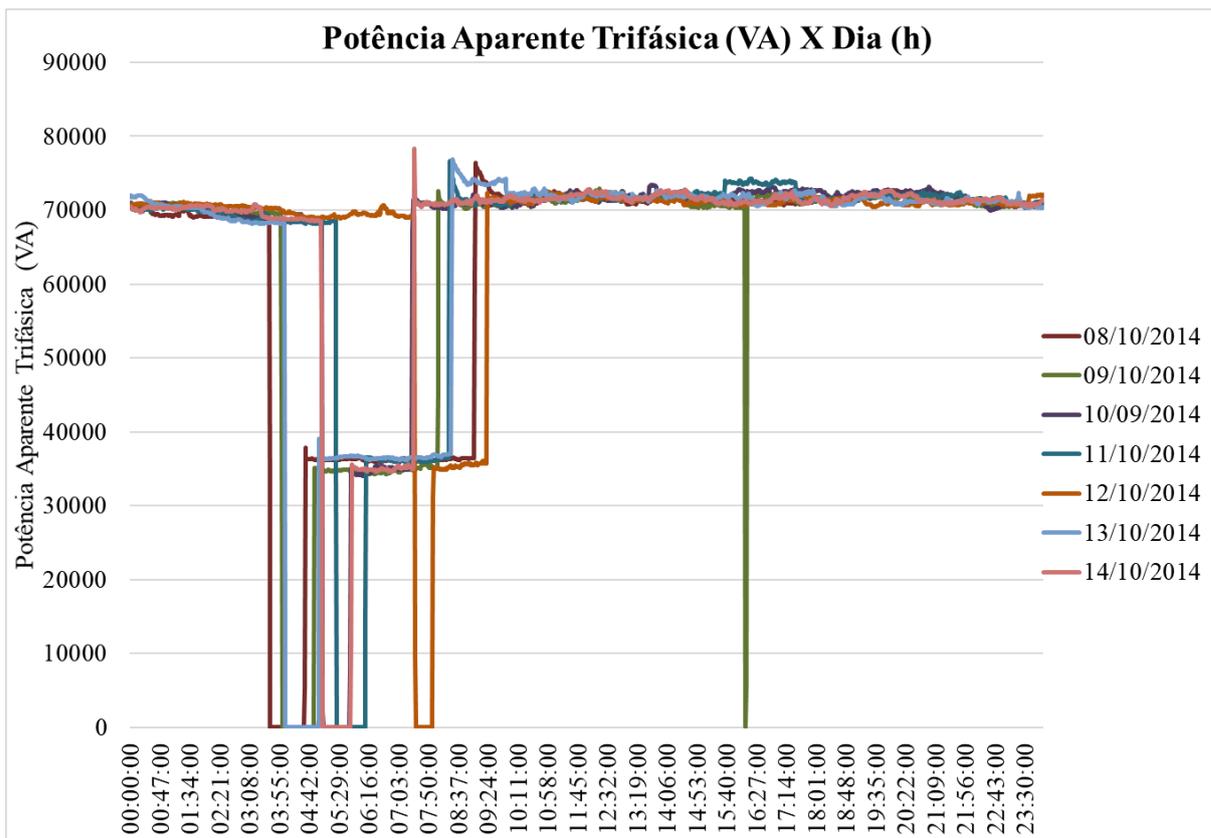


Figura 38. Potência aparente.

Fonte: O autor.

A Figura 39 demonstra a relação do comportamento da potência ativa trifásica e potência reativa dos sistemas estudados. A grande diferença de potências pode ser em consequência ao baixo fator de potência dos motores.

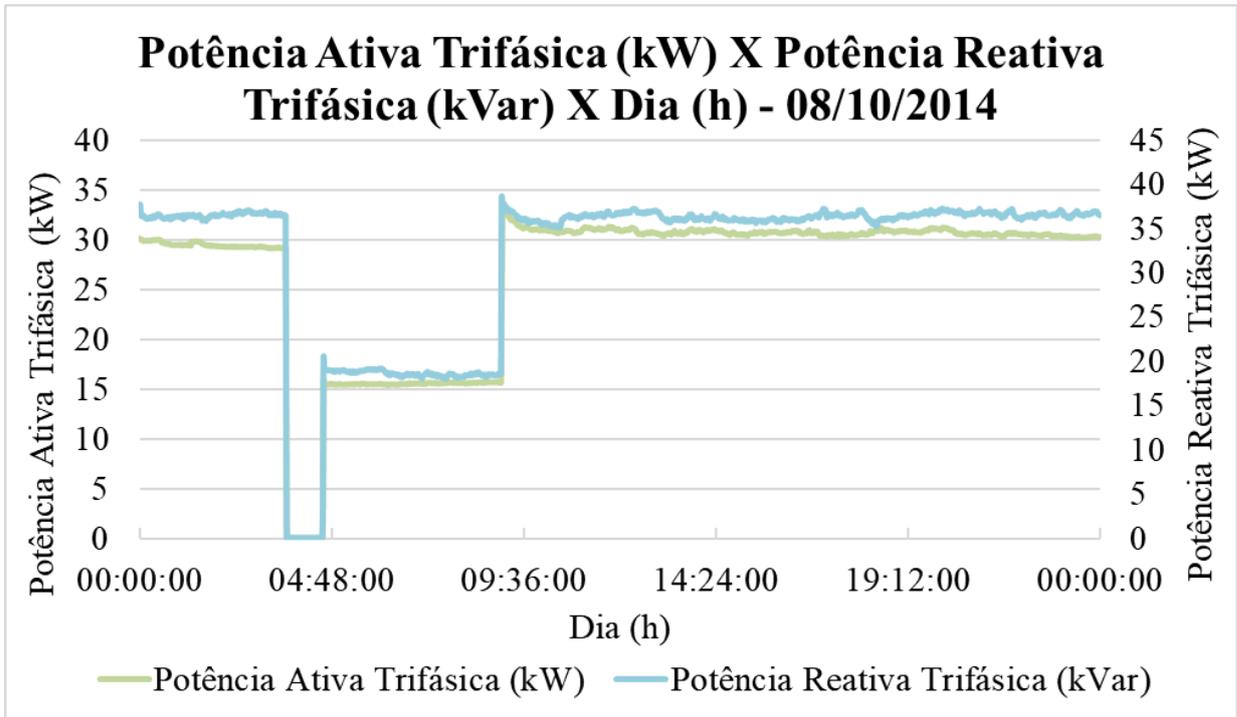


Figura 39. Relação do comportamento da potência ativa trifásica e potência reativa dos sistemas estudados.
Fonte: O autor.

A Figura 40 demonstra a variação de frequência ao longo do dia dos sistemas estudados.

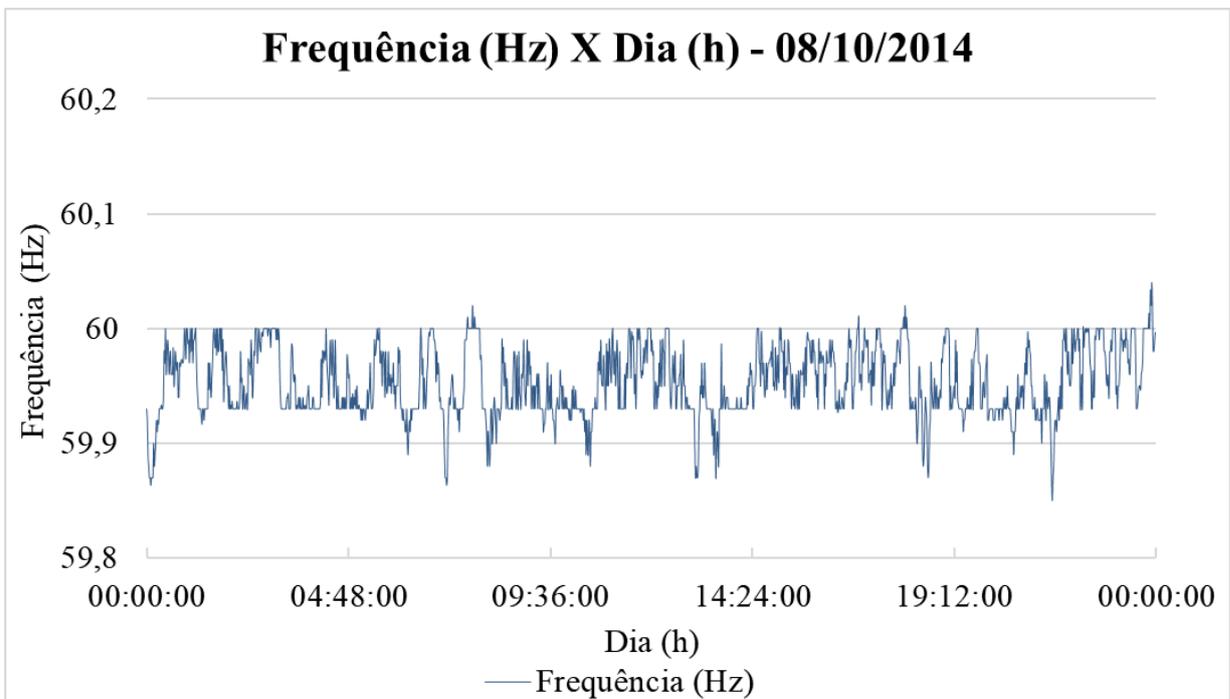


Figura 40. Frequência.
Fonte: O autor.

A Figura 41 apresenta a variação, ao longo do dia, do fator de potência do sistema estudado. O fator de potência sofre uma redução à medida que há uma diminuição da carga no eixo do motor. No que tange à qualidade de energia elétrica, praticamente não há desequilíbrio na tensão e, conseqüentemente, as correntes são equilibradas.

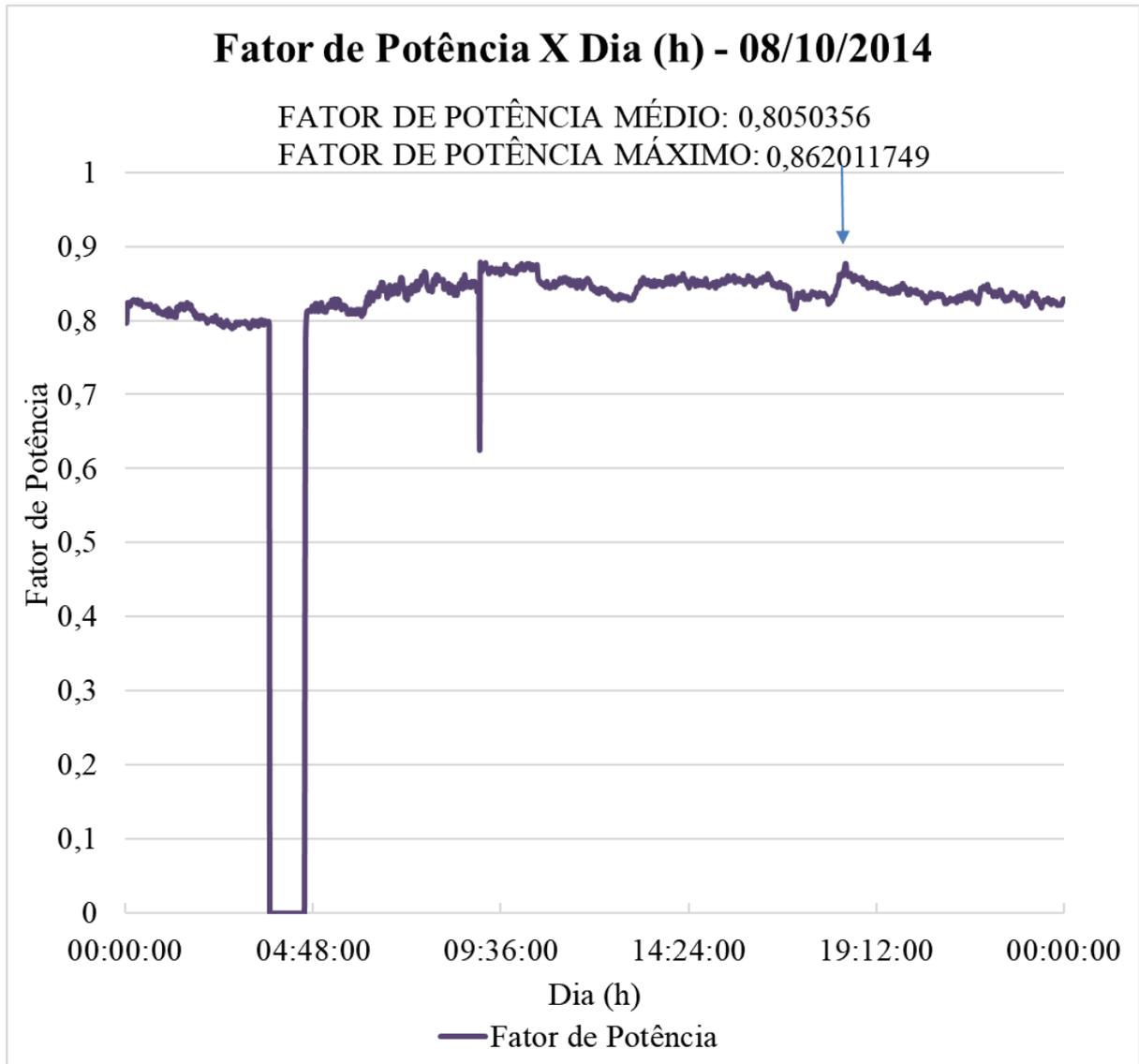


Figura 41. Fator de potência.

Fonte: O autor.

Analisando a Figura 42, nota-se uma elevação da tensão média à medida que houve aumento da distorção harmônica. A potência ativa pouco variou com a presença de distorção, conforme mostra a Figura 43. A energia consumida depende da potência ativa. Em função disso, o valor da energia consumida em todos os ensaios com distorções harmônicas esteve de maneira

geral próximo do valor de energia utilizada na situação de alimentação ideal, acompanhando o comportamento da potência ativa.

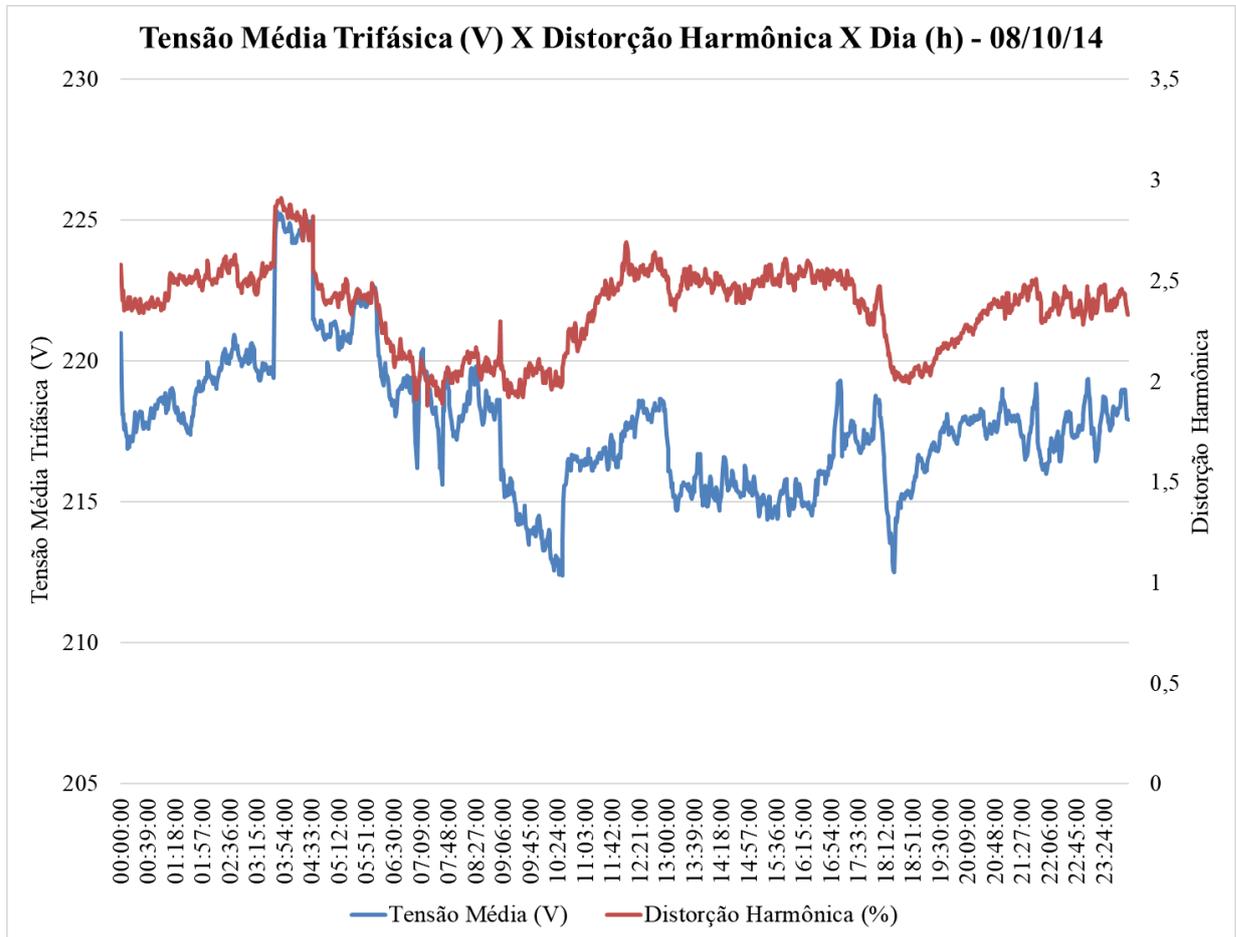


Figura 42. Tensão média.

Fonte: O autor.

A Figura 43 demonstra a variação de Potência Ativa com a distorção harmônica ao longo do dia dos sistemas estudados.

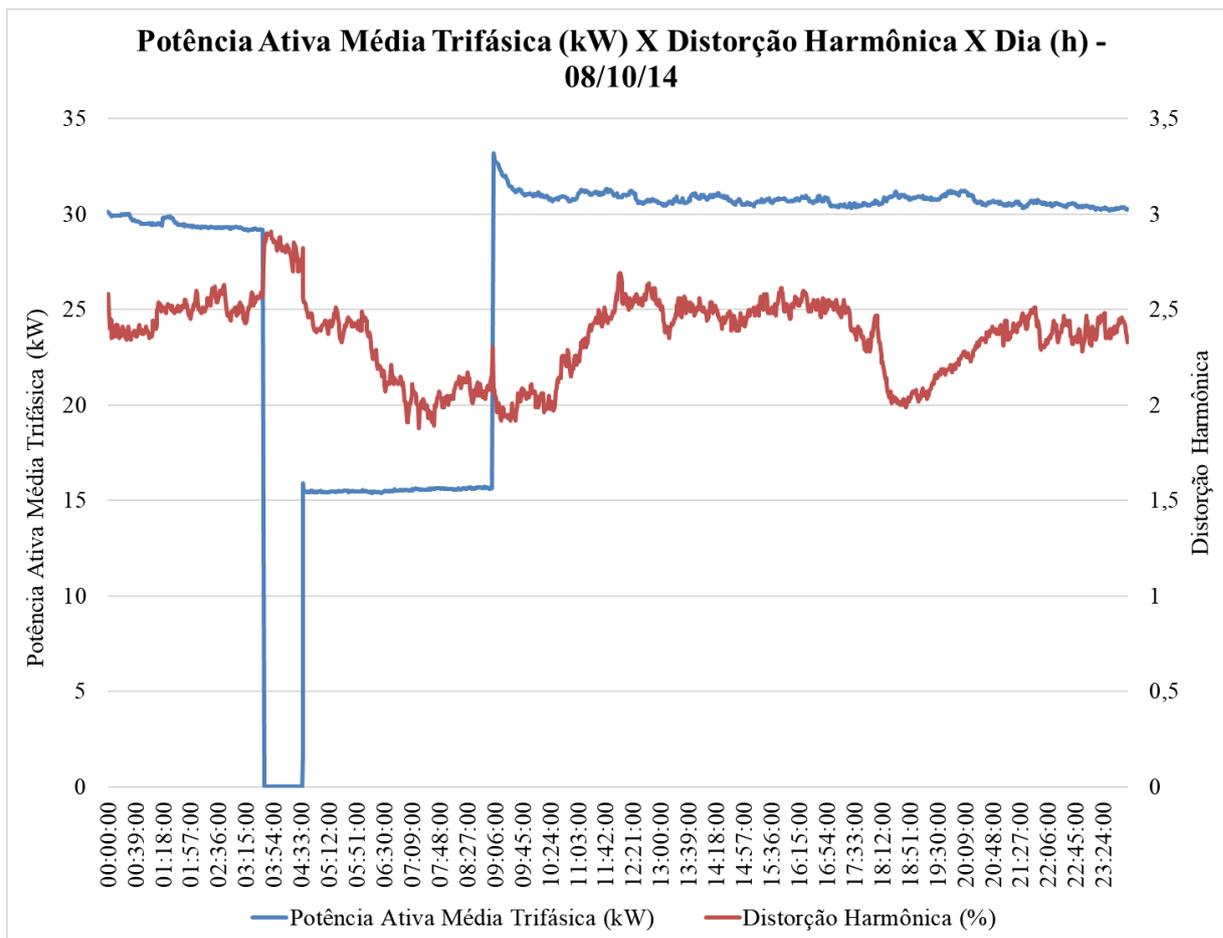


Figura 43. Distorção harmônica.

Fonte: O autor.

5.3. Correlação dos parâmetros hidráulicos com os elétricos

Analisando a Figura 44, percebe-se uma variação linear, de baixa inclinação, da potência elétrica mesmo quando se tem uma grande modificação da vazão. Em relação à eficiência energética, a energia elétrica consumida reduz coerentemente à diminuição da vazão do sistema. Todas essas informações estão coerentes com o comportamento elétrico, mecânico e hidráulico do motor e da bomba.

