



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

LUÍS HENRIQUE CARDOSO ALEXANDRE

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS PARA ABASTECIMENTO DE
ÁGUA COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
SISTEMAS**

Londrina
2017

LUÍS HENRIQUE CARDOSO ALEXANDRE

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS PARA ABASTECIMENTO DE
ÁGUA COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE
SISTEMAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes

Londrina
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Alexandre, Luís Henrique Cardoso.

Avaliação do consumo de energia elétrica em estações elevatórias para abastecimento de água com diferentes configurações de sistemas / Luís Henrique Cardoso Alexandre. - Londrina, 2017.
85 f.

Orientador: Fernando Fernandes.

Dissertação (Mestrado em Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Sistemas de distribuição de água - Tese. 2. Estações elevatórias de água - Tese. 3. Utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento - Tese. I. Fernandes, Fernando. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

LUÍS HENRIQUE CARDOSO ALEXANDRE

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA
COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Sandro Rogério Lautenschlager
Universidade Estadual de Maringá – UEM

Prof^ª. Dr^ª. Sandra Márcia Cesário Pereira da Silva
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 03 de maio de 2017.

À minha mãe, com amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fernando Fernandes, pela valorosa orientação durante este trabalho e à Profa. Dra. Sandra M. Cesário Pereira da Silva pelas constantes orientações, contribuições acadêmicas e pessoais durante os últimos anos.

Aos docentes do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, em especial à Prof. Dra. Heliana Barbosa Fontenele.

Ao Prof. Dr. Sandro Rogério Lautenschlager e ao Eng. Júlio Kazuhiro Tino, pela cuidadosa leitura do trabalho e valorosas contribuições nas bancas de qualificação e defesa.

A meus pais, Elisabete e Marcos, minha vó Edite e meu irmão Marcos Augusto por todo apoio e carinho durante toda minha vida.

Aos amigos da MF Engenharia Urbana: Luiz Paulo, Audinil, Ricardo e Giovana, por todo suporte durante a realização do meu mestrado.

Aos meus amigos Renan, Fernanda, Vitor, Vilson e Thais, por todo apoio, carinho e pela amizade de vocês.

ALEXANDRE, Luís Henrique Cardoso. **Avaliação do consumo de energia elétrica em estações elevatórias para abastecimento de água com diferentes configurações de sistemas**. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

RESUMO

A escolha do tipo de configuração do sistema de abastecimento de água para zonas altas dos municípios pode tornar-se uma difícil decisão, uma vez que diversas variáveis interferem no processo, pois o melhor sistema deve buscar a minimização de custos de implantação, operação e manutenção, com garantia da eficiência, uma vez que deverá atender aos requisitos legais vigentes do local. O objetivo desse trabalho é avaliar o consumo de energia em três diferentes configurações de sistema para abastecimento de zonas altas, ou seja, utilizando estações elevatórias de água tratada com reservatório de montante, com reservatório de jusante e sem reservatório inserindo inversor de frequência. A estratégia de pesquisa foi o estudo comparativo, pois permite, por meio da exploração das semelhanças e diferenças, encontrar os princípios de variação de um determinado fenômeno ou os padrões mais gerais de um fenômeno, no caso o consumo de energia. Foi utilizado como base a rede existente de um município do Paraná. As simulações hidráulicas dos sistemas de abastecimento forneceram dados acerca das pressões disponíveis, níveis dos reservatórios, eficiência das bombas e consumo de energia. Com a análise dos resultados obtidos para o sistema simulado concluiu-se que: a) a partir de vazão de 15m³/h a estação elevatória controlada por inversor de frequência apresenta consumo de energia menor que as outras configurações, que utilizam reservatórios. b) as configurações com reservatório apresentam melhor rendimento médio das bombas. Desta forma, a utilização de tubulações de maiores diâmetros, apesar de mais caras, pode ter seu investimento amortizado devido à economia com energia elétrica ao longo do período de projeto. É relevante ressaltar que este estudo se ateve a apenas avaliar o consumo de energia, mas para a tomada de decisão quanto ao tipo de configuração de sistema de abastecimento é necessário avaliar outros aspectos principalmente o pleno atendimento dos mais longínquos pontos de consumo com pressão e vazão adequadas, portanto o aspecto operacional é de extrema importância, o que em alguns casos o inversor de frequência pode não ser a melhor solução justamente por ser equipamento que necessita implantação e a manutenção por técnicos especializados, devido aos circuitos sofisticados, chegando a ser desfavorável para os Sistema de Abastecimento e Água mais longínquos de suporte técnico. Portanto, para a definição da alternativa a ser implantada, é relevante o estudo técnico-econômico para cada localidade, considerando principalmente os fatores operacionais e disponibilidade de suporte técnico.

Palavras-chave: Abastecimento de água. Estações elevatórias. Consumo de energia, inversor de frequência.

ALEXANDRE, Luís Henrique Cardoso. **Evaluation of electric energy consumption in pump stations for water supply with different system configurations**. 2017. 85 p. Masters Dissertation (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