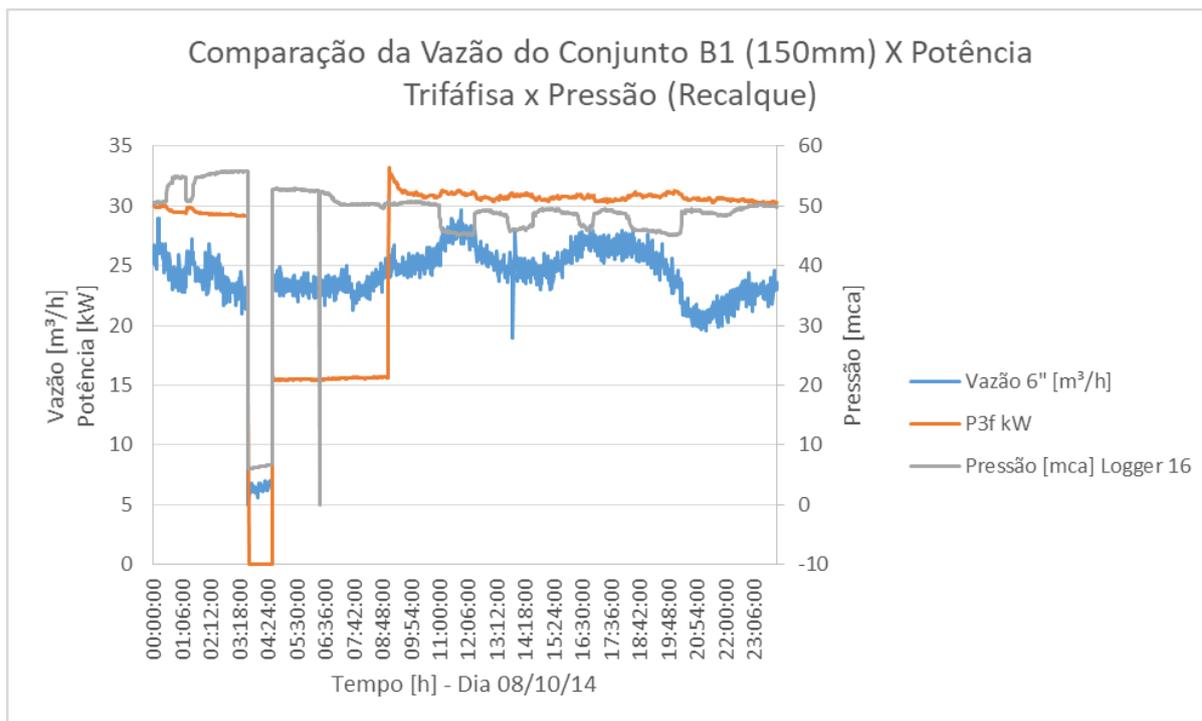


Figura 44. Comparação dos parâmetros hidráulicos e elétricos.

Fonte: O autor.

A Tabela 18 apresenta a relação do consumo de energia elétrica perdido devido às perdas de água no sistema do setor de estudo. Os dois conjuntos motor-bomba B1 e B2 consumiram 18.120 kWh/mês. O setor de estudo consome em média 28,93% da água bombeada em R3, pelos conjuntos B1 e B2.

Tabela 18. Consumo de energia dos dois conjuntos B1 e B2.

Consumo de energia dos dois Conjuntos B1 e B2	
Consumo de Energia relativo do setor de estudo (kWh/mês)	5.240,30
Valor da Tarifa em 2014, incluído os impostos (R\$/kWh)	0,42
Valor total do consumo de Energia relativo do setor de estudo (R\$/mês)	2.200,93
Valor perdido - Perda real mensal de energia da Estação Elevatória de R3 (R\$/mês)	610,32
Valor perdido - Perda real anual de energia da Estação Elevatória de R3 (R\$/ano)	7.323,84

Fonte: O autor.

O consumo elétrico mensal do setor de captação foi de 65.785 kWh/mês e uma vazão bombeada de água de 157.680 m³/mês, sendo o consumo elétrico de 0,4172 kWh/m³ de água. Na estação de tratamento de água (ETA), o consumo elétrico mensal foi de 49.604 kWh/mês e o volume de água processada no tratamento foi de 223.380 m³/mês, sendo o consumo elétrico

de 0,2221 kWh/m³. A estação elevatória (R3) tem um consumo elétrico mensal de 18.120 kWh/mês e um volume de água elevada de 27.344,30 m³/mês, sendo o consumo elétrico de 0,6627 kWh/m³. Por meio do indicador de consumo de energia elétrica ou consumo de energia específico (IT), tem-se um valor de aproximadamente 1,302 kWh/m³ de água, sem considerar o consumo elétrico da parte administrativa da SAAE. Todos esses dados são demonstrados na Tabela 19.

O setor de estudo possui 413 ligações, considerando um valor de 4 pessoas vivendo em uma mesma residência (ligação) (dados fornecidos pelo IBGE, 2018), tem-se, em média 1.652 habitantes no setor de estudo. De acordo com o IBGE (2018), a população da cidade escolhida no ano de 2010 era de 26.488 pessoas. Por meio de critérios de proporcionalidade de habitantes, o valor proporcional (VP) do setor de estudo dentro da cidade escolhida é de 6,2367%. Entretanto, ao analisar o valor proporcional do setor de estudo de acordo com o consumo médio do volume de água (263,55707 m³/dia ou 7.906,7121 m³/mês), encontra-se um percentual diferente para o valor proporcional. Ao considerar a vazão bombeada de água de 157.680 m³/mês da captação e o consumo de água do setor de estudo, tem-se um VP de aproximadamente 5,02 %, valor próximo ao ser comparado pela estimativa da população. Essa divergência de resultado pode ocorrer em virtude dos dados populacionais utilizados.

Considerando o valor proporcional da captação de 5,02 %, tem-se uma participação no consumo elétrico da captação de 3.302,41 kWh/mês ou 39.628,92 kWh/ano. Para a estação de tratamento de água, o valor proporcional do setor de interesse representa 3,54 %, sendo 1.755,98 kWh/mês ou 21.071,76 kWh/ano. O valor proporcional do setor de interesse na estação elevatória (R3) é de 28,93%, sendo 5.242,12 kWh/mês ou 62.905,44 kWh/ano. Com isso, tem-se que o consumo de energia elétrica mensal do setor de estudo é de aproximadamente 10.300,51 kWh/mês ou 123.606,12 kWh/ano.

A Tabela 19 apresenta os dados referentes ao consumo de energia elétrica do setor de estudo em outubro de 2014. Para fazer o cálculo relativo apenas do setor de interesse, foi adotado o consumo médio de água do setor (263,557 m³/dia ou 7.906,71 m³/mês).

Tabela 19. Consumo de energia elétrica – outubro de 2014.

Consumo de Energia Elétrica – outubro de 2014						
	Consumo Elétrico Mensal do Setor de Interesse [kWh/mês]	Vazão [m³/mês]	Consumo [kWh/m³]	Contribuição do Setor [%]	Consumo do Setor [kWh/mês]	Consumo do Setor [kWh/ano]
Captação	65.785	157.680	0,4172	5,02%	3.302,41	39.628,92
ETA	49.604	223.380	0,2221	3,54%	1.755,98	21.071,76
R3	18.120	27.344,30	0,6627	28,93%	5.242,12	62.905,44
Total	133.509	408.404,30	1,302	-	10.300,51	123.606,12

Fonte: O autor.

Andrade (2016), encontrou o valor de 27,77% de perdas reais do sistema de estudo por meio do Método do Balanço Hídrico (IWA). Pelo Método do Mínimo Noturno, este valor foi para 42,98%, considerando o mesmo período. O valor para o indicador de água não faturada no setor de estudo foi de 28,42%, aproximando do valor do Método do Balanço Hídrico (IWA). Em outubro de 2014, a SAAE forneceu o valor de apenas 5714,00 m³/mês de água faturada no setor de estudo.

Por meio do Índice de Perdas, temos:

$$I = \frac{263,55707 - 190,46667}{263,55707} = 27,73\%$$

Andrade (2016) encontrou o valor de R\$ 1,60 por m³ de água captada, tratada, distribuída e de esgoto tratado pelo SAAE do Sul de Minas Gerais, incluindo todos os gastos administrativos, materiais, etc. Considerando este valor e sabendo que o consumo médio de água do setor de estudo é de 263,557 m³/dia, o valor médio do gasto dessa água é de R\$ 421,70/dia ou R\$ 12.651,00/mês ou R\$ 151.812,00/ano, significando um valor de perdas financeiras de R\$ 3.508,12/mês ou R\$ 42.097,44/ano devido às perdas de água. É importante salientar que chegou-se a esse valor, considerando apenas as perdas sobre o consumo do setor de estudo.

De acordo com Andrade (2016), por meio da metodologia do Mínimo Noturno o valor de perdas no mesmo período foi de 42,98%. Caso esse fosse realmente o valor das perdas de água, isso resultaria em uma perda financeira anual de aproximadamente R\$ 66.153,65, considerando apenas as perdas sobre o consumo do setor de estudo.

O consumo médio de energia elétrica do setor de estudo corresponde à aproximadamente 10.300,51 kWh/mês ou 123.606,12 kWh/ano. A tarifa elétrica vigente corresponde a R\$ 0,42/kWh. Com isso, o valor da energia consumida é de R\$ 51.914,5704. Sendo assim, pode-se calcular a porcentagem dos gastos com energia elétrica, representando 34,20%.

Utilizando a taxa do índice de perdas do setor de estudo (27,73%), pode-se calcular a perda real mensal de energia da Estação Elevatória de R3, resultando no valor de 1.453,1363 kWh/mês, com custo mensal de R\$ 610,32/mês e volume médio de água perdido de 2.192,70 m³/mês.

A Tabela 20, demonstra os valores calculados referente às perdas de água do setor de estudo.

Tabela 20. Valores calculados.

Valores Calculados

Vazão média distribuída (m³/dia) pelos conjuntos motor-bombas 1 e 2	911,47674 m ³ /dia
Vazão média distribuída (m³/mês) pelos dois conjuntos motor-bomba do sistema R3	27.344,3022 m ³ /mês
V_D - Consumo efetivo médio de água do setor de estudo (medido em campo) – (m³/dia)	263,557 m ³ /dia
Consumo efetivo médio de água do setor de estudo (m³/mês)	7.906,71 m ³ /mês
Consumo efetivo faturado do setor de estudo (m³/mês)	5.714,00 m ³ /mês
T - Valor da tarifa de energia elétrica, incluso os impostos	R\$ 0,42/kWh
Consumo médio de energia elétrica dos dois conjuntos motor-bomba do sistema R3	18.120 kWh/mês
S - Porcentagem referente ao setor de estudo junto com a estação elevatória: R3 (%) = 263,557/911,477	28,92%
Perda real mensal de energia da Estação Elevatória de R3 por meio da Equação: Perdas = I x E x S = 0,2773 x 18.120 x 0,2892	1.453,1363 kWh/mês
Custo mensal com a energia elétrica consumida no bombeamento do volume de água perdido na Estação Elevatória de R3: C = Perdas x T = 1.453,1363 x 0,42	R\$ 610,32/mês
Volume médio mensal perdido (m³/mês): V_P = (V_D – V_U) x 30 = (263,557 - 190,467) x 30	2.192,70 m ³ /mês

Fonte: O autor.

A Figura 45 ilustra o comportamento da potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 em relação ao volume total bombeado ao longo dia 08/10/14. É possível notar que no período da madrugada a demanda da potência elétrica foi menor devido à reserva máximo dos reservatórios R4.

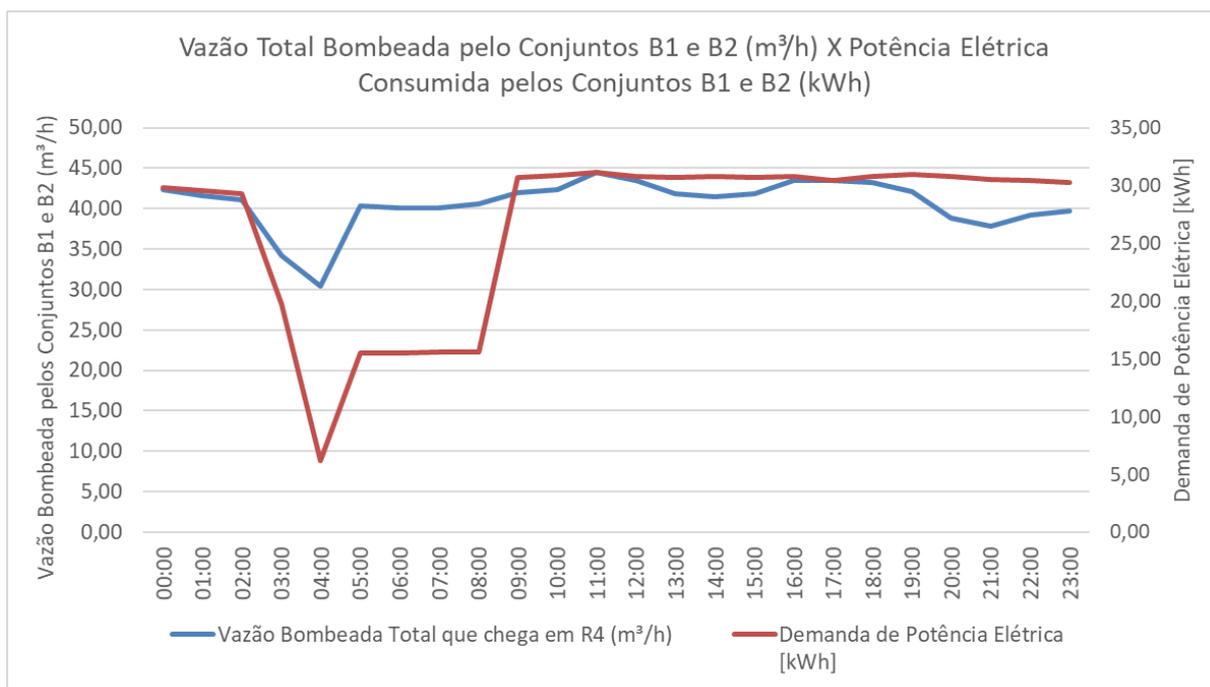


Figura 45. Vazão total bombeada pelos conjuntos B1 e B2 versus potência consumida.

Fonte: O autor.

A Tabela 21 demonstra os valores médios do consumo de energia elétrico diário, as horas estimadas de funcionamentos e o volume bombeado pelos conjuntos motor-bomba B1 e B2. Os valores do consumo de energia elétrica foram obtidos por meio de medição em campo.

Tabela 21. Consumo de energia diário e volume elevado.

Data	Consumo de energia diário (kWh/dia)	Horas estimadas (h)	Volume Bombeado pelos dois Conjuntos B1 e B2 (m³/dia)
08/10/2014	636	21	976,4393333
09/10/2014	633,5	21	872,1143947
10/10/2014	685,5	23	872,9626667
11/10/2014	678	23	994,2651667
12/10/2014	691	23	936,3816389
13/10/2014	656	22	965,1481667
14/10/2014	682	23	914,6101667
Média:	666	22	933,1316477

Fonte: O autor.

No dia 08 de outubro de 2014 (Figura 46), no horário de 03h00min até as 08h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios

atingem a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observada ao nível dos reservatórios de R4.

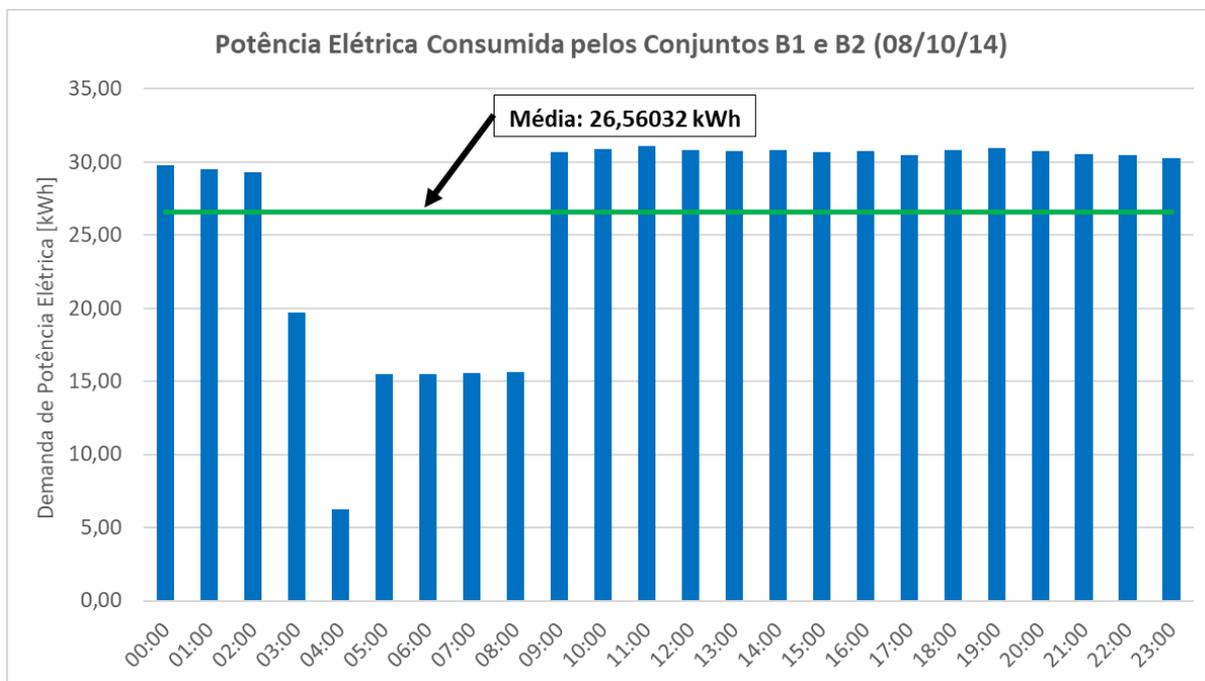


Figura 46. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 08/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 02h00min e 09h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio horário do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 26,56032 kWh. Essa foi a menor média dos dias de campanha.

Durante o maior período do dia e principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto, sendo necessário um estudo futuro sobre tarifas de energia elétrica, caso o SAAE mude junto à concessionária de energia seu tipo de tarifa, demanda contratada ou tipo de consumidor. Com esse planejamento, o SAAE pode ter ganhos financeiros, caso adeque o horário do funcionamento dos equipamentos elétricos.

No dia 09 de outubro de 2014 (Figura 47), o horário de 04h00min até as 07h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios

atingem a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume, devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observada ao nível dos reservatórios de R4.

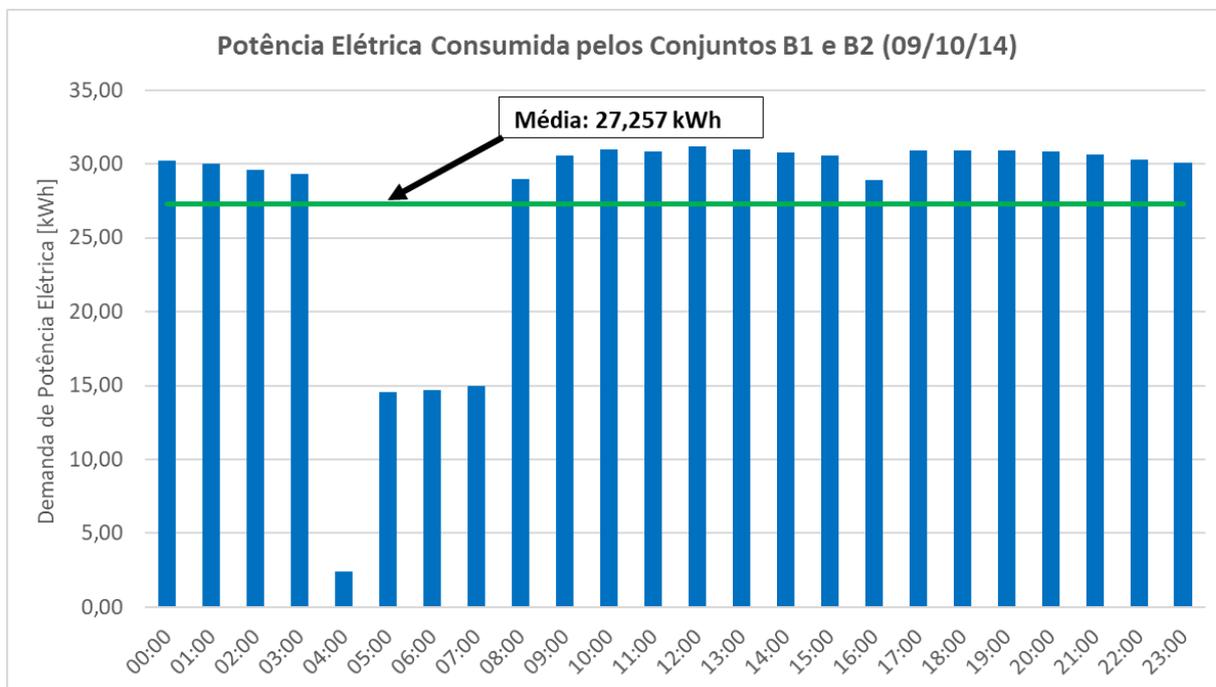


Figura 47. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 09/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 03h00min e 08h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio horário do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 27,257 kWh. Esse foi o dia de menor consumo elétrico médio, aproximadamente 633,50 kWh/dia.

Durante o maior período do dia e, principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto.

No dia 10 de outubro de 2014 (Figura 48), o horário de 05h00min até as 07h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios atingem a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume, devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de

energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observado ao nível dos reservatórios de R4.

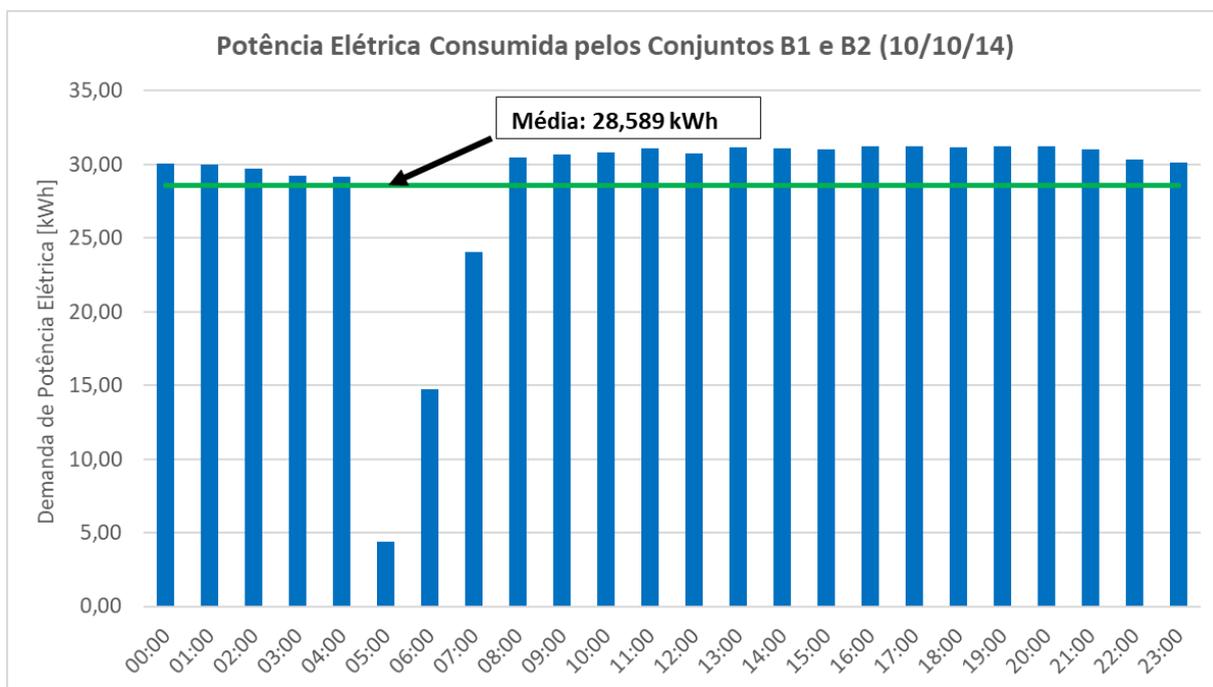


Figura 48. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 10/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 04h00min e 08h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 28,589 kWh.

Durante o maior período do dia e, principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto.