ABSTRACT

The choice of system configuration type for water supplies on high levels of the cities can become a tough decision since several variables interfere on the processes, the best system should seek to minimize the energy consumption and other inputs, and to minimise deployment, operation and maintenance costs, maintaining a good efficiency, since it must follow local legal requirements. The aim of this study is to evaluate the energy consumption in three different system configurations for high level zones supply systems using pump stations with upstream reservoir connected to the system distribution, with upstream reservoir not connected to the system distribution and without reservoir inserting variable speed drives. The research strategy was a comparative study, through the exploration of similarities and differences, finding the principles of variation of a given phenomenon or general patterns of a phenomenon, in this case energy consumption. The hydraulic simulations of the system supplies provided data on the available pressures, reservoir levels, pump efficiency, power consumption, operational data of pump stations for both the schematic systems and the inserting scheme distribution network using as an study case the existing network in a municipality of Paraná. With the analysis results it was concluded that: a) from a $15\text{m}^3 / \text{ha}$ flow controlled rate by variable speed drive presented lower power consumption than the other configurations, which used reservoirs. B) configurations with reservoir presented better performance of the pumps; c) pump head proved to be one of the main factors for increased energy consumption, as higher the pump head was, it demanded more power pumps. In this way, the use of pipelines of larger diameters, although more expensive, can have its investment reduced due to the electric energy economy throughout the design period. It is important to highlight that this study was focused only on the energy consumption evaluation, but to decide about the type of supply system configuration, it is necessary to evaluate other aspects, mainly the full service of the most distant points of consumption with pressure and flow. The operational aspect is extremely important, which in some cases variable speed drive may not be the best solution because the equipment that needs to be installed and maintained by specialized technicians due to the sophisticated circuits the most distant system of the water supply system technicians. Therefore, to choose the best alternative to be implemented, the technical-economic study for each location is important, mainly considering the operational factors and technical support availability.

Key words: Water supply system. Pump stations. Electric energy consumption. Variable speed drive.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | - Perdas de energia ao longo de um sistema de distribuição de água..... | 23 |
| Figura 2 | - Curvas da bomba e do sistema. | 26 |
| Figura 3 | - Representação esquemática das configurações de estudo..... | 33 |
| Figura 4 | - Curva padrão de consumo horário..... | 35 |
| Figura 5 | - Exemplo de escolha de bombas em catálogo do fabricante..... | 36 |
| Figura 6 | - Interface do software WaterGEMS. | 38 |
| Figura 7 | - Tela de inserção de dados das bombas no WaterGEMS. | 39 |
| Figura 8 | - Representação de dados sobre consumo energético obtidos com o WaterGEMS. | 41 |
| Figura 9 | - Sistemas esquemáticos das diferentes configurações | 43 |
| Figura 10 | - Rede de distribuição utilizada nas simulações. | 44 |
| Figura 11 | - Variação da vazão recalçada na simulação com vazão de 28,1 m ³ /h para as configurações estudadas | 51 |
| Figura 12 | - Variação da altura manométrica das bombas na simulação com vazão de 28,1 m ³ /h para as configurações estudadas..... | 51 |
| Figura 13 | - Consumo de energia das bombas para vazão de projeto de 28,1m ³ /h e todas as configurações simuladas..... | 52 |
| Figura 14 | - Gastos com energia das bombas para vazão de projeto de 28,1m ³ /h e todas as configurações simuladas..... | 52 |
| Figura 15 | - Consumo anual de energia em função da vazão de projeto para todas as configurações simuladas..... | 53 |
| Figura 16 | - Custo anual com energia em função da vazão de projeto para todas as configurações estudadas..... | 54 |
| Figura 17 | - Variação de altura manométrica com a vazão de projeto para todas configurações simuladas..... | 56 |
| Figura 18 | - Potência requerida de bombas de acordo com as vazões para todas as configurações simuladas..... | 57 |
| Figura 19 | - Eficiência média das bombas selecionadas de acordo com a vazão para todas as configurações simuladas | 58 |
| Figura 20 | - Variação da eficiência das bombas com o tempo para vazão de projeto de 28,1m ³ /h para todas as configurações simuladas | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 - Custo unitário médio com energia. | 59 |
| Figura 22 - Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 01 para cada configuração simulada. | 65 |
| Figura 23 - Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 01 para cada configuração simulada. | 65 |
| Figura 24 - Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 02 para cada configuração simulada. | 67 |
| Figura 25 - Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 02 para cada configuração simulada. | 67 |
| Figura 26 - Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 03 para cada configuração simulada. | 69 |
| Figura 27 - Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 03 para cada configuração simulada. | 69 |
| Figura 28 - Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 04 para cada configuração simulada. | 71 |
| Figura 29 - Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 04 para cada configuração simulada. | 71 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 1 | - Porcentagem das despesas com SAA no Brasil em 2007..... | 16 |
| Tabela 2 | - Parâmetros básicos de projeto calculados para sistema esquemático..... | 46 |
| Tabela 3 | - Perda de carga no barrilete para sistema esquemático..... | 47 |
| Tabela 4 | - Perdas de carga na tubulação de recalque, para sistema esquemático..... | 48 |
| Tabela 5 | - Dimensões dos reservatórios utilizados para o abastecimento das populações dos diferentes cenários para sistema esquemático..... | 49 |
| Tabela 6 | - Bombas utilizadas nos cenários com pressurização da rede para sistema esquemático | 50 |
| Tabela 7 | - Bombas utilizadas nos cenários com reservatórios para sistema esquemático..... | 50 |
| Tabela 8 | - Parâmetros básicos de projeto calculados. | 60 |
| Tabela 9 | - Perda de carga nos barriletes para sistema com rede de distribuição..... | 61 |
| Tabela 10 | - Perda de carga nas tubulações de recalque ou de distribuição para sistema com rede de distribuição. | 61 |
| Tabela 11 | - Dimensões dos reservatórios utilizados para o abastecimento das populações das diferentes zonas altas. | 62 |
| Tabela 12 | - Altura manométrica total nos sistemas com inversor de frequência. | 63 |
| Tabela 13 | - Altura manométrica total nos sistemas com reservatórios..... | 63 |
| Tabela 14 | - Bombas utilizadas nos sistemas com pressurização da rede..... | 64 |
| Tabela 15 | - Bombas utilizadas nos sistemas com reservatórios..... | 64 |
| Tabela 16 | - Resultados das simulações da Zona 01. | 66 |
| Tabela 17 | - Resultados das simulações da Zona 02. | 68 |
| Tabela 18 | - Resultados das simulações da Zona 03. | 70 |
| Tabela 19 | - Resultados das simulações da Zona 04. | 72 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

COFINS - Contribuição para o financiamento da seguridade social

DN – Diâmetro nominal

EEB – Estação elevatória de água bruta

EET – Estação elevatória de água tratada

ETA – Estação de tratamento de água

ICMS – Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços

NPSH – Net Positive Suction Head

PIS – Programa e integração social

PRFV – Polímero reforçado com fibra de vidro

REL -Reservatório elevado

SAA – Sistema de abastecimento de água

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SUMÁRIO

| | | |
|----------------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA | 14 |
| 1.1 | Objetivos | 15 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 15 |
| 2. | REVISÃO BILIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Otimização de sistemas de abastecimento de água | 16 |
| 2.2 | Estações elevatórias e sistemas de bombeamento | 23 |
| 2.3 | Inversores de frequência | 28 |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS | 32 |
| 3.1 | Configurações dos sistemas de abastecimento de zonas altas | 32 |
| 3.2 | Cálculo das vazões de projeto e dimensionamento de tubulações e reservatórios | 33 |
| 3.3 | Cálculo das alturas manométricas e escolha das bombas | 35 |
| 3.4 | Utilização do software WaterGEMS | 37 |
| 3.5 | Simulações com sistemas esquemáticos | 41 |
| 3.6 | Simulações com rede de distribuição | 44 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 46 |
| 4.1 | Resultados dos estudos com sistemas esquemáticos | 46 |
| 4.1.1 | Cálculo das vazões de projeto, dimensionamento dos reservatórios e escolha das bombas | 46 |
| 4.1.2 | Resultados das simulações | 50 |
| 4.2 | Resultados dos estudos com rede de distribuição | 60 |
| 4.2.1 | Cálculo das vazões de projeto, dimensionamento dos reservatórios e escolha das bombas | 60 |
| 4.2.2 | Resultados das simulações na rede de distribuição analisada | 64 |
| 4.2.2.1 | Zona Alta 01 | 64 |
| 4.2.2.2 | Zona Alta 02 | 66 |
| 4.2.2.3 | Zona Alta 03 | 69 |
| 4.2.2.4 | Zona Alta 04 | 71 |
| 5. | CONCLUSÕES | 73 |
| 6. | RECOMENDAÇÕES FUTURAS | 76 |
| | BIBLIOGRAFIA | 77 |
| | ANEXO 1 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS | 80 |
| | ANEXO 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES ESQUEMÁTICAS | 85 |

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A redução do consumo de energia tem sido amplamente defendida, devido aos seus elevados custos, limitação das matrizes energéticas e questões ambientais. No Brasil, a energia elétrica tem como característica alto custo, além dos recorrentes riscos de racionamento em períodos de seca.

O setor industrial, maior consumidor de energia, tem buscado cada vez mais alternativas para otimizar sua eficiência energética. Entre os fatores mais utilizados, destacam-se a troca de equipamentos antigos por novos mais eficientes, produção de energia local através de métodos alternativos sustentáveis e redução do consumo em horários de pico.

Em sistemas de abastecimento de água, os principais custos envolvidos são os referentes à implantação e operação. Na implantação, devem ser feitos investimentos em captação, adução, reservação e rede de distribuição, enquanto que os principais custos com operação são referentes à mão de obra e energia elétrica para funcionamento do sistema. No Brasil e no mundo, o consumo de energia em sistemas de abastecimento de água recebe especial atenção por ser, em muitos casos, a segunda maior despesa das companhias, perdendo apenas para o pagamento de pessoal, sendo ainda que gastos com energia de bombeamento ultrapassam, na maioria das vezes, os custos de investimento das instalações, ao longo da vida útil dos projetos (GOMES, 2009).

Visto o elevado consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento, medidas que induzem maior economia e aumento da eficiência energética são importantes para empresas públicas e privadas de saneamento. Algumas medidas usualmente tomadas visando o aumento da eficiência energética são a troca de bombas por modelos de maior eficiência, troca de tubulações antigas por novas que apresentam menor perda de carga, etc.

Tsutiya (2001) afirma que as despesas com energia elétrica representam o segundo ou terceiro item de maior custo para as empresas de saneamento brasileiras, e que sua redução pode se dar, entre outras maneiras, através da alteração do sistema operacional, a partir da alteração

do sistema bombeamento/reservação e utilização de variadores de rotação das bombas, e através da automação do sistema de abastecimento de água.

De acordo com Costa (2009), modificações nas bombas ou mudanças operacionais podem resultar em uma redução significativa nos custos com energia elétrica. Simulações de diferentes controles operacionais de acordo com os níveis dos reservatórios ou a utilização de inversores de frequência podem levar à solução ótima que minimiza os custos operacionais de um sistema.

As bombas com inversor de frequência têm sido utilizadas para distribuição de água para locais elevados, substituindo a construção de reservatórios para abastecimento destes locais. A utilização de inversor de frequência possibilita ajustar o funcionamento dos conjuntos moto bomba, variando a velocidade de rotação do conjunto de acordo com a demanda de água necessária para o abastecimento, podendo desta forma reduzir os custos energéticos de bombeamento (CARVALHO, 2012).

Este trabalho tem como objetivo comparar o consumo de energia para operação de três diferentes configurações de sistema para o abastecimento de zonas altas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o consumo de energia de estações elevatórias para o abastecimento de zonas altas quando controladas por inversores de frequência, por reservatórios de jusante e por reservatórios de montante.