No dia 11 de outubro de 2014 (Figura 49), no horário de 05h00min até as 08h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios atingiram a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume, devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observado ao nível dos reservatórios de R4.

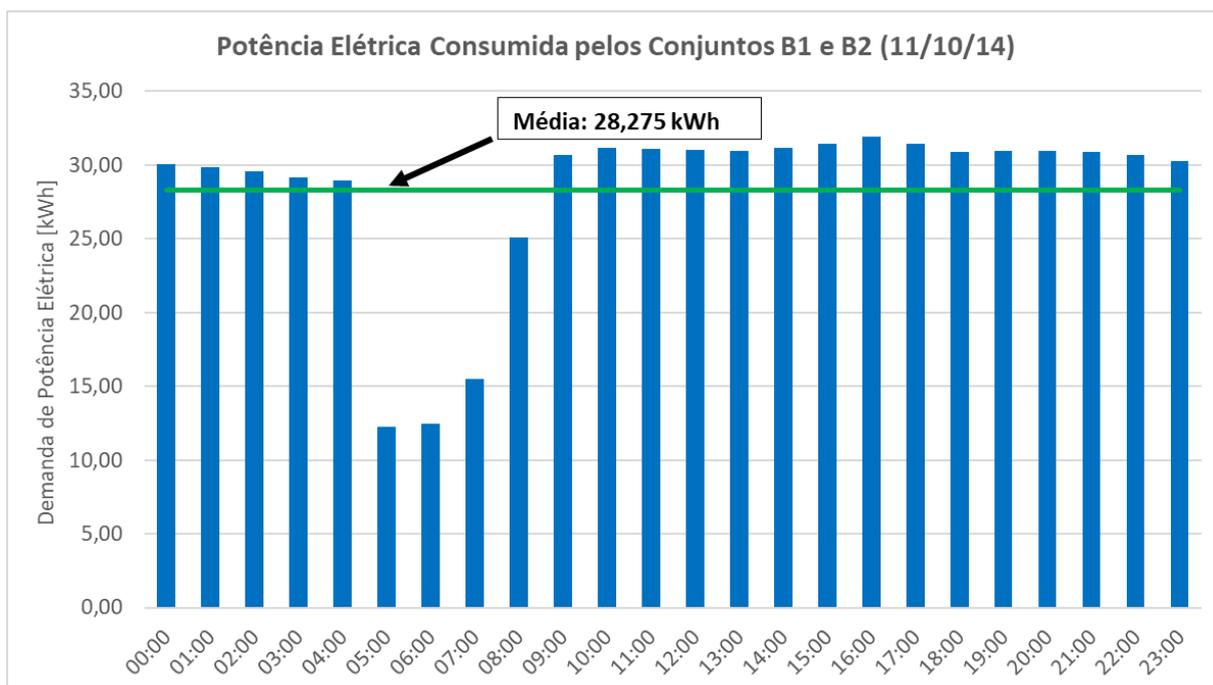


Figura 49. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 11/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 04h00min e 09h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio horário do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 28,275 kWh.

Durante o maior período do dia e, principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto.

No dia 12 de outubro de 2014 (Figura 50), no horário de 07h00min até as 09h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios atingem a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observada ao nível dos reservatórios de R4.

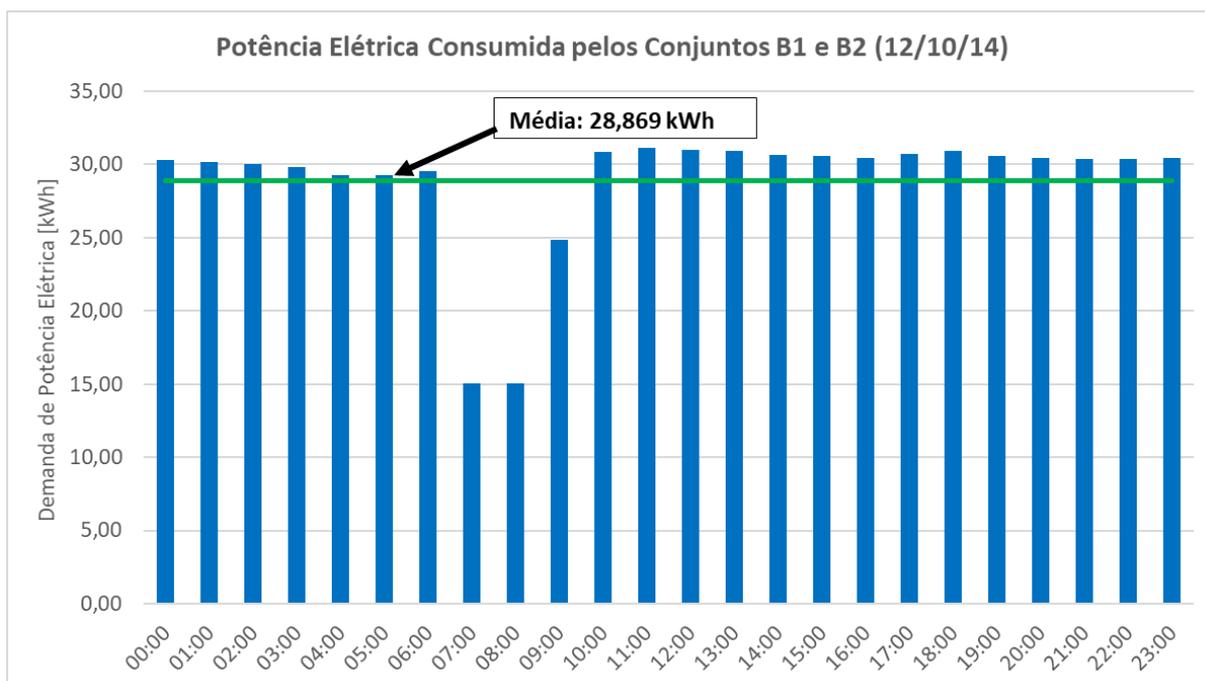


Figura 50. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 12/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 06h00min e 10h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio do horário do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 28,869 kWh. Essa foi a maior média dos dias de campanha e teve consumo elétrico médio de aproximadamente 691 kWh/dia.

Durante o maior período do dia e principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto.

No dia 13 de outubro de 2014 (Figura 51), no horário de 04h00min até as 08h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios atingiram a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume, devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observada ao nível dos reservatórios de R4.

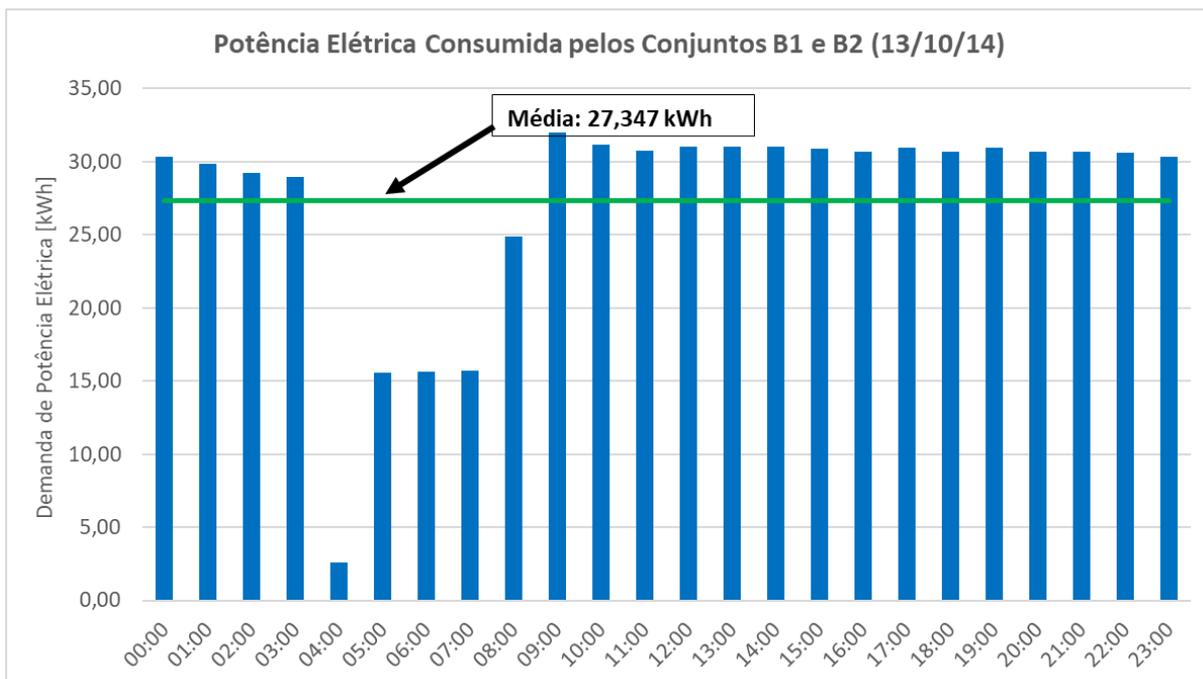


Figura 51. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 13/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 03h00min e 09h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 27,347 kWh.

Durante o maior período do dia e principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto.

No dia 14 de outubro de 2014 (Figura 52), no horário de 05h00min até as 07h00min ocorreram os menores valores de consumo de energia elétrica, visto que os reservatórios atingem a proximidade do seu nível máximo de capacidade de volume, devido ao baixo consumo no horário da madrugada. Esses valores indicam grandes variações de consumo de energia ao longo da madrugada, sendo que essas variações certamente são resultantes da rotina operacional observada ao nível dos reservatórios de R4.

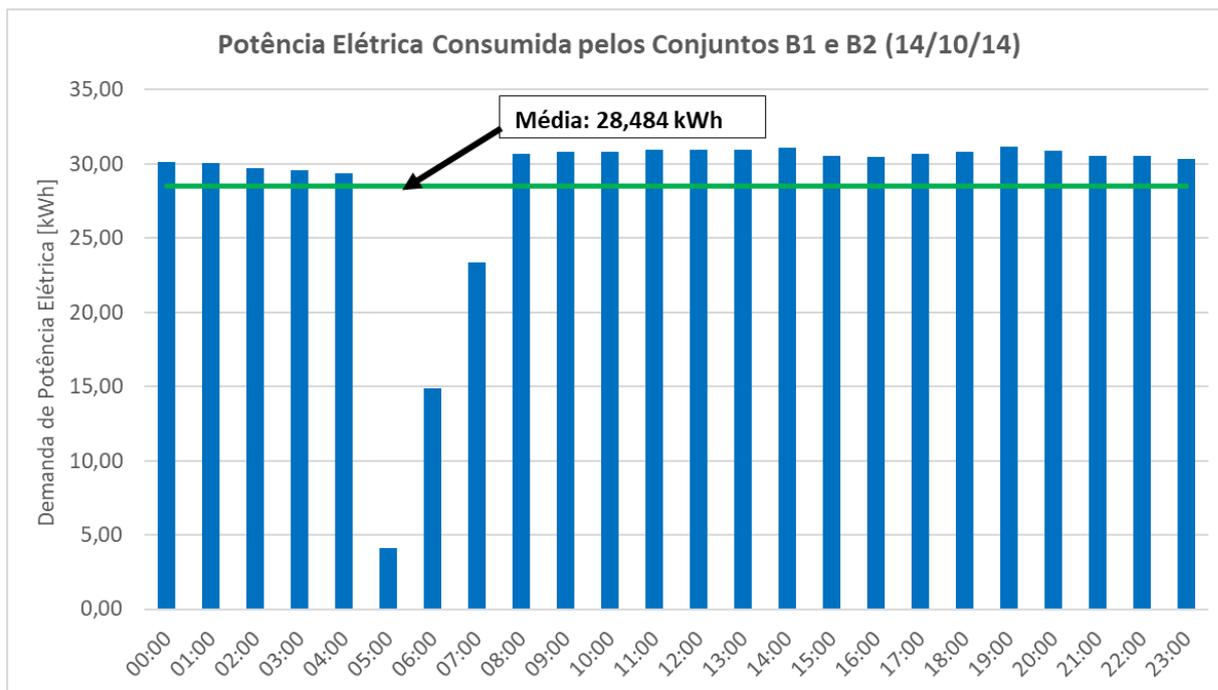


Figura 52. Potência elétrica consumida pelos conjuntos B1 e B2 no dia 14/10/14.

Fonte: O autor.

Os maiores valores demandados de energia elétrica ocorreram nos períodos de 00h00min às 04h00min e 08h00min às 23h00min, pois nesses horários funcionaram simultaneamente os dois conjuntos motor-bomba. O valor médio horário do consumo de energia elétrica na estação elevatória do setor de estudo, obtido a partir dos valores coletados e analisados, foi de 28,484 kWh.

Durante o maior período do dia e principalmente dentro do horário de ponta, o consumo elétrico foi alto.

O dia 12/10/14, como mencionado no trecho acima, foi o dia de maior consumo elétrico. Essa característica pode ser comprovada pela relação entre potência elétrica e vazão bombeada.

A maior vazão bombeada pelos conjuntos B1 e B2 foi de 994,26m³ no dia 11/10/14, demonstrando a relação direta com a potência elétrica, como pode ser verificado na Figura 53. Já o dia de menor vazão bombeada foi 09/10/14. Foi bombeado uma média de 872,11m³ de água pelos conjuntos B1 e B2. Nesse dia, o consumo de energia elétrica também foi o menor durante a campanha, 633,50 kWh/dia. Mesmo com a redução de 12,28% da vazão bombeada em comparação ao dia de maior e menor vazão bombeada, a energia consumida diminuiu apenas 6,56%.

A Figura 53 ilustra a comparação do consumo diário de energia elétrica pelo volume médio de água bombeada pelos Conjuntos B1 e B2.

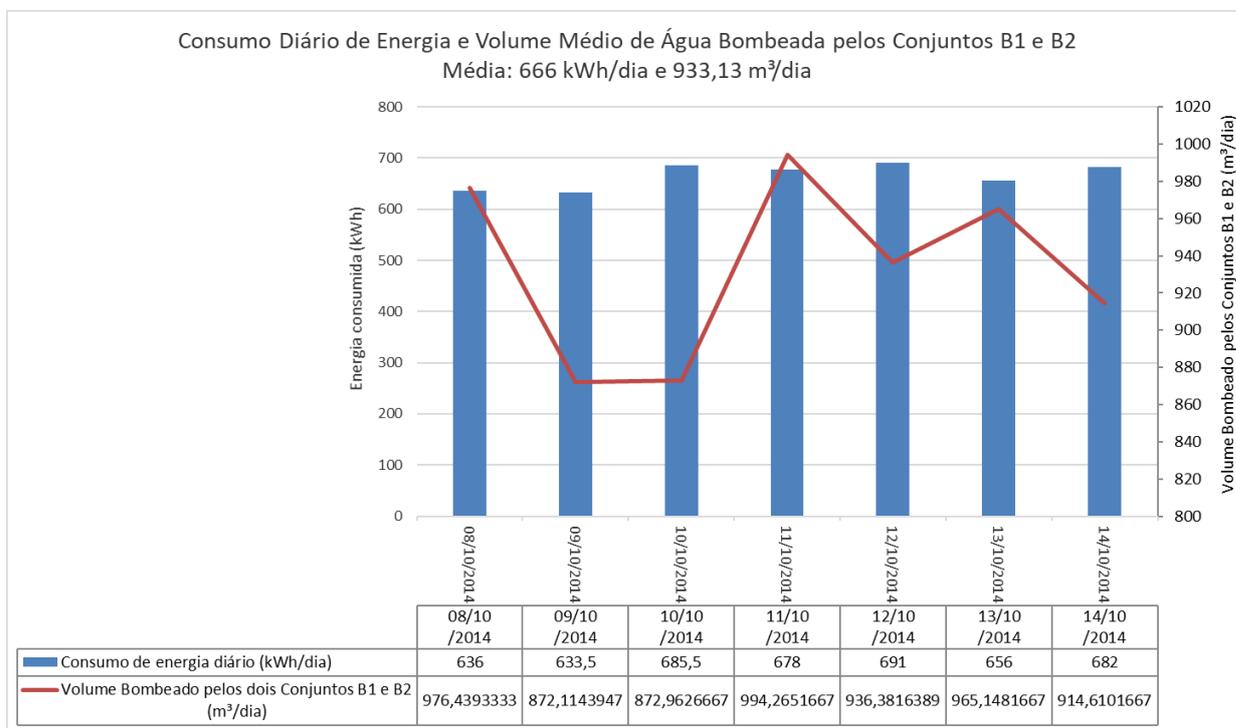


Figura 53. Consumo diário de energia e volume médio elevado pelos conjuntos B1 e B2.

Fonte: O autor.

Como demonstrado acima, para estimar o consumo de energia elétrica dos conjuntos B1 e B2 na estação elevatória R3, foram adquiridos dados junto ao SAAE, a fim de comparar com às medições dos parâmetros elétricos realizadas pela empresa contratada durante a campanha de campo.

O consumo médio diário de energia elétrica medido em R3 foi de 666 kWh, conforme Tabela 22. Esse valor equivale a um período de operação médio em torno de 22 horas por dia, evidenciado o funcionamento quase ininterrupto dos conjuntos motor-bomba ao longo do dia.

A Tabela 22 e as Figuras 54 e 55 apresentam os dados mensais de consumo de energia elétrica de R3 no período de novembro/2013 a outubro/2014 e também os valores monetários referentes ao consumo.

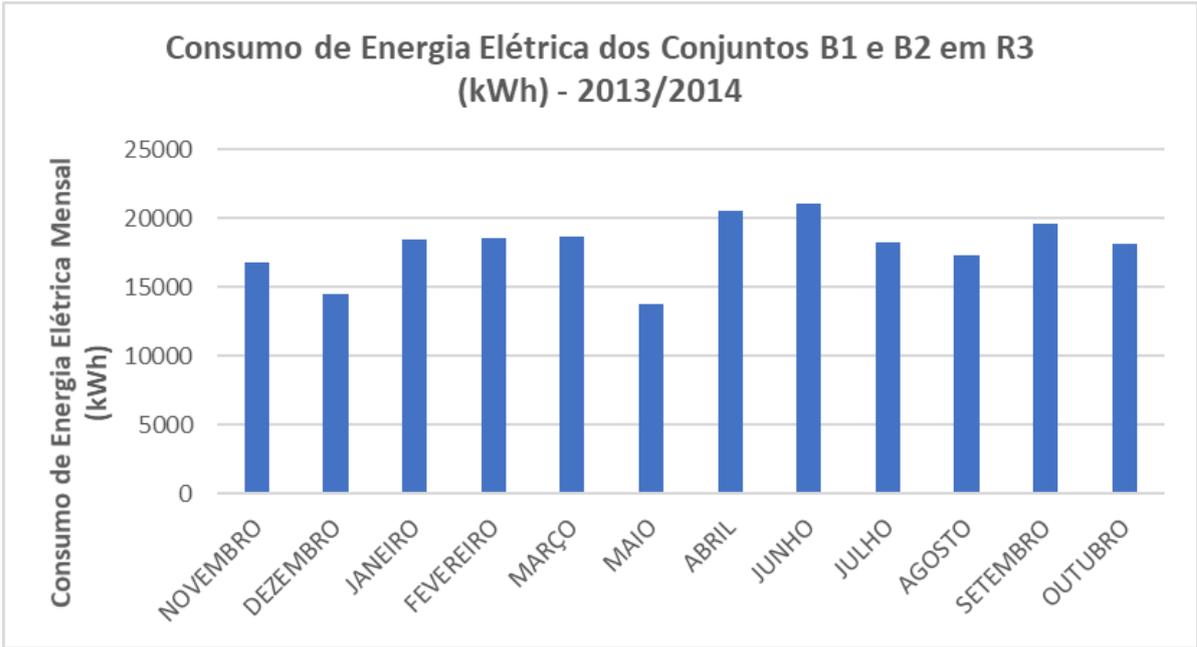


Figura 54. Consumo de energia elétrica dos conjuntos B1 e B2 em R3 entre os anos de 2013 a 2014.

Fonte: O autor.

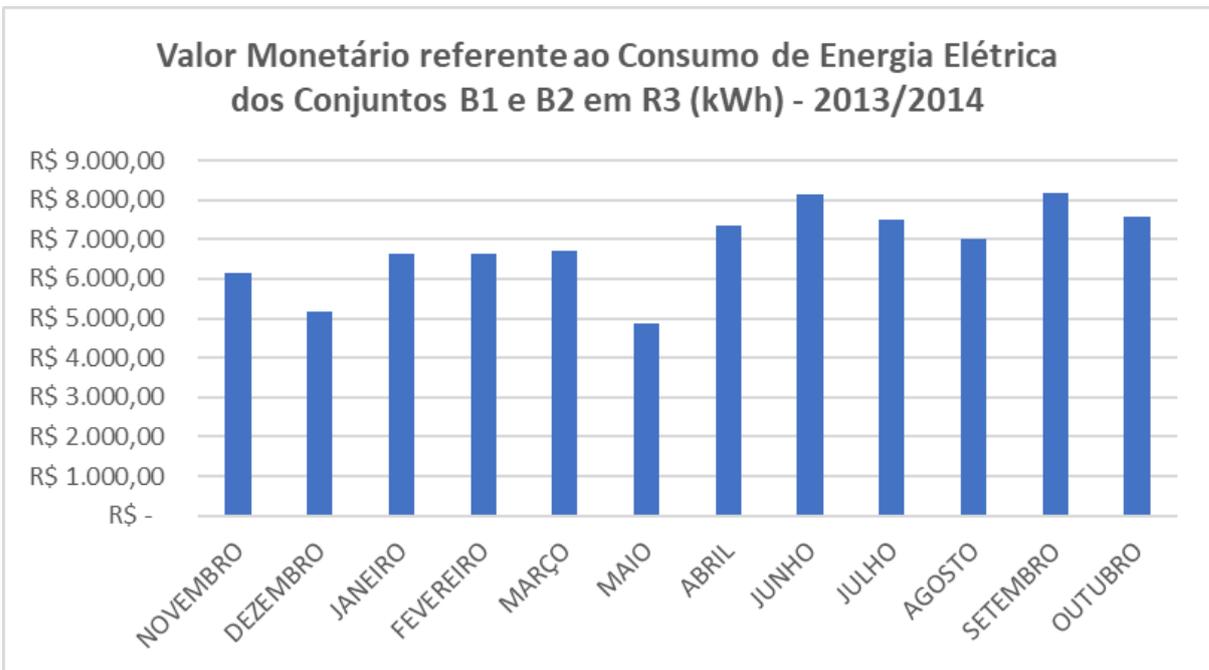


Figura 55. Valor monetário referente ao consumo de energia elétrica dos conjuntos B1 e B2 em R3 entre os anos de 2013 a 2014.

Fonte: O autor.

A Tabela 22 demonstra a comparação dos dados que se referem às médias de consumo diário transformados em mensais e anual, com os dados fornecidos pelo SAAE referentes aos consumos mensal e anual. O cálculo para obter o consumo mensal e anual foi obtido pela multiplicação dos dados medidos em campo pela quantidade de dias no ano e no mês.

Tabela 22. Dados de consumo de energia elétrica.

	Consumo diário [kWh]	Consumo mensal [kWh]	Consumo anual [kWh]
Dados SAAE (10/2014)	584,00	18.120,00	215.640,00
Dados medidos em campo (10/2014)	666,00	20.646,00	247.752,00

Fonte: O autor.