2. REVISÃO BILIOGRÁFICA

2.1 Otimização de sistemas de abastecimento de água

A energia elétrica é fundamental para o funcionamento de sistemas de abastecimento de água (SAA), sendo consumida nas atividades de captação, tratamento, transporte e distribuição, tornando o consumo de energia um dos principais representantes das despesas totais em companhias de saneamento (MOURA, 2010). Na Tabela 1 é mostrada a porcentagem das principais despesas em companhias estaduais de saneamento no Brasil.

Tabela 1 - Porcentagem das despesas com SAA no Brasil em 2007.

| Empresa | Estado | Participação % da despesa no total das despesas de exploração | | | | |
|------------------|--------------|---|------------------|-----------------|-------------------|--------------|
| | | Pessoal próprio | Energia elétrica | Serviços gerais | Produtos químicos | Outras |
| DESO | SE | 49,24 | 18,98 | 12,83 | 4,5 | 14,45 |
| COSANPA | PA | 41,46 | 20,32 | 18,91 | 5,99 | 13,31 |
| COPASA | MG | 41,79 | 16,91 | 12,72 | 2,22 | 26,36 |
| CAER | RR | 49,96 | 13,31 | 5,21 | 4,41 | 27,1 |
| CAESB | DF | 43,53 | 7,84 | 21,82 | 2,81 | 23,99 |
| SANESUL | MS | 40,36 | 19,48 | 20,81 | 2,2 | 17,16 |
| SANEPAR | PR | 44,23 | 16,46 | 16,51 | 3,66 | 19,14 |
| CASAN | SC | 47,11 | 12,23 | 18,32 | 2,12 | 20,22 |
| CAGECE | CE | 28,05 | 15,42 | 35,73 | 6,81 | 13,99 |
| SANEAGO | GO | 41,33 | 16,4 | 18,03 | 1,55 | 22,7 |
| CAGEPA | PB | 45,61 | 19,29 | 14,83 | 3,37 | 16,9 |
| CAESA | AP | 54,02 | 15,38 | 10,35 | 9,53 | 10,72 |
| CASAL | AL | 45,37 | 21,77 | 20,95 | 1,74 | 10,18 |
| COSAMA | AM | 60,03 | 11,68 | 10,69 | 8,02 | 9,58 |
| CAERN | RN | 39,09 | 26,06 | 11,1 | 2,07 | 21,67 |
| SANEATINS | TO | 44,73 | 15,36 | 11,37 | 2,17 | 26,38 |
| CORSAN | RS | 42,45 | 13,93 | 8,07 | 3,33 | 32,22 |
| CAERD | RO | 46,9 | 14,91 | 18,89 | 2,75 | 16,55 |
| COMPESA | PE | 25,48 | 28,64 | 25,07 | 4,36 | 16,44 |
| DEAS | AC | 77,08 | 14,09 | 2,84 | 4,96 | 1,02 |
| CEDAE | RJ | 39,51 | 10,35 | 12,1 | 1,81 | 36,22 |
| EMBASA | BA | 28,3 | 18,71 | 26,76 | 4,21 | 22,03 |
| CAEMA | MA | 40,61 | 35,42 | 18,65 | 3,64 | 1,68 |
| SABESP | SP | 36,94 | 13,85 | 15,37 | 3,28 | 30,56 |
| AGESPISA | PI | 55,23 | 18,65 | 14,08 | 3,59 | 8,45 |
| CESAN | ES | 36,01 | 16,87 | 30,02 | 2,2 | 14,9 |
| | Média | 44,02 | 17,4 | 16,62 | 3,74 | 18,23 |

Nota: Em negrito, estão destacadas as companhias nas quais os gastos com energia elétrica representam a principal ou segunda maior despesa.

Fonte: Moura (2010), elaborado a partir de SNIS, 2009.

Moura (2010) também comparou a média do consumo e os gastos com de energia entre as companhias estaduais de saneamento, sendo que o maior consumo médio ocorre na empresa DESO (SE), com um índice de 1,31 kWh/m³ de água produzida e, a menor intensidade energética, na empresa COSAMA (AM), que reduziu o consumo unitário de energia de 1,11 kWh/m³ (2003), para 0,36 kWh/m³ (2007). Em relação aos custos com energia, a companhia CASAL (AL) possui a maior despesa com energia elétrica por metro cúbico de água produzido, R\$ 0,28/m³, enquanto que as companhias CAESA (AP) e COSAMA (AM) a menor despesa, de R\$ 0,07/m³.

Tsutiya (2001) lista várias ações para reduzir os gastos com energia elétrica em sistemas de abastecimento de água. As ações citadas puderam ser agrupadas em três grupos:

- Redução do custo sem redução do consumo de energia elétrica:
 - Reduções do custo sem investimento (ações administrativas) – para estas situações não é necessário investimentos em novas instalações ou equipamentos, como por exemplo, quando há alterações nos contratos de fornecimento de energia com reduções tarifárias.
 - Reduções do custo com investimento (ações operacionais) – neste caso, são necessários investimentos em equipamentos e nas instalações para otimizações no sistema. Algumas das melhorias que se enquadram nesta categoria são a correção do fator de potência, alteração da tensão de alimentação e melhorias no fator de carga.
- Redução do custo com redução do consumo de energia elétrica:
 - Redução da altura manométrica – a redução da altura manométrica faz com que seja demandada menos energia para elevação do fluido a ser bombeado, porém em sistemas bem projetados dificilmente é possível conseguir esta diminuição. Algumas das medidas possíveis para a diminuição da altura manométrica são o dimensionamento correto das tubulações de

recalque, escolha de materiais de menor rugosidade, limpeza e desobstrução de tubulações, instalação de dispositivos para eliminação de ar das linhas de recalque, além da montagem de forma correta dos tubos.

- Redução do volume de água bombeada - a redução do volume de água bombeado é uma das medidas mais eficazes para a diminuição do consumo de energia elétrica. Algumas das principais medidas para a redução do volume bombeado são o controle de perdas no sistema e programas de conscientização para a população.
- Melhora do rendimento das estações elevatórias – visto que os motores elétricos dos conjuntos moto-bomba são os principais consumidores de energia elétrica, a troca de conjuntos antigos por novos de maior eficiência é uma das medidas para a redução do consumo de energia.
- Redução do custo pela alteração do sistema operacional:
 - Acionamento das bombas fora dos períodos em que a tarifa de eletricidade é mais cara, mas garantindo que o abastecimento será mantido de forma adequada.
 - Utilização de inversores de frequência nos conjuntos moto-bomba, de forma a controlar a rotação da bomba e o gasto energético de acordo com o volume consumido.

Para que sejam executadas mudanças que possam aumentar a eficiência, produtividade, confiabilidade e diminuir os custos de operação, uma análise de custo-benefício é necessária para que os gestores de sistemas de abastecimento público possam verificar quanto tempo é necessário para que melhorias no sistema se paguem (BARRY, 2007). O Quadro 1 mostra medidas citadas para melhorar a eficiência em sistemas de saneamento e seus tempos de retorno de investimento.

Quadro 1 - Medidas para melhorar a eficiência em sistemas de saneamento e seus tempos de retorno de investimento.

| Área | Função | Período de retorno típico (anos) |
|-------------------------|---|---|
| Taxas de eletricidade | Reduzir a demanda durante períodos de pico de custo de eletricidade | 0 - 2 |
| Instalações elétricas | Otimização do fator de potência elétrica com capacitores | 0,8 - 1,5 |
| | Redução do desequilíbrio de tensão | 1 - 1,5 |
| Operação e manutenção | Manutenção de rotina nas bombas | 2 |
| | Manutenção e reabilitação de poços profundos | 1 - 2 |
| Produção e distribuição | Utilizar automação (tal como telemetria, SCADA e controladores eletrônicos em válvulas modulares) para controlar as pressões e perdas na rede e para otimizar o funcionamento dos sistemas de bombeamento | 0 - 5 |
| | Nova bomba de maior eficiência | 1 - 2 |
| | Novo motor de maior eficiência | 2 - 3 |
| | Substituir o impulsor | 0,5 |
| | Otimizar a rede de distribuição (remoção de válvulas desnecessárias, setorização, instalação de inversores de frequência e válvulas regulatórias) | 0,5 - 3 |
| Uso final | Incentivar programas para o uso de tecnologias eficientes | 1 - 3 |
| | Medição efetiva do consumo | 1 - 2 |

Adaptado de BARRY, 2007

Toledo (2008) estudou a economia de energia elétrica utilizada no acionamento de bombas hidráulicas que abastecem reservatórios, que atendem a população por força gravitacional. O autor cita a necessidade do planejamento do funcionamento das bombas e do dimensionamento dos reservatórios, para que as bombas não sejam ligadas em períodos de tarifas de energia elétrica. Foram propostos dois modelos para representar as características do sistema com o objetivo de minimizar o custo de energia elétrica. Um modelo é de otimização inteira mista, em que é considerado o custo de partida para as bombas hidráulicas que visa evitar a ligação intermitente. No segundo, não são considerados esses custos, sendo um modelo linear. Os resultados indicaram que o modelo inteiro-misto levou a um programa de operação em que as bombas são ligadas um menor número de vezes, o que proporciona a facilidade de operação do sistema, sendo segundo o autor esta solução mais viável na prática.

Riguetto (2002) apresenta em seu trabalho uma metodologia para o funcionamento ótimo de sistemas de distribuição de água, envolvendo parâmetros relacionados com o consumo de energia, confiabilidade operacional, satisfação quanto ao atendimento da demanda e controle das pressões nodais. O modelo hidráulico computacional é aplicado a um sistema fictício simples a fim de ilustrar o procedimento proposto para a determinação das regras operacionais desejadas.

Almeida e Barbosa (2002) apresentaram um modelo hidráulico de otimização visando a redução do consumo de energia elétrica, através da minimização da potência de eixo da bomba de uma estação tipo *booster* ao longo de 24 horas de operação, em função das condições iniciais do sistema. Para o estudo de caso apresentado, as alterações dos níveis iniciais dos reservatórios do sistema de distribuição de água levaram a economias da ordem de 35,4 e 36% com relação a potência de eixo consumida ao longo de um dia de operação.

Lucarelli, Brucoli e Souza (1978 *apud* GURGEL, 2006) estudaram de forma teórica o bombeamento direto nas redes de abastecimento com bombas de velocidade variável sem reservatório de distribuição e obtiveram uma redução de custos de implantação do bombeamento direto de aproximadamente 66% em relação ao custo de um sistema convencional com reservatório elevado.

Costa e Figueiredo (2009) desenvolveram um programa para a otimização do funcionamento de estações elevatórias visando a minimização do consumo energético sem a necessidade de grandes investimentos, apenas controlando os horários de funcionamento das bombas. As restrições impostas ao programa buscavam manter as bombas funcionando nos períodos de menor consumo energético de forma que os reservatórios estivessem em seu nível máximo no início do horário em que a energia é mais cara. Após o desenvolvimento dos algoritmos de controle, foram feitas simulações hidráulicas com o programa computacional EPANET para um trecho do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Baixo Cávado e Ave, em Portugal, que continha a estação elevatória com maior consumo energético. Mesmo com a necessidade do funcionamento das bombas ainda no período de pico tarifário para garantir o abastecimento, o

programa desenvolvido se mostrou uma ferramenta de auxílio eficiente para os gestores de sistemas de abastecimento, pois apresenta de forma simples a política operacional otimizada para bombas e o seu custo associado para cada período do tarifário de energia existente.