É importante salientar que a possível diferença entre os dados medidos em campo em relação aos dados fornecidos pelo SAAE pode ser resultante de prováveis erros de medição dos equipamentos ou pela variação do consumo ao longo das semanas, uma vez que os dados medidos em campo foram referentes apenas a uma semana do mês de outubro e normalizados para dados mensais. Mesmo com essa diferença, pode-se afirmar que os valores foram próximos.

5.4. Análise do balanço energético

A metodologia proposta por Mamade et al. (2017) foi adaptada para ser aplicada neste estudo. Isto fez-se necessário visto que Mamade considera todo o sistema do SAAE e neste trabalho delimitamos a DMA (Áreas de Medição do Distrito) do setor de interesse. Outro fator é que o volume de água fornecido pela estação elevatória R3 não é restrito apenas ao setor de interesse, sendo também distribuída água para outros setores.

Como foi possível mensurar por meio do trabalho em campo, o volume de água que chega ao reservatório R3 e o que é consumido pelo setor de estudo, pode ser relacionado a uma taxa proporcional a energia consumida em R4 pelo Setor de Interesse. Mamade et al. (2017), também considera dados anuais e neste trabalho são analisados dados semanais normalizados para dados mensais e anuais, uma vez que a coleta de dados ser de apenas 7 dias.

Para fazer a avaliação simplificada, foi preciso realizar a coleta de dados para calcular os componentes do balanço energético que não requerem modelagem hidráulica. O indicador de desempenho de consumo de energia padronizado ($\text{kWh/m}^3/100\text{m}$) da IWA (Ph5), bem como os indicadores E2 e E3 foram calculados, permitindo a comparação da eficiência dos sistemas de bombeamento.

A Tabela 23 apresenta os valores de referência atribuídos para a eficiência energética das estações elevatórias.

Tabela 23. Valores de referência atribuídos para a eficiência energética das estações elevatórias. Fonte: IWA, (2000).

Eficiência Energética	Indicador de Desempenho Ph5	Avaliação
< 50%	Valores acima de $0,54 \text{ kWh/m}^3/100\text{m}$	Operação Insatisfatória
$50\% > e < 68\%$	$0,54 \text{ kWh/m}^3/100\text{m}$	Operação Aceitável
$68\% > e 100\%$	De $0,40 \text{ kWh/m}^3/100\text{m}$ à $0,27 \text{ kWh/m}^3/100\text{m}$	Operação Eficiente

Fonte: O autor.

O consumo médio de energia ponderado pelo volume anual de água elevado em R3 foi obtido por meio do valor de kWh consumido pelos dois conjuntos motor-bombas em outubro de 2014. Esse dado foi fornecido pela conta de energia da SAAE referente ao setor R3, como pode ser visto na Figura 22. A média da vazão de água elevada pelos dois conjuntos nos 7 dias de campanha foi de $933,13 \text{ m}^3$, normalizado para média mensal este valor chega a $27.993,95 \text{ m}^3$ e normalizado para média anual a $340.593,05 \text{ m}^3$.

Com base nesses dados, foi possível calcular o indicador de eficiência em instalações elevatórias da IWA ou consumo de energia padronizado médio para o setor de estudo, resultando em $0,63 \text{ kWh/m}^3$, correspondendo a um nível de serviço com alto consumo energético comparado aos 5 estudos da Tabela 8 que apresentaram média de $0,19 \text{ kWh/m}^3$ para as estações elevatórias. O consumo específico de água (kWh/m^3) não mede a eficiência, mas serve de referência para comparar uma bomba com ela mesma em períodos diferentes ou com outros conjuntos de outros sistemas.

Com o valor médio anual do consumo de energia por m³ de água foi possível calcular o indicador de eficiência em instalações elevatórias da IWA (Ph5) ou consumo de energia padronizado médio para o setor de estudo. Para chegar ao resultado foi necessário utilizar o fator de uniformização e somente assim obter ao valor de eficiência energética de 2,38 kWh/m³/100m ou 11%, correspondendo a um nível de serviço com baixa eficiência energética (serviço insatisfatório ou operação ineficiente) de acordo com a IWA e Tabela 23.

A Tabela 24 exemplifica como foi elaborado o consumo de energia padronizado da IWA, resultando no consumo médio de energia de bombeamento no sistema por 1 m³ a 100 m de altura manométrica.

Tabela 24. Consumo de energia padronizado da IWA.

Bombas	Volume elevado (m ³)	Energia consumida (kWh)	Altura manométrica (m)	Fator de uniformização (m ³ /100m)	Eficiência energética (kWh/m ³ /100m)	Eficiência energética (%)	Avaliação
1 e 2	340.593,05	215.640,00	42	143.049,08	2,38	11%	Operação Ineficiente

Fonte: O autor.

O indicador Ph4 da IWA mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético. O indicador demonstra a utilização da capacidade de bombeamento (%), sendo este o somatório para todos os grupos motor-bomba instalados (número de horas de funcionamento no dia de maior consumo energético durante o período de referência x potência nominal) / (potência nominal utilizável dos sistemas de bombeamento x 24) x 100. A estação elevatória de R3 apresentou para o indicador Ph4 o valor de 77,82%. Este valor demonstra a ociosidade da capacidade dos dois conjuntos motor-bombas, uma das causas pode ser o dimensionamento incorreto da estação.

O indicador da IWA Ph6 mede o consumo de energia reativa (%), sendo calculado o consumo de energia reativa no bombeamento durante o período de referência e energia total consumida nas estações elevatórias durante o período de referência x 100. A energia reativa medida no maior dia de consumo durante a campanha foi de 831,49 kVAr com um consumo de energia elétrica de 691 kWh. O valor do indicador Ph6 foi de 120,33%.

O indicador Op23 da IWA calcula as perdas de água por ramal (m³/ramal/ano) (Perdas de água durante o período de referência x 365 / duração do período de referência) / número de

ramais. O volume médio de água perdida no ano de 2014 no setor de estudo (a partir do reservatório R4) foi de 26.675,80 m³. O setor de estudo possui 413 ligações (ramais). Com esses dados foi possível calcular o indicador Op23, resultando no valor de 64,59m³/ramal/ano.

O indicador Op24 calcula as perdas de água por comprimento de tubulação (m³/km/dia), sendo dividida as perdas de água durante o período de referência pela duração do período de referência pelo comprimento das tubulações. Para este indicador foram calculadas as perdas de água após o reservatório R4, pegando apenas o setor de estudo. O volume médio diário de água perdido no setor de estudo foi de 73,08m³. O comprimento total das tubulações após o reservatório R4 é de 19,39 km. Com esses dados foi possível calcular o indicador Op24, resultando em 3,77m³/km/dia.

Tabela 25. Resultados para os Indicadores IWA.

Indicador	Resultado
Ph4	77,82%
Ph5	2,38 kWh/m ³ /100m
Ph6	120,33 %
Op23	64,59 m ³ /ramal/ano
Op24	3,77 m ³ /km/dia

Fonte: O autor.

A Figura 56 apresenta a energia em excesso por consumo autorizado (E2), dividido pelos componentes de energia natural de entrada e energia de entrada do eixo. O E2 médio ponderado pelo consumo autorizado é de 0,52578 kWh/m³. O indicador E2 indica o potencial teórico de redução de energia por volume de consumo autorizado. Quanto menor o valor deste indicador melhor é a eficiência do sistema.

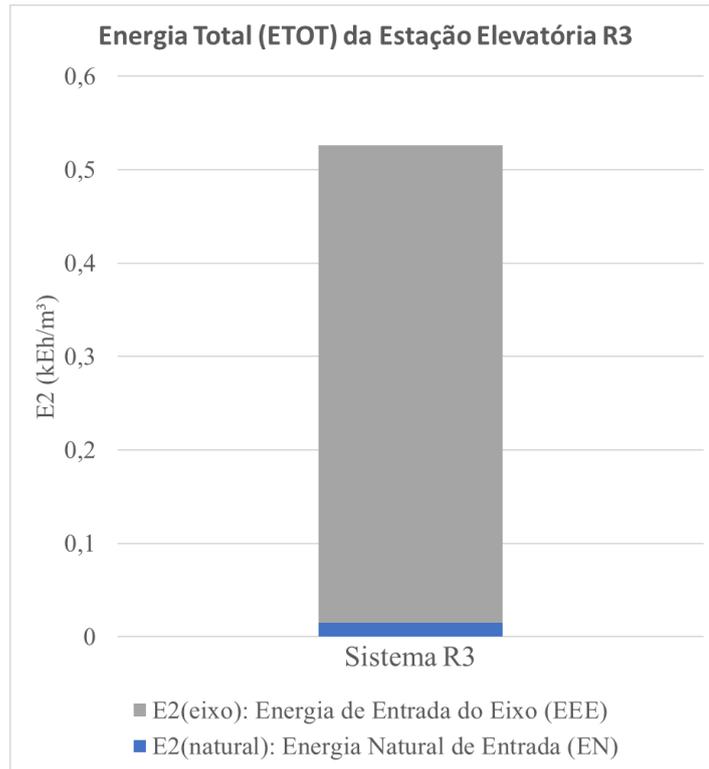


Figura 56. Energia total em R3.

Fonte: O autor.

A Figura 57 apresenta a relação da energia máxima em excesso (E3) dividida pelos componentes de energia dissipada nas tubulações (sistema), bombas e nas perdas. O E3 médio ponderado pela energia mínima é 1,439, significando essa energia em excesso representa 1,439 vezes a energia mínima necessária. O valor do indicador E3 deve ser o menor possível, o potencial de melhoria da bomba é dado pela avaliação do E3 com a energia dissipada nas bombas.

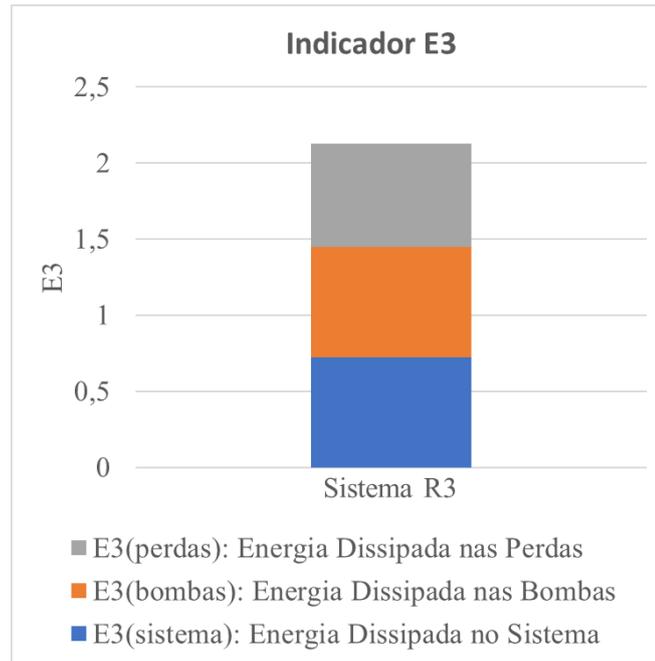


Figura 57. Indicador aplicado em R3.

Fonte: O autor.

Os resultados globais também mostram um significativo potencial de economia de energia: 40% por meio de redução de perda de água, 30% para mudanças na operação de rede e layout e 30% para redução de ineficiência de tubulação.

A avaliação completa para áreas de análise crítica requer o cálculo do balanço energético completo. Os modelos hidráulicos fornecidos devem ser adequadamente calibrados (por exemplo, distribuição de demanda e reservatórios) usando as medições de pressão e a vazão ao longo da rede. Foi utilizado o modelo hidráulico do EPANET elaborado por Goulart (2015) e o algoritmo desenvolvido por Mamade et al. (2017). A Figura 66 do Anexo VIII ilustra o modelo utilizado para aplicar o balanço energético completo do setor de estudo. O Anexo VII demonstra os resultados da simulação da rede de estudo. Foi possível analisar que os resultados são muito próximos aos calculados, validando os o estudo.

A área selecionada pertence apenas a uma parte da cidade escolhida no Sul de Minas Gerais. O setor de aplicação do balanço energético completo começa a partir do reservatório R4, pois o simplificado foi aplicado entre os reservatórios R3 e R4. No setor de estudo temos aproximadamente 1652 consumidores de água. O fornecimento de água dessa área abastece 413 ligações a uma média diária de 263,557 m³/dia, sem diferenciar o comportamento sazonal de consumo de água. A água não proveniente da receita representa 27,73% do volume de entrada.

O resultado do balanço energético completo para o setor de estudo baseado na metodologia de Mamade et al. (2017) e adaptado para a análise é apresentado na Tabela 26.

Tabela 26. Balanço energético baseado na metodologia de Mamade (2017) – avaliação simplificada.

Energia Natural de Entrada: $E_N = 1,69\%$	Energia Total de Entrada do Sistema: $E_{TOT} = 100\%$	Energia associada com o consumo autorizado $E_{CA} = 72,27\%$	Energia associada com a água fornecida aos consumidores = 42,49%	Energia mínima requerida = 41%	
			Energia dissipada devido às perdas de carga contínuas e singulares = 29,78%	Energia Excedente = 1,49%	
				Energia Recuperada = 0%	Atrito da Tubulação = 10,74%
					Válvulas redutoras = 1,74%
					Ineficiência das estações de bombeamento = 17,30%
		Energia associada com as perdas de água: $E_{PA} = 27,73\%$	Energia dissipada no consumo dos nós = 10,74%	Micro usina hidrelétrica: $E_{REC} = 0\%$	
				Associado com o consumo autorizado = 0%	
			Energia dissipada devido às perdas de carga contínuas e singulares = 19,11%	Associado com as perdas de água = 0%	
				Atrito da Tubulação = 0,38%	Válvulas redutoras = 0%
					Ineficiência das estações de bombeamento = 18,73%
Energia de Entrada do Eixo = 98,31%			Micro usina hidrelétrica: $E_{REC} = 0$		

Fonte: Adaptado de Mamade et al. (2017).

O Anexo VI demonstra os resultados da simulação da rede de estudo para a avaliação simplificada. O Anexo VIII demonstra a Figura do modelo hidráulico utilizado para a avaliação simplificada.

Simulações foram realizadas considerando os padrões de consumo diário, com um intervalo de tempo de 1 minuto. Os resultados mostram que aproximadamente 72,27% da energia está associada ao consumo autorizado e 27,73% com as perdas de água. Dos 72,27% de energia, cerca de 42,49% são entregues ao reservatório R4 e o restante é perdido ou dissipado. Nesse caso, ações para reduzir as perdas de água nos nós de consumo e diminuir o atrito da tubulação podem ser mais eficazes do que atuar na melhoria da eficiência das bombas.

Para a avaliação completa para áreas de análise crítica foi necessário avaliar o sistema completo, do reservatório R3, estação elevatória em R3, reservatório R4 e a água distribuída em todos os nós do setor de estudo. O cálculo do balanço energético foi efetuado via modelos hidráulicos calibrados (por exemplo, dados da bomba, curva da bomba, padrão de consumo, distribuição de demanda e reservatórios) usando as medições de pressão e a vazão ao longo da rede medidos em campo. Foi utilizado a o modelo hidráulico do EPANET elaborado por Goulart (2015) e adaptado para este presente trabalho e também o algoritmo desenvolvido por Mamade et al. (2017).

A Figura 58 ilustra o modelo utilizado para aplicar o balanço energético completo do setor de estudo. O Anexo VII demonstra os resultados da simulação da rede de estudo para a avaliação completa. Foi possível analisar que os resultados são muitos próximos aos calculados validando os resultados.

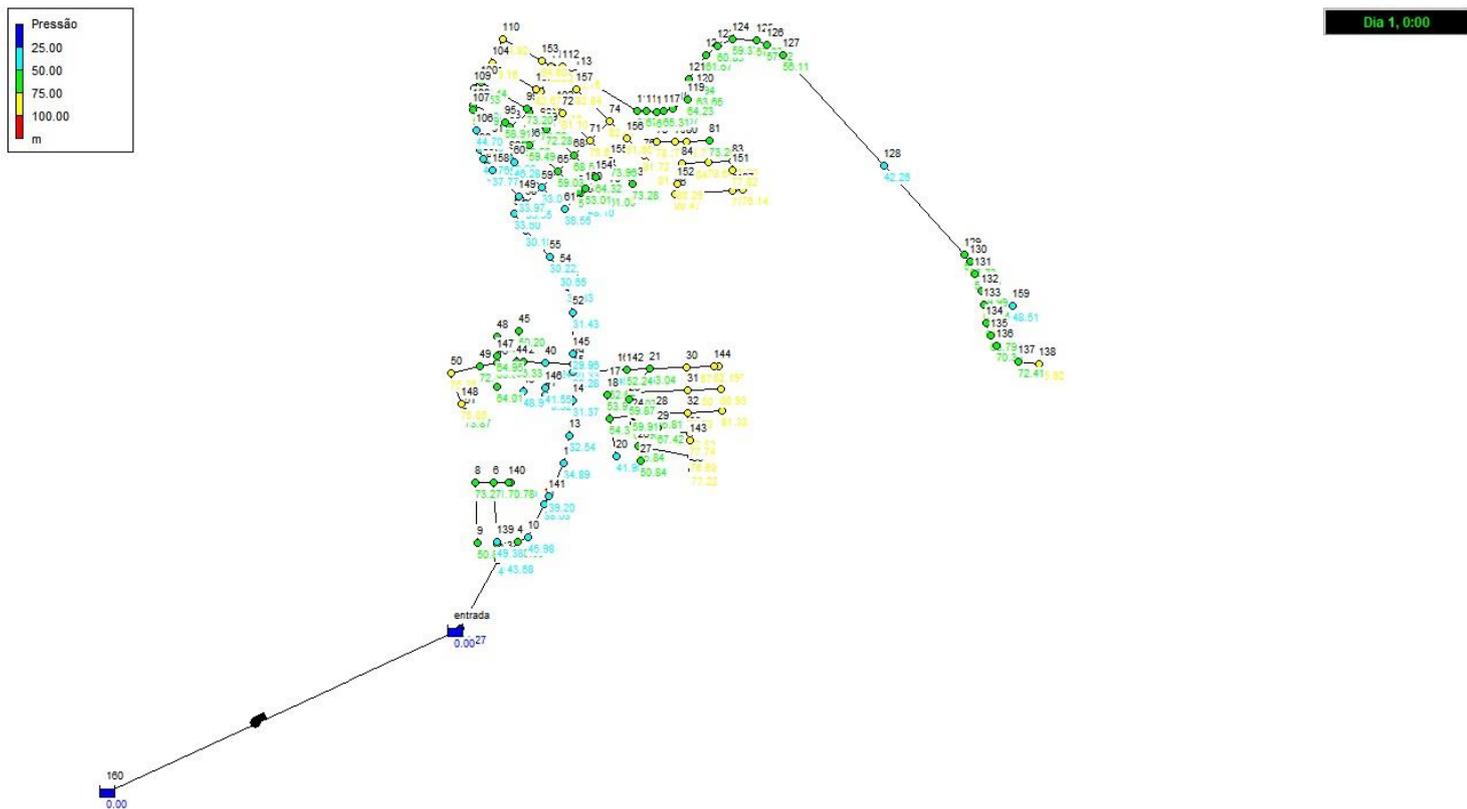


Figura 58. Modelo hidráulico para avaliação completa.

Fonte: Adaptado de Goulart (2015).

A área selecionada pertence a todo sistema estudado da cidade escolhida no Sul de Minas Gerais (De R3 a R4 e aos consumidores do setor de interesse). O resultado do balanço

energético completo para o setor de estudo baseado na metodologia de Mamade et al. (2017) e adaptado para a análise é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27. Balanço energético baseado na metodologia de Mamade et al. (2017) – avaliação completa.

Energia Natural de Entrada: $E_N = 1,71\%$	Energia Total de Entrada do Sistema: $E_{TOT} = 100\%$	Energia associada com o consumo autorizado $E_{CA} = 68,93\%$	Energia associada com a água fornecida aos consumidores = 41,08%	Energia mínima requerida = 39,47%
			Energia dissipada devido às perdas de carga contínuas e singulares = 27,85%	Energia Excedente = 1,61%
				Atrito da Tubulação = 4,92%
				Válvulas redutoras = 0,93%
				Ineficiência das estações de bombeamento = 22,00%
				Micro usina hidrelétrica: $E_{REC} = 0\%$
		Energia Recuperada = 0%	Associado com o consumo autorizado = 0%	
		Energia associada com as perdas de água: $E_{PA} = 31,07\%$	Energia dissipada no consumo dos nós = 9,71%	Associado com as perdas de água = 0%
				Atrito da Tubulação = 0,48%
				Válvulas redutoras = 0%
				Ineficiência das estações de bombeamento = 20,88%
				Energia dissipada devido às perdas de carga contínuas e singulares = 21,36%
Energia de Entrada do Eixo = 98,29%				

Fonte: Adaptado de Mamade et al. (2017).

Neste modelo foram considerados o reservatório R3, os conjuntos motor-bomba B1 e B2, o reservatório em R4 e os nós de consumo do setor de estudo, delimitando o sistema.

Esta análise foi feita a fim de avaliar a eficiência energética no sistema de abastecimento de água. Nesta etapa teve-se um modelo hidráulico calibrado, buscando fornecer uma análise geral dos principais componentes de consumo de energia. Para isto, foi utilizado o software EPANET. Os resultados desse balanço energético exigiram dados do balanço hídrico.

Simulações foram realizadas, considerando os padrões de consumo diário, com um intervalo de tempo de 1 minuto. Os resultados mostram que aproximadamente 68,93% da energia está associada ao consumo autorizado e 31,07% com as perdas de água. Dos 68,93 de

energia, cerca de 39,43% são entregues efetivamente aos consumidores e o restante é perdido ou dissipado na rede.

A aplicação da avaliação completa do setor de estudo do SAAE, demonstrou que os resultados do balanço energético da avaliação simplificada e os resultados da avaliação completa do sistema apresentaram valores próximos, validando os resultados.

A dissipação de energia tem dois componentes: um associado ao consumo autorizado, calculado com base na simulação sem perdas de água ($d = CA/TOT$) e outro associado às perdas de água, computado pela diferença de duas simulações: com ($d=1$) e sem perdas de água. Quando o sistema apresenta maiores perdas por atrito (maior taxa de vazão), as pressões a montante das válvulas são menores, resultando em um valor negativo do segundo componente. Os valores negativos significam que as válvulas dissipam menos energia numa rede com perdas de água do que sem perdas, uma vez que essa energia já fora dissipada anteriormente no atrito do tubo.

A aplicação da avaliação simplificada no setor de estudo do SAAE, mostrou que o sistema usa mais do que o dobro da energia mínima exigida por seus consumidores, o que revela um potencial significativo de economia de energia: 27,73% a 31,07% por redução de perda de água, 29,78% por mudanças na operação e layout da rede e 42,03 % de redução de ineficiência da bomba. Uma avaliação completa foi apresentada para o setor de estudo a fim de ilustrar outros tipos de ineficiência. O diagnóstico fornecido pelo balanço energético completo permite um entendimento para identificar quais componentes são responsáveis por maiores perdas de energia no sistema. Em termos gerais, as altas ineficiências da bomba exigem reavaliar as necessidades de uma estação de bombeamento por meio do estudo de novas maneiras de suprir uma determinada área de maneira menos intensiva em termos de energia ou de reprojeter o sistema, sendo:

- O excesso de energia nos nós exige gerenciamento de pressão.
- A alta taxa de atrito nas tubulações indica que a reabilitação e / ou a substituição da tubulação deve ocorrer.
- A alta perda de carga nas válvulas pode indicar um potencial de recuperação de energia.
- A alta perda de energia nos nós de consumo exige uma análise mais focada nos componentes do balanço hídrico das perdas reais e aparentes.