Costa e Figueiredo (2009) também realizaram simulações a fim de testar os efeitos da diminuição da altura mínima admissível de água nos reservatórios e do aumento do rendimento dos conjuntos moto-bomba da estação elevatória no sistema analisado. Reduzindo a altura mínima do reservatório de 2,0m para 1,5m, o horário dentro do período de pico tarifário em que a bomba religa para o reabastecimento do sistema foi adiado, o que permitiu uma redução de cerca de 0,43%, equivalente a uma economia anual de cerca de 3055 €. Já com o aumento do rendimento das bombas de cerca de 82 % para 84 %, conseguiu-se uma redução no custo diário da energia de cerca de 2,4 %, equivalente a 46 €/dia.

Gomes et al (2010) elaboraram um diagnóstico sobre a operação de dois sistemas adutores da Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, que abastecem cerca de 600 mil habitantes, e executaram uma análise de pré-viabilidade técnica e econômica para a reabilitação destes sistemas visando a economia de energia. Algumas das interferências consideradas foram a adequação ou substituição de algumas bombas, substituição de motores convencionais por de alto desempenho e implantação de soft-starter para o acionamento, construção de reservatório de regularização para que haja parada do bombeamento no horário de ponta em que as tarifas de energia são mais altas, substituição de registros por válvulas automáticas e implantação do sistema de automação e controle. Com a implantação das ações recomendadas para a parada de todas as estações elevatórias do sistema nos horários de pico, verificou-se que seria possível a economia equivalente a 37% do valor mensal da fatura paga pela COMPESA à distribuidora de energia, de forma que mesmo sendo necessários grandes investimentos, o aspecto da viabilidade econômica se mostrava bastante favorável.

Um exemplo da redução de custos com energia elétrica sem redução do consumo é o apresentado por Oliveira (2002), em que a companhia Saneamento de Goiás S/A em 1991 implantou um sistema de

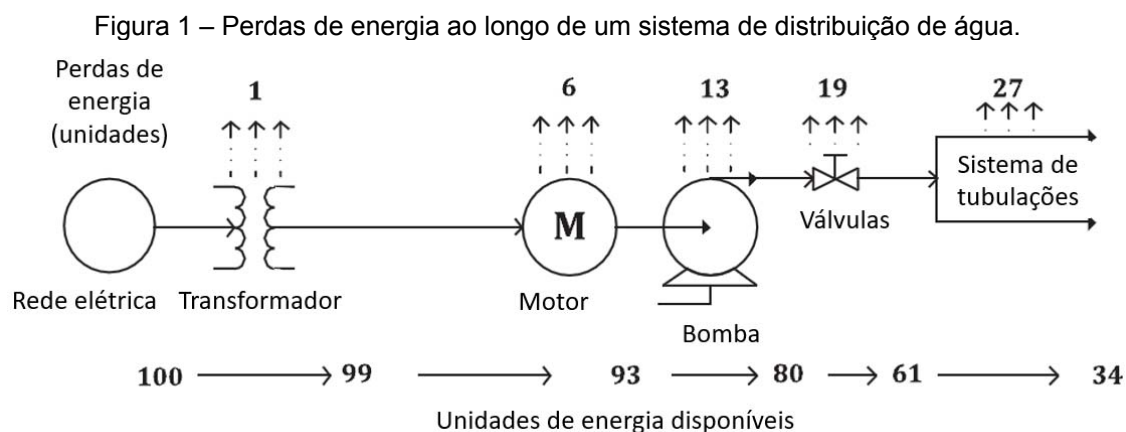
gerenciamento de energia elétrica. Através do cadastro das unidades consumidoras, controle efetivo das faturas de energia elétrica, correção do fator de potência elétrico, implantação do modelo tarifário horo-sazonal, mudança do grupo tarifário e concepção do sistema computacional de gestão de energia elétrica, conseguiu uma economia no período de 1991 a 2000 de cerca de 132.000MWh, equivalente a US\$7.440.000,000 para o período citado. Dentre as ações tomadas, as que resultaram os maiores percentuais de economia foram a correção dos erros de faturamento (22,58%), reclassificação das contas (29,20%) e implantação de contratos na modalidade horo-sazonal (36,27%).

A utilização de estações elevatórias que utilizam energia solar tem sido uma alternativa estudada atualmente para a diminuição do consumo de energia elétrica pelas empresas de saneamento. Kolhe et al (2004) afirmam que fontes renováveis de energia como a solar emergiram em sistemas de bombeamento de água há décadas. Além disso, as bombas que utilizam energia solar são de simples construção e têm boa eficiência. Os fabricantes de bombas têm ido na direção da diminuição da emissão de carbono, sendo a energia solar uma das favoritas dentre as fontes de energia renováveis devido a não emitir poluentes e estar disponível praticamente durante todo o ano. Os sistemas de bombeamento fotovoltaicos convencionais são compostos geralmente por um painel fotovoltaico, um motor de indução e uma bomba centrífuga, sendo de simples instalação e operação.

Shankar et al (2016) examinaram vários métodos para melhoramento da eficiência de sistemas de bombeamento com bombas centrífugas. Os autores citam que tradicionalmente o aumento da eficiência pode ser alcançado através da utilização de inversores de frequência, porém cerca de 30 a 50% de energia pode ser economizada com uma escolha correta de bombas e equipamentos com maior eficiência, enquanto que aproximadamente 15 a 25% de economia de energia pode ser alcançado através de um dimensionamento adequado das tubulações do sistema. As perdas em sistemas com inversores de frequência são geralmente influenciadas por características do projeto, da fabricação, e pela velocidade operacional do motor elétrico. As perdas mínimas nesses sistemas são de aproximadamente 5 a 8% quando operados na velocidade de projeto. Quando

os sistemas são operados em velocidades diferentes das de projeto a eficiência cai drasticamente, e as perdas se tornam da ordem de 10 a 20%.

Na Figura 1 é ilustrada a transferência de energia em um sistema de bombeamento convencional, com controle através de válvulas, em que 100 unidades de energia de entrada são consumidas de forma a suprir 34 unidades de energia úteis no final do processo.



Fonte: Adaptado de U.S. Department (2008) apud Shankar et al (2016).

O uso de bombas como turbinas para geração de energia elétrica tem se mostrado como uma alternativa para redução do consumo de energia em SAAs, sendo utilizadas geralmente em substituição a válvulas redutoras de pressão. Teoricamente quaisquer tipos de bomba podem ser utilizadas como turbina trabalhando como uma micro central hidroelétrica, porém tem sido recomendado o uso de bombas centrífugas monoestágio, trabalhando com alturas manométricas de baixas a médias. A eficiência de uma bomba utilizada como turbina têm se mostrado menor que quando utilizada para bombeamento, e também menor que turbinas convencionais, porém pode ser considerada como uma alternativa técnica e econômica a ser considerada (JAIN e PATEL, 2014).

2.2 Estações elevatórias e sistemas de bombeamento

As estações elevatórias são partes essenciais dos sistemas públicos de abastecimento de água, sendo utilizadas nos processos de captação, adução, tratamento e distribuição da água. Os principais

componentes de uma estação elevatória são os equipamentos eletromecânicos (bomba, motor), tubulações (sucção, barrilete e recalque) e componentes de construção civil (poço de sucção, casa de bombas) (TSUYTYA, 2005).

As estações elevatórias podem ser classificadas como elevatórias de água bruta (EEB), quando recalcam água sem tratamento prévio, ou estações elevatórias de água tratada (EET). Estações elevatórias também podem ser utilizadas para reforço da adução ou aumento da pressão na rede de distribuição, sendo denominadas como “booster” ou estação pressurizadora (TSUYTIYA, 2005).

Atualmente, são utilizadas predominantemente em sistemas de abastecimento de água as bombas centrífugas, devido ao maior rendimento, custo menor de instalação, operação e manutenção. Essas bombas aceleram a massa líquida através da força centrífuga fornecida pelo giro do motor ao rotor, sendo este componente cuja função é ceder energia cinética à massa em movimento e transformando-a em energia de pressão (TSUYTIYA, 2005).

O conjunto elevatório deve ser dimensionado de forma a vencer a diferença de nível entre os pontos de onde se deseja transferir o fluido a ser bombeado, além das perdas de carga em todo o percurso, sendo elas as perdas por atrito ao longo da tubulação e as perdas localizadas devido as peças especiais (AZEVEDO NETTO, 1998).

Tsuytiya (2005) descreve as informações a serem consideradas para a seleção de bombas para uma estação elevatória, sendo algumas das principais:

- Capacidade de vazão ou bombeamento: volume de líquido bombeado por unidade de tempo, comumente expresso em m^3/h , m^3/s ou l/s .
- Altura geométrica de sucção ou altura estática de sucção ($H_{g,s}$): é o desnível geométrico entre o nível de água no poço de sucção e a linha de centro da bomba. Se o nível do líquido no poço de sucção está abaixo da linha de centro da bomba, diz-se que a bomba é do tipo afogada e sucção é negativa. Quando ocorre o inverso, diz-se que bomba é do tipo não afogada e a sucção é positiva.

- Altura geométrica de recalque ou altura estática de recalque ($H_{g,r}$): é o desnível geométrico entre linha de centro da bomba e o nível do líquido onde chega a tubulação de recalque.
- Altura geométrica total (H_g): é o desnível geométrico entre o nível do líquido onde chega a tubulação de recalque e o nível do líquido no poço de sucção.
- Carga de velocidade ou carga cinética: é a energia cinética contida no líquido bombeado. A carga de velocidade é dada por $V^2/2g$, onde: V = velocidade do líquido, m/s; g = aceleração da gravidade = $9,81\text{m/s}^2$.
- Altura manométrica total: é a carga que deve ser vencida pela bomba, quando o líquido está sendo bombeado. Para sua determinação devem ser consideradas as alturas geométricas de sucção e recalque, as perdas de carga e as cargas cinéticas. A expressão utilizada para determinação da altura manométrica total de uma bomba é dada pela Equação 1.

$$H = H_g + \sum \Delta H_s + \sum \Delta H_r + \frac{V^2}{2g}$$

Equação 1.

Onde:

 H = Altura manométrica total (m); H_g = Altura geométrica (m); $\sum \Delta H_s$ e $\sum \Delta H_r$ = somatória das perdas de carga distribuídas e localizadas, nas tubulações de sucção e recalque (m); $V^2/2g$ = carga cinética no recalque (m).

Sendo que nesta equação a energia na carga cinética é normalmente considerada perdida à saída da tubulação de recalque. Desta forma, na prática esta perda de carga considerada como uma perda localizada.

- Potência fornecida pela bomba: é a potência para elevar a vazão do líquido, de modo a vencer a altura manométrica total. É dada pela Equação 2:

$$P_1 = \gamma \cdot Q \cdot H$$

Equação 2.

Onde:

P_l = Potência líquida fornecida pela bomba (kW, N.m/s);

γ = Peso específico da água (N/m³);

Q = Vazão (m³/s);

H = Altura manométrica total (m).

- Eficiência ou rendimento da bomba: é a relação entre a potência fornecida pela bomba e a potência consumida por essa bomba. É dada pela Equação 3:

$$\eta = \frac{P_l}{P_b} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P_b}$$

Equação 3.