Este trabalho é mais um passo importante no sentido de correlacionar a água e a energia nos SAAE's, bem como pesquisar e quantificar o impacto das soluções integradas na eficiência geral de um sistema de abastecimento de água. Os cálculos são demonstrados no Anexo VI.

5.5. Eficiência energética

A capacidade teórica (nominal) de cada bomba é de uma vazão de 40 m³/h e altura manométrica total de 72 m. Nos ensaios de rendimento em campo, o conjunto B1 apresentou uma vazão de aproximadamente 37,8 m³/h, conforme Anexo II. O conjunto B2, em operação apresentou uma vazão de aproximadamente 22,7 m³/h, valor bem abaixo do nominal. Entretanto, a Vazão Média Total Bombeada para R4 do Conjunto B1 foi de 511,6250 m³/dia, uma média de 21,33 m³/h, com um pico máximo de 25,10 m³/h. Os valores do Conjunto B2 foram ainda menores: a Vazão Média Total Bombeada foi de 399,8517 m³/dia, uma média de 16,66 m³/h, com um pico máximo de 19,75 m³/h.

Como o setor de interesse consumiu somente 263,557 m³/dia de água em média, seriam necessárias apenas 7 horas de operação dos conjuntos para suprir a demanda de consumo de água do setor de estudo. Durante a campanha, apurou-se que os conjuntos ficavam em operação praticamente o dia todo. A vazão bombeada apenas pelo conjunto B1 supriria a demanda de consumo do setor de estudo, visto que foi verificado que a vazão bombeada apenas pelo conjunto B1 é bem maior do que é consumido pelo setor. Foi verificado que pode haver grandes perdas de água na distribuição entre R3 e R4, ou seja, o sistema parece ser superdimensionado. Não existe nenhuma forma de controle operacional para evitar acionamentos no período de ponta. O volume do reservatório superior é subutilizado. Os conjuntos de bombas estão funcionando fora do ponto nominal. O potencial de economia de energia do sistema pode chegar a mais de 22%, caso ocorra intervenções como as sugeridas.

A Figura 59 demonstra a vazão bombeada pelo conjunto B1 em relação à potência consumida pelo setor de estudo. Pode-se notar que existe um alto consumo de potência consumida mesmo quando a vazão diminui.

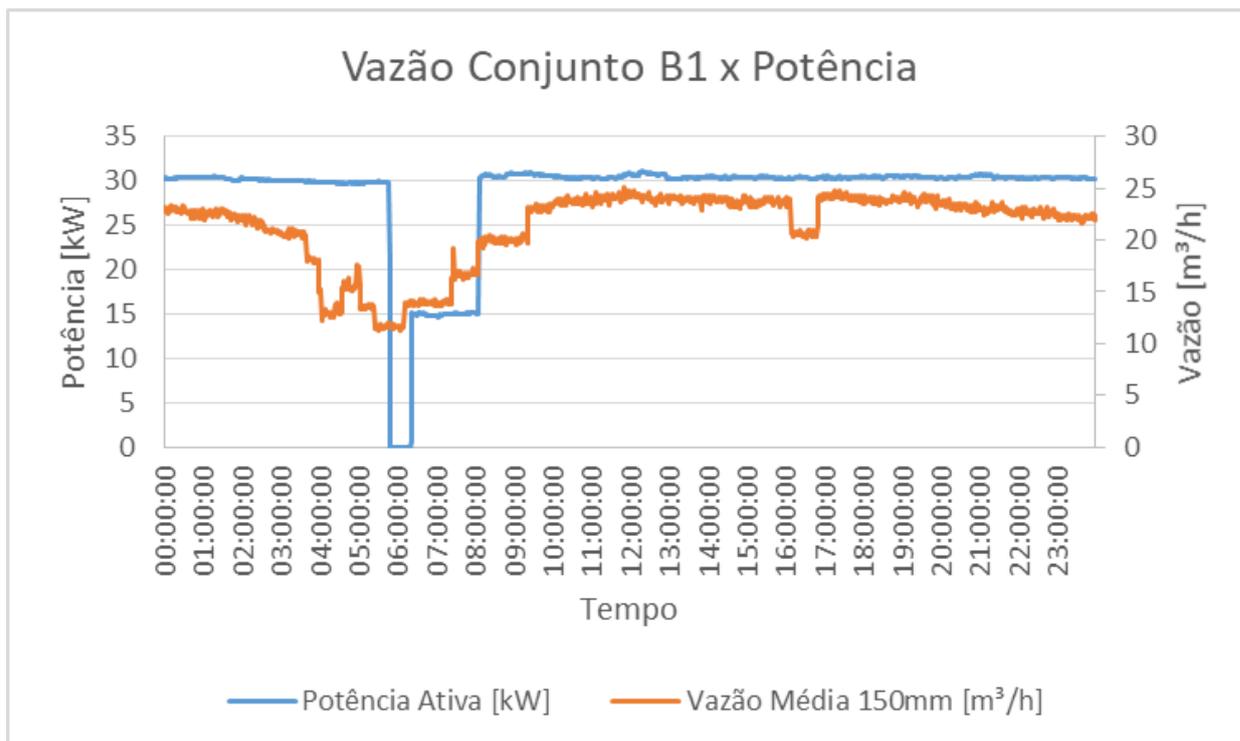


Figura 59. Vazão bombeada pelo conjunto B1 em relação a potência consumida pelo Setor de estudo.

Fonte: O autor.

Para medir a eficiência energética do setor de estudo deve-se saber a quantidade de energia necessária para operar os sistemas de distribuição de água. Como proposto por Lenzi et al. (2013) a Energia Mínima Inevitável ou Necessária (UME) é uma nova referência para avaliação de eficiência energética, dada na forma mais geral, a fim de ser extensível e aplicável à maioria das redes de água onde estão incluídas uma ou mais bombas. A Energia Mínima Necessária (UME) foi calculada para o dia de maior consumo energético durante a campanha (12/10/2014). O cálculo engloba os dois conjuntos motor-bombas B1 e B2. Dados como a diferença de altura manométrica de 46,98m, o peso específico da água (9810N/m^3) e a vazão bombeada pelos dois conjuntos no dia 12/10/2014 ($936,38\text{m}^3$), foram utilizadas para calcular a UME, resultando em um valor de $119,876\text{kWh/dia}$.

Para fazer o cálculo do indicador EEI é necessário calcular o valor de Econs (Energia efetivamente consumida pelas bombas) em uma avaliação diária. Nesse cálculo é avaliado além da energia efetivamente consumida pela bomba (EPC), a contabilização do possível excesso (ou déficit) do volume de água armazenado no reservatório R4 ao final do dia. A energia consumida pelas bombas no dia 12/10/14 foi de 691 kWh/dia , com uma eficiência energética

de 31,31% e altura média de 42m. A área da seção transversal do reservatório é 95,368m² e altura manométrica no reservatório retangular ao início do dia é de 0,53m e ao final de 0,57. No reservatório cilíndrico as alturas ficaram iguais, não sendo necessário seu cálculo.

A Tabela 28 apresenta a porcentagem de eficiência energética do setor de interesse proposta por Lenzi et al. (2013). O valor de 17,38% para o indicador EEI demonstra que o sistema não é eficiente e devem ser tomadas decisões e medidas que visem melhorar esse desempenho. Esse valor se aproxima do indicador de eficiência energética Ph5 da IWA (11%), conforme demonstrado no item 5.4 deste trabalho.

Tabela 28. Tabela de eficiência energética do setor.

Tabela de Eficiência Energética do Setor

$UME = \gamma * W * (H_{ref} - H_{ups}) / 360000 = 9810 * 936,38 * 46,98 / 3600000$	119,876 kWh/dia
$E_{cons} = 691 - \frac{9810 * 10,4 * 9,17 * (0,57 - 0,53) * 42}{0,3131 * 3600000}$	689,60 kWh/dia
Indicador de Eficiência Energética (EEI): $EEI = \frac{UME}{E_{cons}} = \frac{119,876}{689,60}$	17,38%

Fonte: O autor.

A Tabela 29 apresenta os dados referente ao consumo relativo de energia elétrica do setor de estudo do ano de 2014.

Tabela 29. Consumo relativo de energia elétrica - ano de 2014 - índice de perdas = 27,73%.

Consumo Relativo de Energia Elétrica - Ano de 2014 - Índice de Perdas = 27,73%			
	Consumo Elétrico do Setor de Interesse [kWh/ano]	Valor da Energia Consumida [R\$/ano]	Custo Médio de Energia Elétrica por Consumo [R\$/m³]
Captação	39.628,92	R\$ 16.644,15	R\$ 0,175
ETA	21.071,76	R\$ 8.850,14	R\$ 0,093
R3	62.905,44	R\$ 26.420,28	R\$ 0,280
Total	123.606,12	R\$ 51.914,57	R\$ 0,548

Fonte: O autor.

O custo médio para a produção e distribuição de água do SAAE pode ser estimada por meio da seguinte Equação:

$$\text{Índice de Custo médio de energia por m}^3 = IT \times \text{Tarifa}$$

Índice de Custo médio de energia por m³ = 1,302 kWh/m³ * 0,42 R\$/kWh

Índice de Custo médio de energia por m³ = 0,548 R\$/m³

Quando se considera as perdas em todo o sistema de abastecimento (SAAE), pode-se fazer uma relação direta do índice de perdas de água. O custo médio de elétrica perdida por cada m³ de água é demonstrado na Tabela 30.

Tabela 30. Consumo relativo as perdas de energia elétrica - ano de 2014 .

Perdas de Energia Elétrica - Ano de 2014 - Índice de Perdas = 27,73%			
	Perdas de Energia[kWh/ano]	Valor das Perdas de Energia Elétrica [R\$/ano]	Custo Médio de Energia Elétrica Perdida [R\$/m³]
Captação	218.906,17	R\$ 91.940,59	R\$ 0,175
ETA	165.062,27	R\$ 69.326,15	R\$ 0,093
R3	60.296,11	R\$ 25.324,37	R\$ 0,278
Total	444.264,55	R\$ 186.591,11	R\$ 0,547

Fonte: O autor.

A Tabela 31 apresenta os dados tarifários do SAAE em outubro/2014.

Tabela 31. Dados tarifários empresa elétrica Bragantina S/A.

Dados Tarifários Empresa Elétrica Bragantina S/A

Valor da Tarifa de Energia	R\$ 0,168742
Valor da Tarifa de Distribuição	R\$ 0,152923
Valor da Tarifa Total (kWh) já com os impostos inclusos	R\$ 0,42
Tipo de Tarifa	Convencional
Grupo de Tensão	B
Fase	Trifásico
Tensão Nominal Contratada	127/220V

Fonte: O autor.

O custo da energia elétrica no sistema de abastecimento de água do município e setor de estudo pode ser representado na Figura 60 e 61, em que foi considerado o valor da taxa de perdas de água do setor de estudo em todo o sistema. É possível notar que o sistema de elevação é a área que mais consome energia, seguido das perdas de água, captação e estação de tratamento de água. A redução dessas perdas de água pode trazer benefícios econômicos ao SAAE. Elas podem acontecer por meio de uma manutenção preventiva mais assertiva e pelo gerenciamento e planejamento do horário de funcionamento das bombas, evitando pressões excessivas nos nós e possíveis vazamentos por rupturas, assim como troca dos conjuntos motor-bombas ineficientes ou até mesmo troca da tubulação.

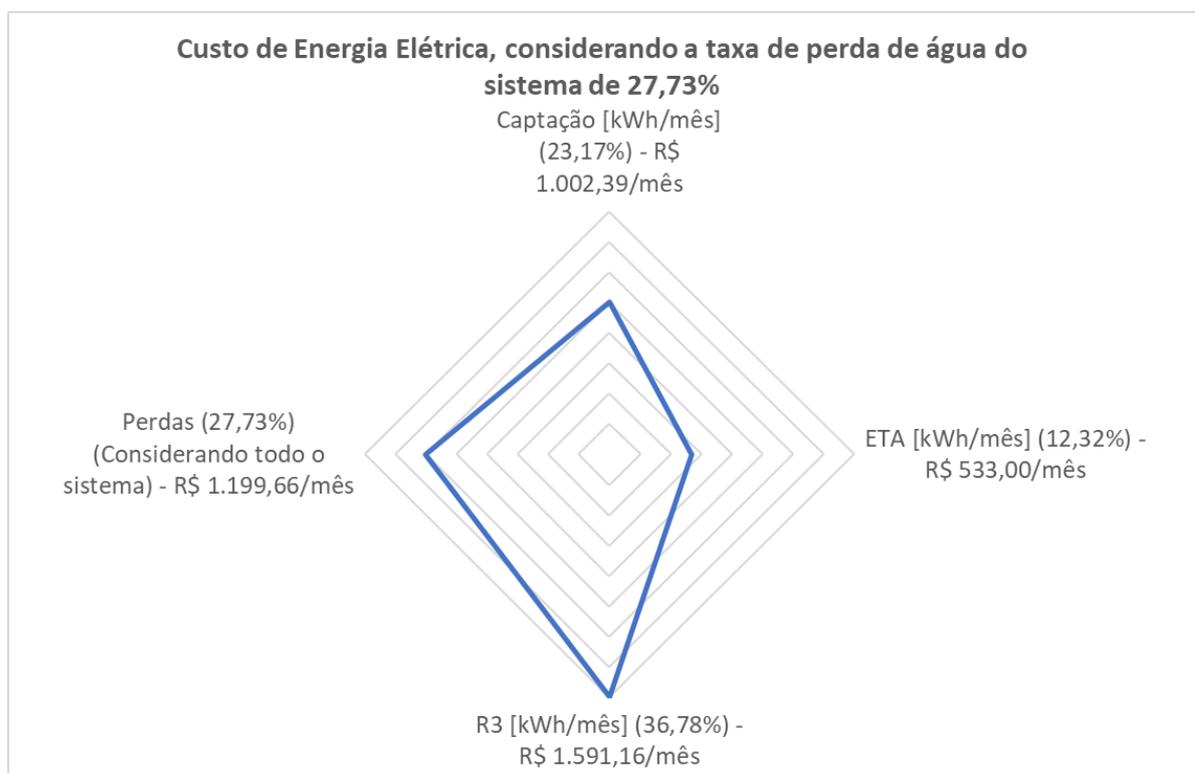


Figura 60. Custo de energia elétrica versus taxa de perda de água do sistema.

Fonte: O autor.

A Figura 61, demonstra o custo da energia elétrica de cada processo do sistema de abastecimento de água no período de estudo.

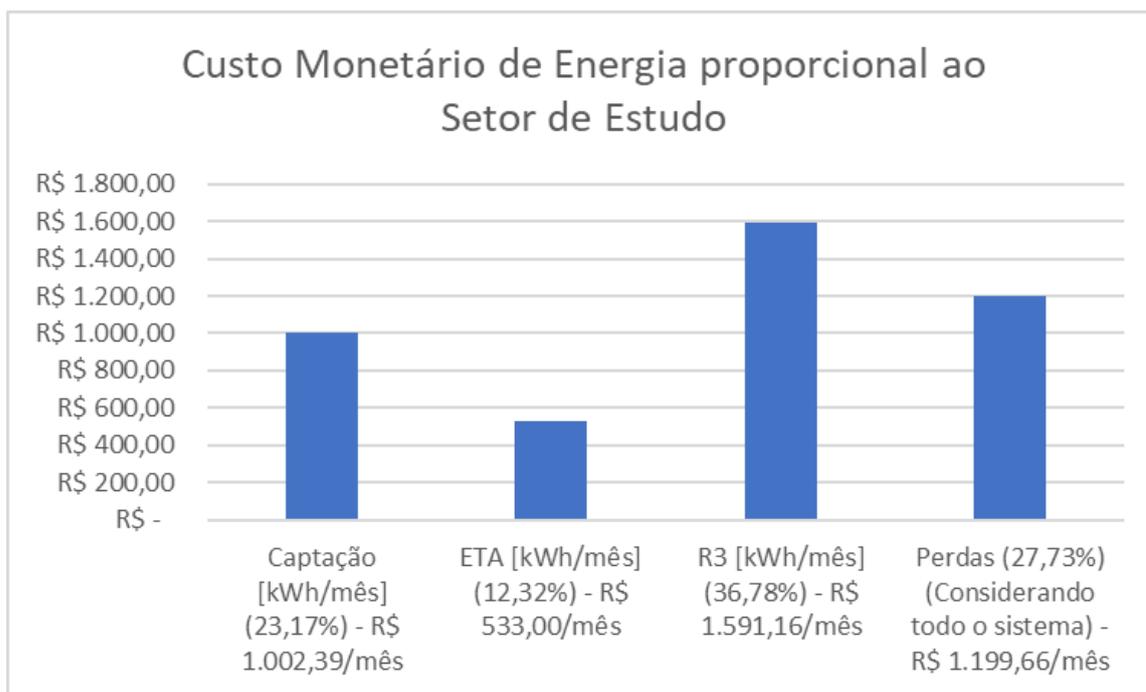


Figura 61. Custo monetário de energia proporcional ao setor de estudo.

Fonte: O autor.

Como a campanha foi realizada em 2014 e até o ano de 2018 o custo por kWh/m³ cresceu muito, foi elaborada uma estimativa do crescimento da população do setor de estudo baseado nos dados de estimativa do crescimento da população brasileira (IBGE, 2018). A Tabela 32 demonstra os valores estimados para o crescimento populacional do setor de estudo. No ano de 2018 a população estimada para o setor de estudo foi de 2.098, representando um aumento de aproximadamente 27%.

Tabela 32. Estimativa de crescimento populacional do setor de estudo.

Ano	Estimativa do crescimento da população brasileira (IBGE, 2018)	População Estimada do Setor de Estudo
2014	0,90%	1652
2015	0,83%	1666
2016	0,80%	1799
2017	0,80%	1943
2018	0,80%	2098

Fonte: O autor.

A Figura 62 ilustra os valores estimados para o crescimento populacional do setor de estudo de 2014 a 2018.

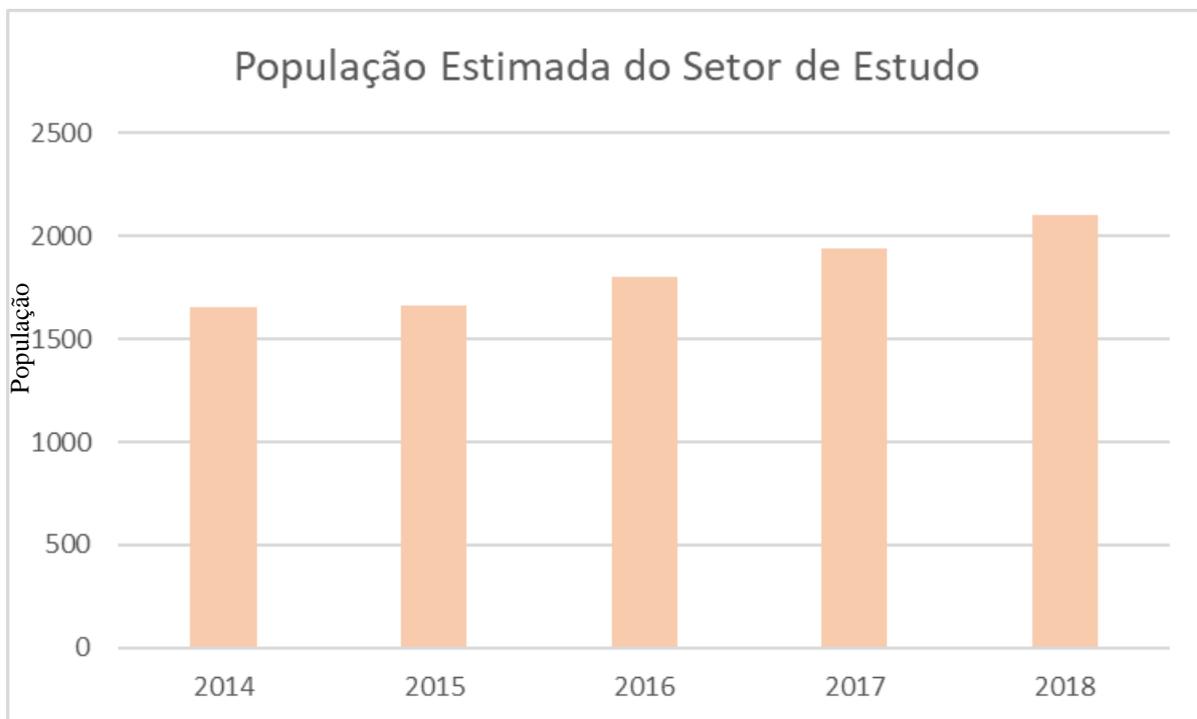


Figura 62. Estimativa de crescimento populacional do setor de estudo.

Fonte: O autor.

Estimado o crescimento populacional e sabendo que o consumo diário de água por pessoa do setor de estudo é de aproximadamente $0,160\text{m}^3/\text{dia}$, foi possível calcular o aumento do consumo de água do setor de estudo.

A Figura 63 demonstra a estimativa do crescimento de consumo de água pelo crescimento populacional do setor de estudo.

Estimativa do Crescimento do consumo de Água do Setor de Estudo (m³)

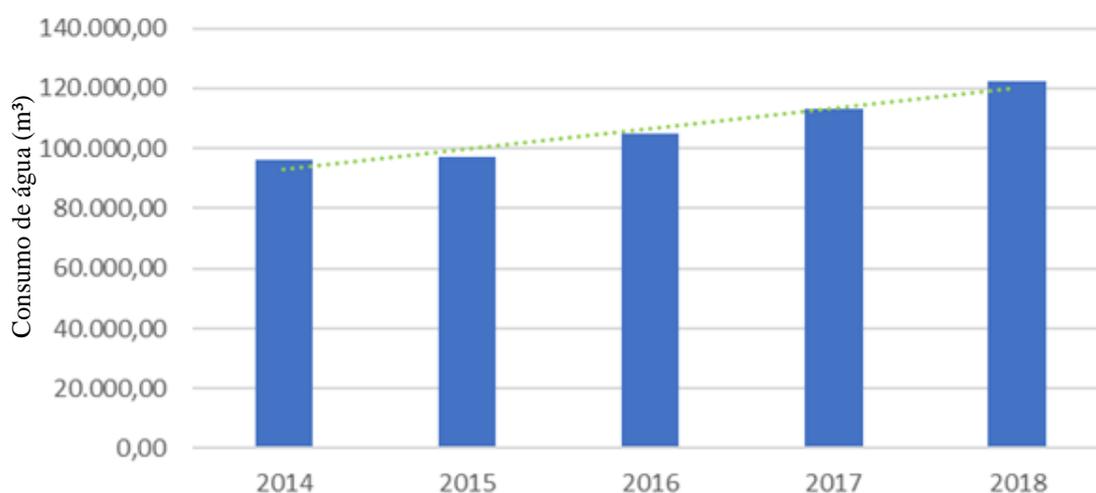


Figura 63. Estimativa do crescimento de consumo de água pelo crescimento populacional do setor de estudo.

Fonte: O autor.

A Tabela 33 apresenta os valores calculado do aumento do consumo de água pelo crescimento populacional do setor de estudo, chegando ao consumo de 122.169,55 m³ de água no ano de 2018.

Tabela 33. Estimativa de crescimento populacional versus aumento do consumo de água do setor de estudo.

Ano	Estimativa População do Setor de Estudo (IBGE, 2018)	Estimativa do Crescimento do consumo de Água do Setor de Estudo (m ³)
2014	1652	96.198,33
2015	1666	97.013,57
2016	1799	104.758,35
2017	1943	113.143,68
2018	2098	122.169,55

Fonte: O autor.

Com a estimativa do aumento da população do setor de estudo e do aumento do consumo, considerando a mesma taxa de perdas de água (27,73%) foi possível estimar a quantidade do volume médio de perdas de água para o ano de 2018 (33.877,62m³). O indicador de consumo específico de água para a delimitação da área estudada resultou em um valor de 1,302kWh/m³, permitindo calcular a quantidade de energia perdida no ano de 2018 (44.108,66kWh). É possível notar que as perdas em 05 anos, apenas para o setor de estudo, podem resultar em um alto consumo de energia elétrica desperdiçada, chegando a um valor de 192.539,13 kWh.

A Tabela 34 apresenta a relação da quantidade de energia perdida pelos vazamentos do setor de estudo versus estimativa de crescimento de consumo pelo crescimento populacional.

Tabela 34. Relação da quantidade de energia perdida pelos vazamentos do setor de estudo versus estimativa de crescimento de consumo pelo crescimento populacional.

Ano	Volume Médio de Perdas de Água Anual (m ³) (27,73%)	Consumo de Energia Específico de água (kWh/m ³), o custo de energia com a Captação, Estação de Tratamento e Estação Elevatória	Quantidade de energia perdida (kWh/ano)
2014	26.675,80	1,302	34.731,89
2015	26.901,86	1,302	35.026,22
2016	29.049,49	1,302	37.822,44
2017	31.374,74	1,302	40.849,91
2018	33.877,62	1,302	44.108,66
TOTAL	147.879,51	-	192.539,12

Fonte: O autor.

A Figura 64 representa a relação do volume de água perdida no setor de estudo anualmente com o valor monetário gasto com essas perdas.

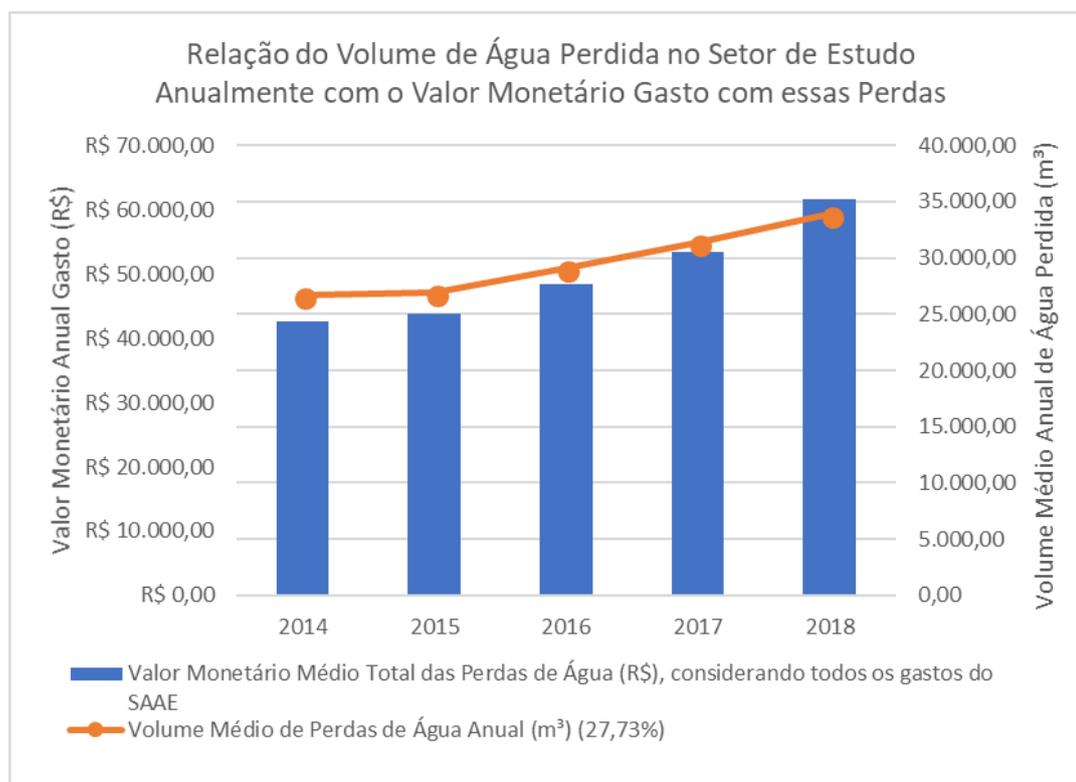


Figura 64. Relação do volume de água perdida no setor de estudo anualmente com o valor monetário gasto com essas perdas.

Fonte: O autor.

O site da CEMIG fornece os dados histórico das tarifas cobradas por kWh, com isso foi possível estimar os valores do Índice de Custo (R\$/m³), considerando todos gastos do SAAE, o Valor Monetário Médio Total das Perdas de Água (R\$), considerando todos os gastos do SAAE. Foi estimado também o Valor Monetário das Perdas de Água, utilizando o Índice de Custo médio de energia por m³, considerando o custo de energia com a Captação, Estação de Tratamento e Estação Elevatória. É possível notar que em 5 anos essas perdas, apenas para o setor de estudo, podem resultar em um alto prejuízo, chegando a um valor monetário de R\$ 249.949,06.

Tabela 35. Relação do valor monetário perdida pelos vazamentos do setor de estudo versus estimativa de crescimento de consumo pelo crescimento populacional.

Ano	Volume Médio de Perdas de Água Anual (m ³) (27,73%)	Consumo de Energia Específico de água (kWh/m ³), o custo de energia com a Captação, Estação de Tratamento e Estação Elevatória	Valor da Tarifa de Energia Elétrica (R\$/kWh) - Dados obtidos pelo Site da CEMIG	Valor da Energia, considerando o custo de energia com a Captação, Estação de Tratamento e Estação Elevatória (R\$/kWh)	Valor Monetário das Perdas de Água, utilizando o Índice de Custo médio de energia por m ³ , considerando o custo de energia com a Captação, Estação de Tratamento e Estação Elevatória	Índice de Custo (R\$/m ³), considerando todos gastos do SAAE (Andrade, 2016)	Valor Monetário Médio Total das Perdas de Água (R\$), considerando todos os gastos do SAAE
2014	26.675,80	1,302	0,420 #	0,548	R\$ 14.618,34	R\$ 1,60	R\$ 42.681,28
2015	26.901,86	1,302	0,44520 *	0,580	R\$ 15.593,68	R\$ 1,63	R\$ 43.894,44
2016	29.049,49	1,302	0,47191*	0,614	R\$ 17.848,86	R\$ 1,67	R\$ 48.408,93
2017	31.374,74	1,302	0,50023 *	0,651	R\$ 20.434,22	R\$ 1,70	R\$53.440,45
2018	33.877,62	1,302	0,58684 *	0,764	R\$ 25.884,72	R\$ 1,82	R\$ 61.523,98
TOTAL	147.879,51	-	-	-	R\$ 94.379,82	-	R\$ 249.949,06

Fonte: O autor.

Legenda:

* Dados obtidos pelo Site da CEMIG.

Dado obtido pela Conta de Energia Elétrica do SAAE 2014.

5.6. Impactos ambientais da produção de água

Segundo Balestieri e Vilanova (2014), o consumo médio de energia elétrica da maior companhia de tratamento e abastecimento água no Brasil é de 0,69kWh/m³, com uma estimativa de perdas de água a uma taxa de aproximadamente 40%.

A matriz energética brasileira é bem diversificada, sendo que boa parte da energia elétrica gerada se deve às usinas hidrelétricas. As emissões para a geração de energia no Brasil em 2012 para 1 m³ de água nos municípios brasileiros liberaram 0,0504 kg de CO₂eq, sendo

0,0141 kg CO_{2eq}/m³ associados aos volumes de perda de água. Em 2012, os sistemas brasileiros de abastecimento de água representaram mais de 1,9% do consumo de energia elétrica (BALESTIERI E VILANOVA, 2014).

Silva (2019), estudou a análise do ciclo de vida da produção de 1m³ de água em um sistema de abastecimento de água no Sul de Minas Gerais. Para cada 1m³ de água captado, tratado e distribuído gera-se 0,152 kg de CO_{2eq} / 1 m³ de água. Nesta análise foi considerado todo o ciclo de vida dentro de um sistema de abastecimento de água, sendo os elementos de infraestrutura (tubulação, concreto e construções) e também o de operação (eletricidade, combustível dos equipamentos e produtos químicos).

No setor estudado são consumidos anualmente uma média total de 96.198,33m³ de água, resultando em quase 15 toneladas de CO_{2eq}/ano emitido para atmosfera. Dessa quantidade, 4 toneladas de CO_{2eq} emitido para atmosfera poderiam ser evitados em virtude da redução das perdas de água (27,73%).

Analisando a estimativa do período de 2014 a 2018, o setor de estudo consumiu 533.283,48m³ de água, sendo 81 toneladas de CO_{2eq} emitido para atmosfera. Dessa quantidade, 22 toneladas de CO_{2eq} emitido para atmosfera poderiam ser evitados em virtude da redução das perdas de água (27,73%).

De acordo com Silqueira et al. (2018), essas emissões podem acarretar danos à saúde da população humana através das substâncias cancerígenas, metais pesados em efluentes, mudanças climáticas pelo impacto indireto das mudanças climáticas (gases do efeito estufa, CO₂, NH₄, N₂O) na saúde humana devido ao aumento antecipado da temperatura, aumento do nível do mar e outros impactos. Outros danos como à qualidade do ecossistema (ar, água e solo) causados por substâncias ecotóxicas. Dano aos recursos causados pela depleção de minerais. Efeitos Respiratórios causados por substâncias orgânicas: Efeitos respiratórios de poluentes orgânicos emitidos para o ar. Dano à qualidade do ecossistema causado pela acidificação e eutrofização devido à deposição de substâncias inorgânicas. Dano aos recursos causados pelo esgotamento de combustíveis fósseis e impactos das mudanças na cobertura da terra na qualidade do ecossistema (uso da terra).

Esses resultados apresentam a baixa eficiência dos sistemas de água brasileiro em relação as perdas de água. A redução desses vazamentos poderia contribuir para diminuir as emissões de CO₂, minimizando os impactos ambientais e os danos à saúde humana.

6. CONCLUSÕES

O monitoramento das grandezas elétricas e mecânicas no sistema escolhido permitiu levantar curvas e operação e valores de vazão, volume reservado e consumo de energia durante o período de 7 dias. Os parâmetros elétricos se mostraram adequados, tanto na qualidade da energia consumida como também no dimensionamento e no ponto de operação dos motores elétricos.

O consumo médio diário foi obtido e verificou-se que não existe muita alteração ao longo dos dias da semana. Comprovou-se que durante a campanha, a operação dos conjuntos motor-bomba é praticamente quase ininterrupta durante o dia.

No estudo de caso do SAAE da cidade escolhida, as perdas de água podem significar uma perda econômica de R\$ 42.097,44/ano.

Na campanha 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 apresentou 0,33%, enquanto o desequilíbrio de corrente resultou em 2% em operação. A distorção harmônica total de tensão medida foi de 3,17%, e a de corrente, 4,3%. Os valores de desequilíbrio e os valores das distorções harmônicas estão abaixo dos limites recomendados, demonstrando o bom funcionamento dos componentes dos comandos elétricos. A média do fator de potência foi de 0,86. O maior fator de potência foi de 0,878, valor de acordo com os dados nominais do motor, entretanto, abaixo do limite recomendado de 0,92. Recomenda-se a correção do fator de potência, evitando custos adicionais por consumo excessivo de reativo.

Os rendimentos operam muito abaixo da bomba original. O conjunto B1 com 27% a menos e o conjunto B2 com 18%. Com isso, fica claro que a manutenção das bombas tem sido ineficiente. As pressões insuficientes, se comparadas a bomba original, indicam que internamente as bombas estão com problemas. Logo, os anéis de desgaste necessitam ser substituídos e o rotor de cada bomba pode estar danificado ou desgastado, precisando de uma manutenção corretiva ou até mesmo a sua substituição.

O comportamento das pressões e da vazão bombeada no Conjunto B1 não apresentou comportamento divergente, pois a pressão em função da vazão tem comportamento inversamente proporcional, ou seja, o aumento de vazão é acompanhado da diminuição da pressão. Entretanto, no Conjunto B2 houve maior queda da pressão no período da madrugada.

A média da vazão de água elevada pelos dois conjuntos nos 7 dias de campanha foi de 933,13 m³. Normalizado para média mensal este valor chega à 27.993,95 m³ e normalizado para média anual 340.593,05m³.

A adaptação da metodologia de Mamade et al. (2017), permitiu calcular o balanço energético do sistema e alguns importantes indicadores para avaliar a eficiência energética do SAAE. O indicador de eficiência em instalações elevatórias da IWA ou consumo de energia padronizado médio para o setor de estudo, resultou em 0,63 kWh/m³, correspondendo a um nível de serviço com alto consumo energético comparado aos 5 estudos da Tabela 8.

O indicador de eficiência em instalações elevatórias da IWA (Ph5) ou consumo de energia padronizado médio para o setor de estudo foi de 2,38 kWh/m³/100m ou 11% para o setor de estudo, correspondendo a um nível de serviço com baixa eficiência energética (serviço insatisfatório ou operação ineficiente) de acordo com a IWA.

O indicador Ph4 da IWA mede a capacidade de bombeamento remanescente no dia de maior consumo energético. A estação elevatória de R3 apresentou para o indicador Ph4 o valor de 77,82%. Esse valor demonstra a ociosidade da capacidade dos dois conjuntos motor-bombas, uma das causas pode ser o dimensionamento incorreto da estação.

O indicador da IWA Ph6 mede o consumo de energia reativa, a energia reativa medida no maior dia de consumo durante a campanha foi de 831,49 kVAr com um consumo de energia elétrica de 691 kWh. O valor do indicador Ph6 foi de 120,33%.

O indicador Op23 da IWA calcula as perdas de água por ramal, resultando no valor de 64,59m³/ramal/ano. O indicador Op24 calcula as perdas de água por comprimento de tubulação (m³/km/dia), resultando em 3,77m³/km/dia.

A energia em excesso por consumo autorizado (E2) dividida pelos componentes de energia natural de entrada e energia de entrada do eixo, resultou no valor de 0,52578 kWh/m³. A relação da energia máxima em excesso (E3) dividida pelos componentes de energia dissipada nas tubulações (sistema), bombas e nas perdas foram de 1,439, significando que essa energia representa 1,439 vezes a energia mínima necessária.

O indicador EEI de eficiência energética para o setor de estudo resultou no valor de 17,38%, demonstrando que o sistema não é eficiente e devem ser tomadas decisões e medidas que visem melhorar esse desempenho. Esse valor se aproxima do indicador de eficiência energética Ph5 da IWA (11%).

Considerando uma situação estável de perdas de água no setor de estudo entre os anos de 2014 a 2018, estima-se que em 05 anos essas perdas (apenas para o setor de estudo) podem resultar em um alto prejuízo monetário de R\$ 249.949,06 relacionado às perdas de água apenas para o setor de estudo.

A aplicação da avaliação simplificada no setor de estudo do SAAE, mostrou que o sistema usa mais do que o dobro da energia mínima exigida por seus consumidores, o que revela um potencial significativo de economia de energia: 27,73% por redução de perda de água, 29,78% por mudanças na operação e layout da rede e 42,03 % de redução de ineficiência da bomba. O diagnóstico fornecido pelo balanço energético completo permite entender quais componentes são responsáveis por maiores perdas de energia no sistema. Em termos gerais, as altas ineficiências da bomba exigem reavaliar as necessidades de uma estação de bombeamento por meio do estudo de novas maneiras de suprir uma determinada área de maneira menos intensiva em termos de energia ou de reprojeter o sistema, sendo:

- O excesso de energia nos nós exige gerenciamento de pressão.
- A alta taxa de atrito nas tubulações indica que a reabilitação e / ou a substituição da tubulação deve ocorrer.
- A alta perda de carga nas válvulas pode indicar um potencial de recuperação de energia.
- A alta perda de energia nos nós de consumo exige uma análise mais focada nos componentes do balanço hídrico das perdas reais e aparentes.

Portanto, deve ser feito um estudo criterioso visando alcançar a eficiência energética do sistema como a manutenção correta para aumentar o rendimento do conjunto.

Os ensaios de rendimento indicaram falhas na manutenção mecânica das bombas, que operam com baixo rendimento, e com isso fornecem menos água para uma mesma energia consumida. Caso os conjuntos voltem a operar próximos ao ponto nominal, a eficiência energética poderá ser melhorada.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA [ANEEL]. Informações técnicas. Tarifas - Consumidores finais. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 25 de ago. de 2017.

AGROMETAL - Reservatórios Metálicos. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br/>>. Acesso em: 23 de ago. de 2017.

ALBUQUERQUE, A. A. de; Firmino, M. B. M.; Curi, W. C. 2004. *“Uso racional de energia no bombeamento de água em sistemas de abastecimento, via programação não-linear”*. Anais do IV SEREA – Seminário hispano-brasileiro sobre sistemas de abastecimento urbano de água, João Pessoa - Brasil, CD-ROM.

ALEGRE, H., BAPTISTA, J. M., CABRERA Jr, E., CUBILLO, F., DUARTE, P., HIRNER, W., ... & PARENA, R. (2006). **Performance indicators for water supply services**. IWA publishing.

ALEGRE, H., BAPTISTA, J. M., CABRERA, E., CUBILLO, F., DUARTE, P., HIRNER, W., MERKEL, W., PARENA, R. **Performance Indicators for Water Supply Services: Manual of best practice**. 2nd ed. London: IWA Publishing, 2004, 389 p.

ALLIANCE TO SAVE ENERGY – ASE. (2002) *Watergy: taking advantage of untapped energy and water efficiency opportunities in municipal water systems*. Washington: Alliance to Save Energy.

ALMEIDA, R.; BARBOSA, P. S. F. 2001. *“Otimização ótima de sistemas de distribuição de água via modelo de programação não linear inteira mista”*. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju - Brasil, CD-ROM.

ANA - Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil, Abastecimento Urbano de Água. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/>>. Acesso em: 25 de ago. de 2017.

ANDRADE, Marielle Rezende de. Balanço hidroenergético de sistema de distribuição de água aplicado a um setor do município de Cambuí - MG. 2016. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

ANEEL- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa No 482.** Aneel, p. 1–30, 2012.

ARAUJO, L., RAMOS, H., COELHO, S. **Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management.** Water Resour Manag 20(1):133–149, 2006.

BALESTIERI, J. A. P.; VILANOVA, M. R.N. **Exploring the water-energy nexus in Brazil: the electricity use for water supply.** Energy, v. 85, p. 415-432, 2014.

BARBEAU, B.; FOTSING, M.; PREVOST, M. **Low-level bromate analysis in drinking water by ion chromatography with optimized suppressed conductivity cell current followed by a post-column reaction and UV/Vis detection.** Journal of Environmental Science and Health Part A, v. 46, n. 4, p. 420-425, 2011.

BARJOVEANU, G. et al. **Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania.** The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 19, n. 2, p. 449, 2014.

BARROS, D. P. et al. **Aplicações de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água.** In: Congresso Cier De La Energía, 3., 2007, Medellín.

BARROSO, L. B. **Estudo da Minimização das Perdas Físicas em Sistema de Distribuição de Água utilizando o modelo EPANET.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2009. Orientação de Maria do Carmo Cauduro Gastaldini.

BEZERRA, S.T.M., CAMBOIM, W.L.L., SILVA, S.A., *et al.*, 2009, “**Lógica Fuzzy aplicada ao controle de pressão em sistemas de bombeamento**”. In: RAMOS, H.M., COVAS, D.I.C, GONÇALVES, F.V., SOARES, A.K. (eds). *Alterações Climáticas e Gestão da Água e Energia em Sistemas de Abastecimento e Drenagem.* 1ª ed., Lisboa, Portugal, João Pessoa, Brasil, IST – CEHIDRO.

BORGES, V. M. N. A.; FILHO, K. Z. **Estado da arte em modelos de previsão de demanda de água na operação de sistemas de abastecimento.** In: XXX CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2006, Punta del Este. XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este 2006.

BRAGHIROLI, M. A. “**Setor Santana: Um Caso de Sucesso na Redução de Perdas de Água e Consumo de Energia Elétrica**”, Revista Saneas, São Paulo, n° 20, p. 23, 2005.

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 a water distribution network.** Journal of Water Resources Planning and Management American Society of Civil Engineering 136 (6), 669–677, 2010.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Valores de tarifas e serviços. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/en-us/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 26 de ago. de 2017.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

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.

Ciclo da água. Disponível em: <<http://201.41.82.130/agua/ciclo>>. Acesso em: 28 de ago. de 2018.

CLAVREUL, J. et al. **Review of LCA studies of solid waste management systems–Part I: Lessons learned and perspectives.** Waste management, v. 34, n. 3, p. 573-588, 2014.

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.

COLOMBO, A.F. and Karney, B.W., 2002. **Energy and costs of leaky pipes: Toward a comprehensive picture**. *Journal of Water Resource Planning and Management*, 128 (6), 441–450.

COLOMBO, A.F., Lee, P., Karney, B.W., 2009. **A selective literature review of transient-based leak detection methods**. *J. Hydro. Environ. Res.* 2(4), 212–227.

CUNHA A. A. R. **Otimização Energética em Tempo Real da Operação de Sistemas de Abastecimento de Água**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Orientação de Luisa Fernanda Ribeiro Reis.

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

FELICIANO, J. et al. **Energy efficiency in water distribution systems—a path to an ideal network: AGS experience**. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 14, n. 4, p. 708-716, 2014.

FILHO, S. M. **MEDIÇÃO DE ENERGIA ELETRICA**. 4. ed. [s.l: s.n.].

FILHO, K. Z. “**Previsão de Consumo em Tempo Real no Desenvolvimento Operacional de Sistemas de Distribuição de Água**”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP, São Paulo, 1990.

FONTANA, N., GIUGNI, M.; PORTOLANDO, D. **Losses reduction and energy production in water-distribution networks**. *Journal of Water Resources Planning and Management* 138, 237–244, 2012.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2014.

GAMBOA-MEDINA, M. M.; REIS, L. F. R. “**Detecção de vazamentos em redes de distribuição de água para abastecimento: estado da arte.**” XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

GHORBANIAN, V.; Karney, B.; Guo, Y. (2017) **Intrinsic relationship between energy consumption, pressure, and leakage in water distribution systems**. Urban Water Journal, 14:5, 515-521, DOI: 10.1080/1573062X.2016.1223325

Gibson, I.H. Variable-speed drives as flow control elements. ISA Trans. 1994, 33, 165–169.

GIUSTOLISI, O.; PRASAD, T.; LAUCELLI, D.; VAMVAKERIDOU LYROUDIA, L.; KAPELAN, Z.; SAVIC, D.; BERARDI, L.; BARBARO, G.; ASADZADEH, M.; TOLSON, B.; MCKILLOP, R. **Battle of the water calibration networks**. Journal of Water Resources Planning And Management. v.138. n.5, p.523-532, 2012.

GODSKESEN, B. et al. **Life-cycle and freshwater withdrawal impact assessment of water supply technologies**. Water research, v. 47, n. 7, p. 2363-2374, 2013.

GOMES, H. P. ; SALVINO, M. M.; CARVALHO, P. S. O. **Calibração multivariada de redes de abastecimento de água via algoritmo genético multiobjetivo**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 3, 2015.

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de água**. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2004.

GOMES, H. P. **Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética 1ª Edição**. 366p. ISBN 978-85-7745-607-9. Editora Universitária/UFPB, 2010.

GOMES, R., Sa Marques, A.; Sousa, J., 2011. **Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems**. Urban Water Journal, 8 (2), 65–77.

GONÇALVES, E.; ALVIM, P. R. A. **Pesquisa e Combate a Vazamentos não Visíveis**. Guias práticos: técnicas de operação em sistemas de Abastecimento de água. Volume 3. Brasília: SNSA, 2007. 87 p.

GONÇALVES, R F; JORDÃO, E. P.; JANUZZI, G. Introdução. In: GONÇALVES, Ricardo Franci (Coord.). **Uso Racional de Água e Energia - Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água: Projeto PROSAB**, Edital 5. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009. p. 350.

GOULART, Thaisa Dias de Castro. Estudos de Aprimoramento de Algoritmo de Calibração e Aplicação em Rede de Distribuição de Água de Cambuí (MG). 2015. 197 f. Dissertação

(Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

GUEDES, C. F. B. **Políticas públicas de estímulo à P&D: uma avaliação dos resultados do programa regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL**. 2011.

GUIDE, I. S. O. 35 (2006). **Reference materials—general and statistical principles for certification**. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, v. 64, 2006.

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.

IBGE. **Estimativa Populacional 2017**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

ISLAM, M.S., BABEL, M.S., DAS GUPTA, A., 2005, “**Pressure management for leakage reduction in a water distribution network**”. In: *Proceedings of the MTERM International Conference*, held at AIT, Thailand, pp. 587-594, Jun. 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.

JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G. 1992. “**Optimal Pump Scheduling in Water Supply Networks, Journal of Water Resources Planning and Management**”, ASCE, 118(4), 406-422.

JUNIOR, José Cláudio Ferreira dos Reis. Análise hidroenergética da rotina operacional de sistema de bombeamento utilizado em abastecimento público de água. 2012. Tese de Mestrado.

KAYA, D.; YAGMUR, E.A.; YIGIT, K.S.; KILIC, F.C.; EREN, A.S.; CELIK, C. **Energy efficiency in pumps**. *Energy Convers. Manag.* 2008, 49, 1662–1673.

LAMBERT, A. and Hirner, W.H.. IWSA blue pages. ***Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Performance Measures***, 13 p, 2000.

LAMBERT, A., 2001, “**What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?**”. In: *Proceedings of IWA Specialised Conference on System*

Approach To Leakage Control and Water Distribution Systems Management. Brn., República Checa (apud DELGADO *et al.*, 2008).

LASSAUX, S.; RENZONI, R.; GERMAIN, A. **Life cycle assessment of water from the pumping station to the wastewater treatment plant**. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 2, p. 118-126, 2006.

LEMOS, D. et al. **Environmental assessment of an urban water system**. *Journal of cleaner production*, v. 54, p. 157-165, 2013.

LÉON, C.; MARTÍN, S.; ELENA, J.; LUQUE, J. (2000). **“Explore – Hirbid expert system for water networks management”**. *Journal Water Resources Planning and Management*, v. 126, n. 2, pp.65-74.

LENZI, C. et al. From energy balance to energy efficiency indicators including water losses. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 4, p. 889–895, 2013.

LOUBET, P. et al. **Life cycle assessments of urban water systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature**. *Water research*, v. 67, p. 187-202, 2014.

LUNDIE, S.; PETERS, G. M.; BEAVIS, P. C. **Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning**. 2004.

MACHADO, E. C. M. N.; SANTANA, C. W. S.; BRASILEIRO, E. V.. GALVÃO, C. de O.; BRASILEIRO, F. V. 2005. **“Otimização da operação de redes de adução de água utilizando algoritmos genéticos”**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa - Brasil, CDROM.

MAHGOUB, M. El-S. M. et al. **Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt**. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 10, p. 1100-1106, 2010.

MAMADE, A., LOUREIRO, D., ALEGRE, H., & COVAS, D. (2017). **A comprehensive and well tested energy balance for water supply systems**. *Urban Water Journal*, 14(8), 853-861.

MARQUES, M.C.S.; HADDAD, J.; GUARDIA, E.C. (2007) **Eficiência energética: teoria & prática**. Itajubá: Fupai.

MAY, J., 1994, “**Pressure Dependent Leakage**”. *World Water and Environmental Engineering*.

MONTEIRO, M.A.G.; MONACHESI, M.G. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**. Rio de Janeiro, Eletrobras; Procel, 2005. 86 p. (Manual Prático).

MOODY, L. F. 1944. **Friction factors for pipe flow**. *Transactions of the ASME*, 66(8), 671–684.

MORAES et al. **Utilização de modelo matemática para simulação da operação de sistema de bombeamento de água**. Universidade Federal do Pará – UFPA. Belém – Brasil, 2010.

MORENO, PABLO; CALLISTO, MARCOS. Bioindicadores como ferramenta para o manejo, gestão e conservação ambiental. Simpósio Sul de Gestão e Conservação Ambiental, v. 2, 2007

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.

MOURA, G. N. P. **A Relação entre Água e Energia: Gestão Energética nos Sistemas de Abastecimento de Água das Companhias de Saneamento Básico do Brasil**. 2010. 203 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Orientação de Luiz Fernando Loureiro Legey; Heloisa Teixeira Firmo.

MUÑOZ, I. et al. **Ranking potential impacts of priority and emerging pollutants in urban wastewater through life cycle impact assessment**. *Chemosphere*, v. 74, n. 1, p. 37-44, 2008.

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.

N. Ilinski, “**Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving**”. *Energy Engineering*, nº 5, Vol. 97, pp. 7-20, 2000. M. Pemberton, “**Variable Speed Pumping: Myths and Legends**”, *World Pumps Magazine*, pp. 22-24, 2005.

NAZARÉ, A.V.B., SOUZA, V.C.B. **Modelagem e Simulação do Sistema Adutor Principal da Bacia Leiteira utilizando o Epanet**. 2011.

NETO, M. S. A. **Medidas de eficiência energética em serviços de distribuição de água e saneamento**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2008.

NICOLINI, M.; GIACOMELLO, C.; DEB, K. (2011) **Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network**. Journal of Water Resources Planning Management, v. 137, n. 1, p. 134-142.

OLIVEIRA, A. C. C.; JÚNIOR, J. C. S. **Uso Eficiente de Energia Elétrica**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 1998.

PEREIRA et al. **Estimativa da energia elétrica consumida no bombeamento do volume de água não faturado no 3º setor de distribuição de água de Belém – Pará**. Universidade Federal do Pará. Belém – Brasil, 2010.

PILCHER, R., HAMILTON, S., CHAPMAN, H., *et al.*, 2007, **Leak Location and Repair Guindace Notes**. IWA, Mar.

PILSCIKOV, D. et al. **Improvement of Energy Efficiency by Using Proportional Pressure Control Mode at the Second Stage Pumping Stations in Public Water Supply**. Scientific Proceedings of Riga Technical University, Series 2: Architecture and Construction Science, v. 12, n. 40, p., 2013.

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**, 4ª ed., São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo 519 p., 2006.

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

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Relatório de Resultados PROCEL 2014 – Ano base 2013 – 2014. Brasília – DF, 2014. 147p.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Relatório de Resultados PROCEL 2005 – Ano base 2005. Brasília – DF, 2015.

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.

RODRIGUES, W. “**Crítérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água**”, 234 f, Tese de doutorado em engenharia civil, Faculdade de engenharia civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2007.

ROSSMAN, L. A. **EPANET 2 2 users manual**. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 2008.

SAMPAIO FILHO, G. ; ALCALDE, J. L. **Análise de Qualidade de Energia e Eficiência Energética em Sistemas de Água e Saneamento**. Anais do IV SEREA–Seminário Hispano Brasileiro sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa-Brasil, CD-ROM, 2004.

SAMPAIO FILHO, G.; ALCALDE, J. L. 2004. “*Análise de Qualidade de Energia e Eficiência Energética em Sistemas de Água e Saneamento*”. Anais do IV SEREA – Seminário hispano brasileiro sobre sistemas de abastecimento urbano de água, João Pessoa - Brasil, CD-ROM.

SATTAR, A. M.; CHAUDHRY, M. H. **Leak detection in pipelines by frequency response method**. Journal of hydraulic research, v. 46, n. sup1, p. 138-151, 2008.

Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Disponível em: < <http://www.cidades.gov.br/saneamento/>>. Acesso em: 23 de jul. de 2017.

SEMPEWO, J.; PATHIRANA, A.; VAIRAVAMOORTHY, K. “**Spatial analysis tool for development of leakage control zones from the analogy of distributed computing.**” Annual 82 82 Water Distribution Systems Analysis Conference. Kruger National Park, South Africa. Aug, 2008.

SILQUEIRA, M. G. et al. Análise do Ciclo de Vida do Sistema de Tratamento e Distribuição de Água: Uma Revisão e Análise Comparativa de Artigos. **XIII SEMEAR - Seminário do Meio Ambiente e Energias Renováveis**, p. 16, 2018.

SILVA, Ana Cláudia da. **Estudos de Correlação de Perdas de água com parâmetros hidráulicos e efeitos ambientais - Aplicação em rede no Sul de Minas**. Dissertação de mestrado, UNIFEI, 2019.

SILVA, B. C. “**Desenvolvimento de metodologia de campo para estimativa do potencial de conservação de energia em instalações de bombeamento**”, dissertação de mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.

SILVA, C. O. **Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas**. 2014. 112p. (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

SILVA, F. D. G. B. da. **Estudos de calibração de redes de distribuição de água através de algoritmos genéticos**. 2003. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. doi:10.11606/T.18.2016.tde-23112016-163209. Acesso em: 2018-01-23.

SILVA, K. R. G. **Modelagem Matemática de Cloro Residual em Redes de Distribuição de Água – Estudo de Caso na Zona de Pressão Recalque Campo Comprido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, 97p. Curitiba, 2002.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SABESP). Disponível em: <<http://www.site.sabesp.com.br/>>. Acesso em: 23 de jul. de 2017.

SLAGSTAD, H.; BRATTEBØ, H. **Life cycle assessment of the water and wastewater system in Trondheim, Norway–A case study: Case Study**. Urban water journal, v. 11, n. 4, p. 323-334, 2014.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2014. Brasília, fev. 2009.

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

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2014. Brasília, fev. 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.

SOUSA, J. et al; "**An explicit solution of the Colebrook-White equation through simulated annealing**", Water industry systems: modelling, optimization and applications, vol. 2, Baldock, England, Research Studies Press, 1999.

SOUZA, A. C. de. **Influência de manobras de válvulas na identificação de vazamentos em redes de distribuição de água utilizando dados transientes e algoritmo genético**. 2016. Tese de Doutorado.

STOKES, J.; HORVATH, A. **Life-cycle assessment of urban water provision: tool and case study in California**. Journal of infrastructure systems, v. 17, n. 1, p. 15-24, 2010.

TODINI, E.; PILATI, S. **A gradient method for the analysis of pipe networks**. In: International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution, Leicester Polytechnic, UK, September, 8-10, 1988.

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2005.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**, São Paulo, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

TSUTIYA, M. T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. 1ª Edição. São Paulo – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006. 185 p.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. Estud. av., São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200007&lng=en&nrm=iso>. access on 04 Sept. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>.

ULANICKI B., Bounds P., Rance J., and Reynolds L. (2000), "**Open and closed loop pressure control for leakage reduction**", Urban Water, Vol. 2(2), pp. 105-114

United Nations Industrial Development Organization. 2009. Disponível em: <https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Publications/IDR_2009_print.PDF>. Acesso em: 28 de ago. de 2017.

VENKATESH, G.; BRATTEBØ, H. **Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: Case study of Oslo (Norway)**. Energy, v. 36, n. 2, p. 792-800, 2011.

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. et al. **Desenvolvimento e avaliação de indicadores de eficiência hidráulica e energética para sistemas de abastecimento de água como ferramenta de suporte à tomada de decisões**. 2012.

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.

WALSKI, T.M., et al., 1987. **Battle of the network models: Epilogue**. Journal of Water Resources Planning and Management, 113 (2), 191–203.

WU, Z. **“A Benchmark Study for Minimizing Energy cost of Constant and Variable Speed pump Operation.”**, World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat, 2007.

XU, Q. et al. **Water saving and energy reduction through pressure management in urban water distribution networks**. Water resources management, v. 28, n. 11, p. 3715-3726, 2014.

ZANIBONI, N. **Equipamentos e metodologias para o controle e redução de perdas reais em sistemas de abastecimento de água**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ZESSLER, U.; SHAMIR, U., **“Optimal Operation of Water Distribution Systems, Journal of Water Resources Planning and Management”**, ASCE, 115(6), 735-752, 1989.

7. ANEXOS

7.1. Anexo I – Curvas das bombas

As curvas das bombas ensaiadas no laboratório, ($Q \times H$), ($Q \times \eta$) e ($Q \times P_e$), fornecidas pelo fabricante são mostradas na Figura 65.

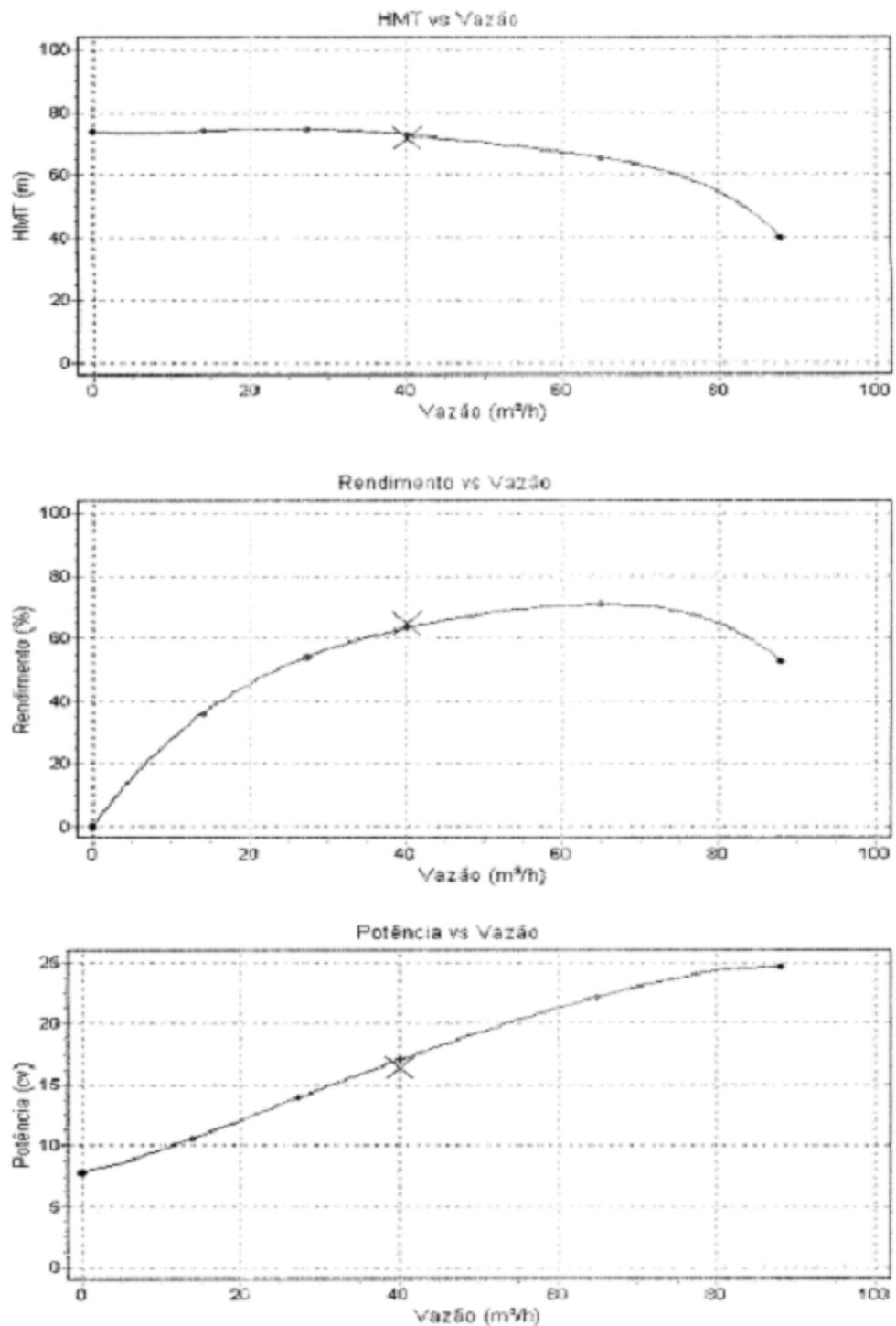


Figura 65. Curvas.
Fonte: Fabricante.

7.2. Anexo II – Resultados dos rendimentos das bombas

As Tabelas 36, 37, 38 e 39 apresentam os resultados obtidos nos ensaios e também os valores calculados.

Tabela 36. Dados ensaios individuais.

Dados ensaios Individuais

<i>Bomba</i>	Ponto	Q [m³/s]	Psucção [mca]	Precalque [mca]	H [m]	Pel [kW]	n [rpm]	Nc [%]	Nt [%]	Ph [kW]
1	Shutoff	0,00	7,41	72,86	65,52	11,71	3566	-	-	0,00
	Operação	0,0105	3,69	58,33	55,67	18,41	3544	31,31	34,99	5,74
2	Shutoff	0,00	7,50	79,55	72,12	10,62	3574	-	-	0,00
	Operação	0,0063	4,65	74,13	69,90	15,48	3562	28,30	31,66	4,32

Fonte: Adaptado da REDECOPE e ANDRADE (2016).

Tabela 37. Dados calculados.

<i>Dados (AUTOR)</i>							<i>Potência Nominal para encontrar a Potência Requerida</i>			
<i>H [m]</i>	Q [m³/s]	Q [m³/h]	Poth [kW]	Nc [%]	Peixo [kW]	Nt [%]	Altura Manométrica Entre R3 e R4 [m]	Potência Absorvida BHP [CV]	% Carga Até 2CV = 20% De 2 a 20CV = 15% Acima de 20CV = 10%	OK Se a % Carga > 75%, logo o Motor não é Superdimensionado
65,45	0,00	0	0	0	10,492 2	0	-	-	-	-
54,64	0,0105	37,8	5,626271	30,56	16,495 4	34,1 1	42	16,78799657	87%	OK
72,05	0,00	0	0	0	9,5155 2	0	-	-	-	-
69,48	0,0063	22,68	4,292606	27,73	13,870 1	30,9 5	42	11,13225521	87%	OK

Fonte: O autor.

Tabela 38. Dados ensaios em paralelo.

DADOS ENSAIOS PARALELOS

BOMBA	Ponto	Q [m ³ /s]	Psucção [mca]	Precalque [mca]	H [m]	Pel [kW]	n [rpm]	Nc [%]	Nt [%]	Ph [kW]
1	Shutoff	0,00	7,56	72,78	65,29	11,63	3566	-	-	0,00
	Operação	0,0105	4,82	65,81	62,02	16,36	3548	39,25	43,88	6,39
2	Shutoff	0,00	7,62	79,09	71,54	10,56	3569	-	-	0,00
	Operação	0,0063	3,84	70,57	66,99	16,53	3551	18,94	21,17	4,14

Fonte: Adaptado da REDECOPE e ANDRADE (2016).

Tabela 39. Dados calculados.

DADOS (AUTOR)							POTÊNCIA NOMINAL PARA ENCONTRAR A POTÊNCIA REQUERIDA				
H [M]	Q [m ³ /s]	Q [m ³ /h]	Poth [kW]	Nc [%]	Peixo [kW]	Nt [%]	Altura Manométric a Entre R3 e R4 [m]	Potência Absorvida BHP [CV]	% Carga		OK Se a % Carga > 75%, logo o Motor não é Superdimensionado
									Até 2CV = 20%	De 2 a 20CV = 15%	
65,22	0,00	0	0	0	10,420 5	0	-	-	-	-	-
60,99	0,0105	37,8	6,28013	38,3 9	14,658 6	42,8 4	42	13,386782 13	87%		OK
71,47	0,00	0	0	0	9,4617 6	0	-	-	-	-	-
66,73	0,0063	22,68	4,12270 6	24,9 4	14,810 9	27,8 4	42	16,648427 02	87%		OK

Fonte: O autor.

7.3. Anexo III – Curva características das bombas

A Figura 66 apresenta as curvas características da Bomba ETA 50-20 para a rotação de 3500rpm. Essas informações foram obtidas no manual do fabricante.

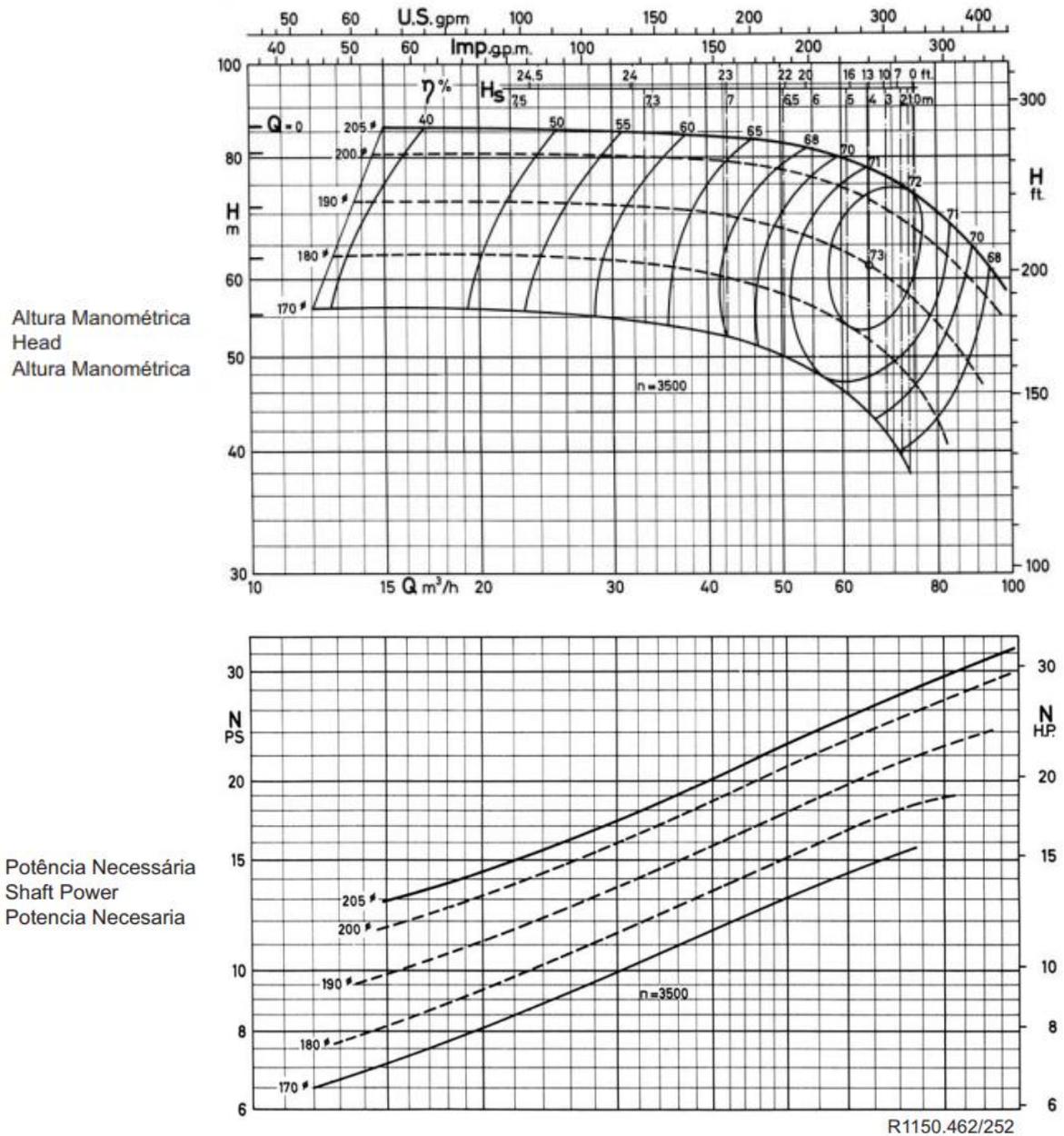


Figura 66. Curvas – 50-20 – 3500 RPM.

Fonte: Fabricante.

7.4. Anexo IV – Dimensão da Tubulação

Tabela 40. Comprimento da tubulação do setor de estudo.

Trecho	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
1	18,96	85
2	172,62	85
3	21,78	85
4	41	85
5	44,93	60
6	132,6	60
7	30,8	60
8	39,43	60
9	134,04	60
10	24,71	60
11	103,91	60
12	8,55	60
13	60,27	60
14	68,61	60
15	80,06	60
16	18,57	60
17	60,24	60
18	1000	12
19	11,3	60
20	71,94	50
21	1000	12
22	38,84	60
23	67,59	32
24	49,96	32
25	5,5	50
26	52,05	50
27	63,14	50
28	61,08	50
29	4,8	60
30	99,02	60
31	13,45	60
32	1000	12
33	65,73	60
34	35,05	50
35	24,62	50
36	55,99	50
37	83,55	50

38	67,32	12
39	15,07	50
40	37,2	50
41	17,97	50
42	53,53	50
43	33,68	50
44	117,84	50
45	52,21	50
46	1000	12
47	1000	12
48	21,2	50
49	31,55	50
50	124,82	50
51	10,6	60
52	1000	12
53	54,16	50
54	70,03	50
55	76,6	50
56	52,73	50
57	71,5	50
58	29,9	50
59	26,6	60
60	56,5	60
61	38,34	60
62	38,34	60
63	81,6	60
64	46,4	60
65	33,81	60
66	50,38	60
67	1000	12
68	1000	12
69	1000	12
70	1000	12
71	70,78	60
72	51,65	60
73	9	60
74	24,9	60
75	69,17	60
76	64,2	60
77	56,95	60
78	30,34	50
79	112,22	60
80	7,2	60
81	136,4	60

82	84,71	60
83	85,4	60
84	85,54	60
85	83,31	60
86	107,94	60
87	46,55	60
88	162,4	60
89	42,54	60
90	39,3	60
91	25,6	60
92	53,74	50
93	1000	12
94	46,99	50
95	127,25	50
96	22,05	50
97	23,8	50
98	48,8	50
99	54,4	50
100	60,7	50
101	10,5	60
102	19,32	60
103	22,5	60
104	36,9	12
105	60,5	60
106	7,87	60
107	34,08	60
108	127,22	60
109	36,06	60
110	49,7	60
111	52,18	60
112	51,26	60
113	61,53	60
114	55,65	60
115	47,64	60
116	39,22	60
117	50,4	60
118	7,43	60
119	82,7	60
120	7,88	60
121	118,93	60
122	10,63	60
123	113,8	60
124	97,5	60
125	23,77	50

126	32,19	50
127	159,18	32
128	17,5	32
129	18,4	32
130	15,27	32
131	29,97	32
132	40,11	32
133	27,8	32
134	31,26	32
135	64,52	32
136	31,52	32
137	39,33	32
138	50,59	32
139	21,85	32
140	50,31	32
141	385,91	32
142	210,81	32
143	22,98	32
144	25,77	32
145	41,99	32
146	57,41	32
147	31,42	32
148	27,97	12
149	30,67	32
150	39,44	32
151	42,72	32
152	74,6	50
153	87,35	60
154	8,4	50
155	53,5	50
156	41,84	32
157	105,93	60
158	36,38	60
159	41,77	50
160	22	50
161	25,66	60
162	110	32
TOTAL:	19387,89	

Fonte: O autor.

7.5. Anexo V – Energia excedente no sistema

Tabela 41. Altura manométrica dos nós do setor de estudo e energia excedente no sistema.

Nó	Altura Manométrica (m)	Energia excedente no sistema (EEXC)
1	957,2992	61878,18543
2	925,2779	41875,6219
3	923,2618	40616,23617
4	915,6908	35886,90261
5	916,2497	36236,0275
6	895,4548	23246,19547
7	897,4515	24493,46271
8	893,2726	21883,053
9	915,6953	35889,7136
10	919,6922	38386,43442
11	923,723	40904,33135
12	923,9955	41074,55238
13	924,1575	41175,748
14	922,8765	40375,553
15	921,17	39309,56335
16	901,9776	27320,75589
17	898,6283	25228,56768
18	897,3609	24436,86813
19	896,9135	24157,39331
20	909,2635	31871,99764
21	888,2056	18717,8789
22	890,1562	19936,34911
23	891,3517	20683,13531
24	891,2993	20650,4029
25	889,2468	19368,27938
26	895,3671	23191,41241
27	900,358	26309,04956
28	884,3921	16335,72152
29	883,7866	15957,48727
30	872,5622	8946,0051
31	873,7208	9669,741179
32	871,4707	8264,183997
33	873,6839	9646,691066
34	874,5157	10166,28685
35	873,9812	9832,403767
36	868,7582	6569,782034

37	870,2913	7527,4549
38	869,8747	7267,219745
39	920,704	39018,46977
40	907,7775	30943,74646
41	910,0977	32393,09262
42	896,8211	24099,67433
43	902,0561	27369,79203
44	894,6811	22762,89269
45	900,808	26590,1485
46	885,9811	17328,31312
47	886,9984	17963,78413
48	887,1994	18089,34166
49	878,5842	12707,73362
50	875,6331	10864,28675
51	877,116	11790,60147
52	917,501	37017,66996
53	917,0923	36762,36966
54	916,5962	36452,47369
55	916,3615	36305,86497
56	915,0949	35514,66515
57	910,8275	32848,97263
58	910,5292	32662,63527
59	910,5994	32706,4867
60	897,3401	24423,87511
61	905,0728	29254,21688
62	893,2342	21859,06589
63	895,5262	23290,7965
64	880,6067	13971,11721
65	884,4016	16341,65583
66	883,9489	16058,87029
67	892,5731	21446,1003
68	874,7062	10285,2854
69	871,0149	7979,462
70	882,203	14968,26886
71	863,5462	3314,031607
72	862,0974	2409,017943
73	869,914	7291,769053
74	860,7308	1555,351686
75	859,9694	1079,732274
76	861,3995	1973,064715
77	861,8431	2250,165807
78	864,7422	4061,130132
79	866,3462	5063,091698
80	864,3221	3798,708652

81	869,8963	7280,712494
82	864,455	3881,72654
83	866,1358	4931,662326
84	863,0446	3000,699985
85	865,1157	4294,442255
86	862,62	2735,467516
87	866,9439	5436,453561
88	904,2522	28741,61734
89	901,621	27098,00059
90	900,008	26090,41704
91	896,3773	23822,4483
92	899,644	25863,03923
93	884,0248	16106,28231
94	883,6239	15855,85439
95	884,3026	16279,81406
96	890,0812	19889,49929
97	869,9868	7337,244615
98	870,5023	7659,259071
99	869,9847	7335,93282
100	877,742	12181,64134
101	860,098	1160,064105
102	862,0083	2353,360352
103	860,5012	1411,928758
104	864,005	3600,627596
105	859,5919	843,9214939
106	898,5823	25199,83313
107	891,9538	21059,24569
108	889,9794	19825,90846
109	882,6919	15273,66724
110	858,2409	0
111	859,2343	620,5415337
112	862,3521	2568,119945
113	862,9435	2937,546423
114	874,0622	9883,001577
115	875,3911	10713,11799
116	875,792	10963,54591
117	877,111	11787,47815
118	877,7686	12198,25741
119	878,0058	12346,42778
120	878,517	12665,75618
121	879,1483	13060,10677
122	880,267	13758,91874
123	881,0489	14247,34377
124	882,4289	15109,38053

125	884,3281	16295,743
126	884,5414	16428,9839
127	885,4707	17009,48445
128	898,8817	25386,85762
129	886,0255	17356,04821
130	885,3469	16932,15101
131	883,59	15834,67827
132	881,0757	14264,08477
133	878,3168	12540,69839
134	876,699	11530,11645
135	874,2655	10009,99583
136	870,6872	7774,759503
137	868,639	6495,322047
138	865,1275	4301,813294
139	915,2955	35639,97281
140	896,9858	24202,55654
141	922,295	40012,3107
142	899,4224	25724,61362
143	873,7458	9685,357787
144	869,1735	6829,205125
145	920,0202	38591,32431
146	909,7977	32205,69332
147	886,1029	17404,39723
148	876,0771	11141,63771
149	910,4586	32618,53397
150	890,6216	20227,06789
151	865,6379	4620,641962
152	862,8007	2848,344358
153	859,0663	515,5979282
154	887,5	18277,11575
Somatório:		2772269,864
Energia Excedente no Sistema: E =		3268,396

Fonte: O autor.

7.6. Anexo VI – Cálculo do balanço energético

A Tabela 42 apresenta os resultados da simulação da avaliação simplificada do setor de estudo.

Tabela 42. Cálculos do balanço energético através da metodologia de Mamade et al. (2017).

Energia de entrada do eixo	
$\forall p$: é o volume anual de água bombeada (m ³);	340.593,05
B: é o valor anual do consumo de energia elétrica da estação elevatória R3;	215.640,00
hp: é a altura hidráulica (m) a jusante da bomba;	916,73
z ₀ : é a elevação de referência (m);	916,73
γ : é o peso específico da água (N/m ³);	9.810,00
α : é o fator de conversão de Ws para kWh, 1 / (1000 × 3600)	0,0000002780
Energia de entrada do eixo: EEE =	215.640,00
Energia de entrada natural	
z ₀ : é a elevação de referência (m);	916,73
γ : é o peso específico da água (N/m ³);	9810
H _r : é a altura do reservatório (m);	920,73
$\forall r$: é o volume anual fornecido pelo reservatório / tanque (m ³);	340.593,05
α : é o fator de conversão de Ws para kWh, 1 / (1000 × 3600)	0,000000278
Energia de entrada natural: EN =	3.715,43
Energia Total de entrada do sistema: ETOT =	219.355,43
$\forall CA$: é o consumo anual autorizado (m ³), Considerando a perda de água de 27,73%	246.146,60
$\forall TOT$: é o volume anual de entrada do sistema (m ³).	340.593,05
Energia de entrada (natural e do eixo), associada ao consumo autorizado: ECA =	158.528,1723
Energia de entrada (natural e do eixo), associada às perdas de água: EPA =	60.827,26
Energia mínima	
$\forall CA$: a é o consumo anual autorizado (m ³);	246146,60
zCG: a é o centro de massa do consumo;	937,73
pREQ: é a pressão mínima requerida (m) na área de análise.	42
α : é o fator de conversão de Ws para kWh, 1 / (1000 × 3600)	0,000000278
Energia mínima: EMIN =	89.935,13

Energia excedente	
H_n^t : é a altura do nó (reservatório R4) (m) no tempo t;	958,73
n_t : é o número do intervalo de tempo;	-
n_n : é o número de nós;	-
$d = CA/TOT$: refere-se à simulação sem perdas de água (ou seja, definindo um multiplicador de demanda como a porcentagem do consumo autorizado fornecido pelos balanços hídricos);	-
q_n^t : é o consumo do nó (m^3/s) no tempo t;	0,010800135
Δt : é a variação do tempo. (1ano)	31.536.000,00
z_0 :	916,73
EMIN:	42.291,02
α : é o fator de conversão de Ws para kWh, $1 / (1000 \times 3600)$	0,000000278
Energia excedente: EEXC =	3.268,396

Energia de atrito (dissipada) do tubo associada ao consumo autorizado	
q_i^t : é a taxa de fluxo do tubo (m^3/s) no tempo t;	0,010800135
J_i^t : é a perda de capacidade da unidade (m/m) no tempo t;	0,000000005
N_p : é o número de bombas;	2
L_i : é o comprimento do tubo (m). De R3 para R4.	1.410,00
Energia de atrito (dissipada) do tubo associada ao consumo autorizado: EDISSPCA =	10.397,45

Energia de atrito (dissipada) do tubo associada a perda de água 27,73%	
q_i^t : é a taxa de fluxo do tubo (m^3/s) no tempo t;	0,010800135
J_i^t : é a perda de capacidade da unidade (m/m) no tempo t;	0,05
N_p : é o número de bombas;	2
L_i : é o comprimento do tubo (m). De R3 para R4.	1.410,00
Energia de atrito (dissipada) do tubo associada a perda de água: EDISSPA =	833,55

Energia dissipada nas válvulas (registros) associada ao consumo autorizado	
q_i^t : é a taxa de fluxo do tubo (m^3/s) no tempo t por meio das válvulas;	0,010800135
ΔH_{it} é a perda de carga no tempo t;	42
Δt : é o tempo;	31.536.000,00
Energia dissipada nas válvulas (registros) associada ao consumo autorizado: EDISSVCA =	3.816,784

Energia dissipada nas válvulas (registros) associada a perda de água 27,73%	
q_i^t : é a taxa de fluxo do tubo (m^3/s) no tempo t por meio das válvulas;	0,010800135
ΔH_{it} é a perda de carga no tempo t;	42
Δt : é o tempo;	31.536.000,00
Energia dissipada nas válvulas (registros) associada a perda de água: EDISSVPA =	0

Energia dissipada nos Conjuntos B1 e B2 associada ao consumo autorizado	
∇CA: é o consumo anual autorizado (m3), considerando a perda de água de 27,73%	246.146,60
∇TOT: é o volume anual de entrada do sistema (m3).	340.593,05
ES: é a energia gasta do conjunto motor-bomba;	215.640,00
∏S: é o rendimento do conjunto motor-bomba;	31,31%
Energia dissipada nos Conjuntos B1 e B2 associada ao consumo autorizado: EDISSBCA =	65.324,05

Energia dissipada nos Conjuntos B1 e B2 associada a perda de água 27,73%	
∇PA: é o volume das perdas de água (m3), considerando a perda de água de 27,73%	94.446,45
∇TOT: é o volume anual de entrada do sistema (m3).	340.593,05
ES: é a energia gasta do conjunto motor-bomba;	215.640,00
∏S: é o rendimento do conjunto motor-bomba;	31,31%
Energia dissipada nos Conjuntos B1 e B2 associada a perda de água: EDISSBPA =	41.074,54

Indicadores	
E2 =	0,52578
E2(natural) =	0,01509
E2(eixo) =	0,51068
E3 =	1,4390
E3 (sistema) =	0,7242
E3 (bombas) =	0,7263
E3 (perdas) =	0,6763

Fonte: O autor.

7.7. Anexo VII – Resultados da simulação

A Tabela 43 apresenta os resultados da simulação da avaliação completa do setor de estudo.

Tabela 43. Resultados da simulação de rede pelo iPerdas.

Entradas	Porcentagem de Perdas (Balanço Hídrico)	27,73%	
	Modelo	Análise Anual (m³/ano)	Consumo sem Perdas (m³/ano)
	Volume fornecido pelo Reservatório R4	98.546,72	
	Consumo Autorizado	311.001,33	224.760,66
	Perdas	86.240,67	
	Coefficiente c inicial	1,95E-08	
	Método	Demanda (kWh/ano)	Porcentagem (%)
Global	Energia Total de Entrada	229.389,82	100%
	Energia Natural de Entrada	3.933,70	1,71%
	Energia de Eixo de Entrada	225.456,12	98,29%
	Energia de Consumo Autorizado	165.780,03	72,27%
	Energia de Perdas de Água	63.609,80	27,73%
Energia Total associada com a água fornecida aos consumidores	Energia Mínima Requerida	94.049,83	41,00%
	Energia em Excesso	3.417,91	1,49%
	Energia Total associada com a água fornecida aos consumidores	97.467,74	42,49%
Energia Dissipada	Atrito na Tubulação	11.285,98	4,92%
	Perdas de Carga nas Válvulas	2.133,33	0,93%
	Ineficiência das Bombas	50.465,76	22,00%
	Ineficiência das Turbinas	0	0,00%
	Energia Total Dissipada	63.885,07	27,85%
Energia Recuperada	Associado com o consumo autorizado	0	0,00%
	Associado com o consumo autorizado	0	0,00%
	Energia Total Recuperada	0	0,00%
Energia Dissipada pelas perdas	Energia Dissipada no consumo dos nós	22.273,75	9,71%
	Atrito na Tubulação	1.101,07	0,48%
	Perdas de Carga nas Válvulas	0,00	0,00%
	Ineficiência das Bombas	47.896,60	20,88%
	Ineficiência das Turbinas	0	0,00%

Fonte: O autor.

A Tabela 44 apresenta os parâmetros da rede do setor de estudo.

Tabela 44. Parâmetros da rede.

Parâmetros da Rede		
	Demanda Total da Rede (l/s)	3,129
	Comprimento Total (km)	20,80
	Média do Diâmetro da Tubulação (mm)	49,72
	Pressão média (mca)	41,80
	Velocidade média (m/s)	0,0399
	Perda de carga média (m/km)	0,407664

Fonte: O autor.

A Tabela 45 apresenta os valores dos indicadores obtidos através da simulação da avaliação completa da rede do setor de estudo. Esses valores são muito próximos da avaliação simplificada.

Tabela 45. Indicadores.

Indicadores		
	E2 (kWh/m ³)	0,602151623
	E3	1,43902439
	E3 (Sistema)	0,715609756
	E3 (Bombas)	1,045853659
	E3 (Perdas)	0,676341463

Fonte: O autor.

7.8. Anexo VIII – Simulação da rede no EPANET

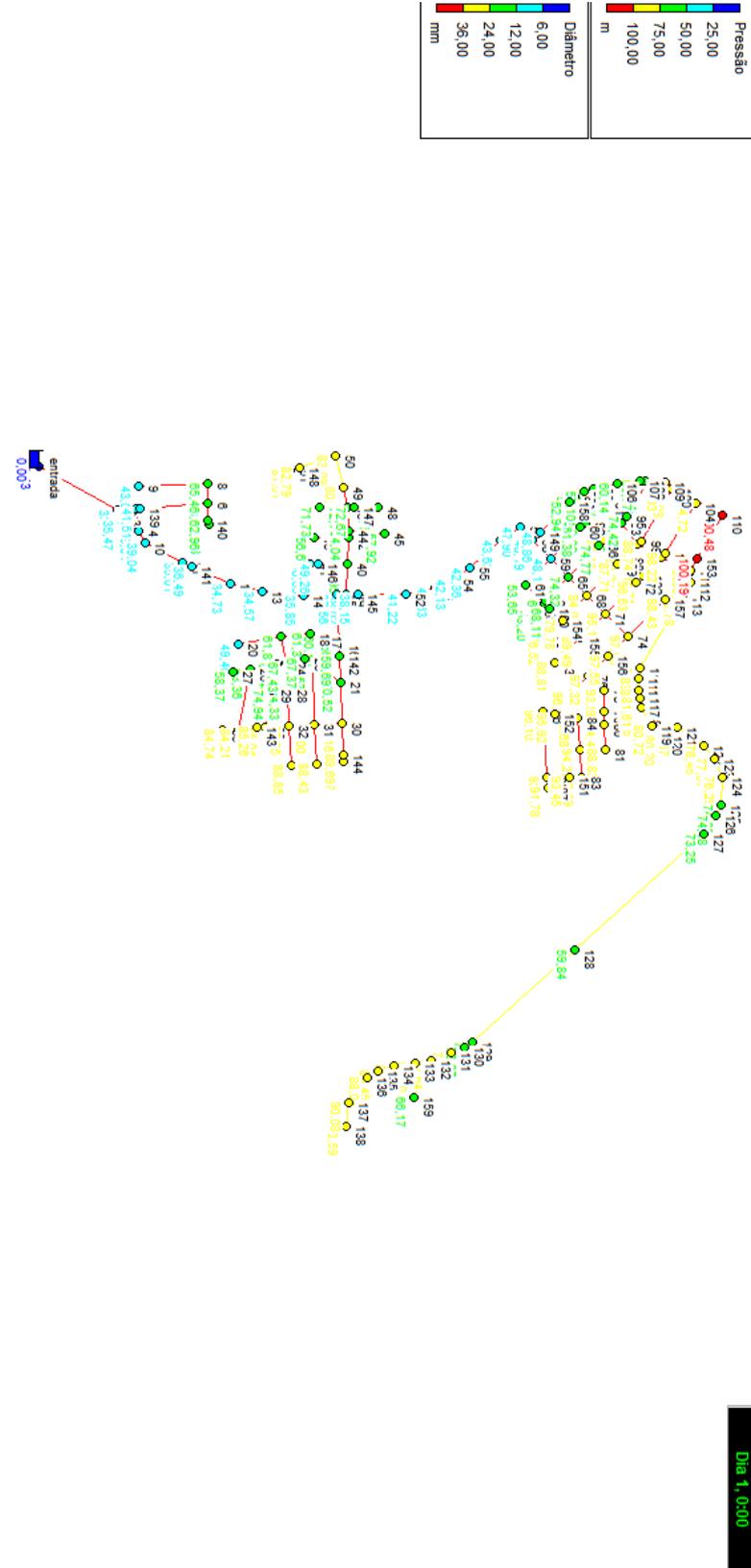


Figura 67. Simulação da rede pelo EPANET para simulação da avaliação simplificada.

Fonte: Adaptado de GOULART (2015) e ANDRADE (2016).