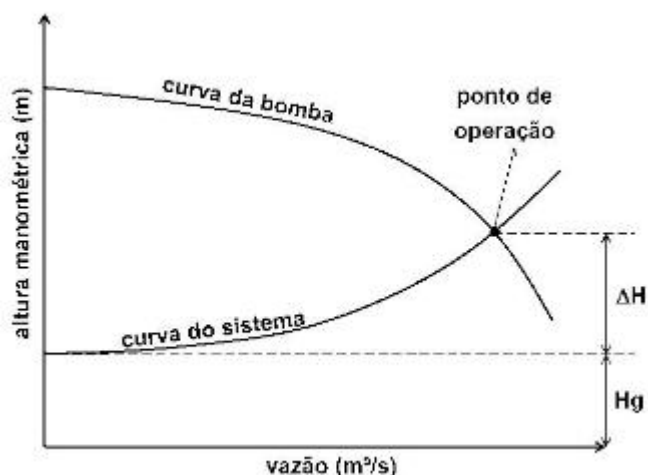
Onde:

η = rendimento ou eficiência da bomba

P_b = Potência consumida pela bomba (kW, N.m/s)

Com dados como vazão e altura manométrica, podem ser traçadas a curva do sistema, que correlaciona a vazão com as perdas de carga, e com as curvas de operação e de eficiência das bombas é possível escolher as bombas que melhor se adequam ao sistema. Na Figura 2 são ilustradas as curvas da bomba e do sistema.

Figura 2 – Curvas da bomba e do sistema.



Fonte: Adaptado de Tsuytiya (2005).

Barry (2007) cita que um problema comum em sistemas de abastecimento de água e de tratamento de esgoto é a existência de bombas superdimensionadas. Como todas as bombas têm um ponto de melhor eficiência, sendo este ponto equivalente a vazão na qual a bomba opera com

o menor consumo de energia por volume bombeado, uma bomba operando com vazão menor que a do ponto de melhor operação está desperdiçando energia e tendo maior deterioração. Também destaca que ao longo da vida útil de uma bomba comum, quando todos os custos para a operação e manutenção da bomba são considerados, 3% do custo total é referente à compra, enquanto que 74% dos custos são em relação ao consumo de energia.

De acordo com o Departamento de Energia Americano, a otimização de sistemas com ajustes da bomba aos parâmetros de projeto, sem que haja vazão ou pressão maior que o necessário, pode levar a uma economia de energia entre 10 e 30%, enquanto que o uso adequado de inversores de frequência para ajustar a rotação da bomba economiza em média 10,5% de energia. Este estudo afirma que a otimização do sistema de bombeamento pode resultar facilmente em economias da ordem de 20%, havendo casos em que economia de 30 a 40% são muitas vezes viáveis.

Moreira e Ramos (2013), com o uso de algoritmos genéticos, buscaram determinar o melhor padrão de funcionamento diário de bombas do sistema de abastecimento de Fátima, em Portugal, a fim de minimizar os custos operacionais com energia elétrica. O software WaterGEMS foi utilizado para as simulações hidráulicas devido ao módulo do programa que utiliza algoritmos genéticos. Com as análises foi possível verificar que os custos diários com energia para o sistema estudado podem ser reduzidos em até 43,7%.

Mais recentemente, os algoritmos de colônias de formigas têm sido utilizados para a otimização do projeto de sistemas de distribuição de água. Mayer et al (2003) utilizaram algoritmos de colônias de formigas para otimização de dois sistemas de distribuição de água, e os resultados foram comparados aos obtidos com utilização de algoritmos genéticos. Os resultados mostraram que os algoritmos de colônias de formigas devem ser considerados como uma alternativa aos algoritmos genéticos, visto que para os dois casos analisados estes se mostraram mais eficientes computacionalmente.

2.3 Inversores de frequência

O inversor de frequência utilizado em sistemas de bombeamento é um equipamento elétrico que possibilita a variação da frequência elétrica que alimenta o motor, causando uma variação da sua rotação ou velocidade (TSUTIYA, 2004).

Nos sistemas de abastecimento convencionais, em que as velocidades das bombas não se alteram, não é possível que os conjuntos moto-bomba se ajustem à variação de consumo dos usuários. Desta forma, não há otimização do fornecimento de água, além do sistema operar com uma pressão maior do que a necessária, provocando desperdício de energia, além de causar danos às redes, canalizações auxiliares e equipamentos nela instalados. (YANG et al., 2010)

EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) citam algumas vantagens e desvantagens da aplicação do inversor de frequência em sistemas de bombeamento, algumas vantagens são:

- Economia significativa de energia elétrica – já que a potência é proporcional a rotação da bomba, verifica-se que para um menor valor de vazão recalçada e menor rotação haverá também uma potência consumida pelo sistema muito menor;
- Controle de vazão submetendo assim o conjunto a uma carga muito menor quando comparado com o sistema convencional de controle de vazão através de válvulas;
- O inversor pode operar o sistema de bombeamento mais próximo do melhor rendimento do conjunto moto-bomba, buscando assim maior economia de energia.
- As pressões no sistema são mantidas bem próximas aos níveis mínimos requeridos, desta forma, as perdas físicas, diretamente ligadas a pressão, também se minimizam;
- Simplificação do controle operacional das bombas, visto que a ação de controle da vazão se pode ser feita diretamente no painel elétrico da estação elevatória, sem a necessidade do acionamento de válvulas mecânicas;

- Eliminação do transiente hidráulico causado com o acionamento e a parada de bombas, já que ação do inversor de frequência se faz de forma lenta e gradativa, tanto no acionamento como na parada.
- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico, pois como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios aumentando a vida útil;
- Redução do nível de ruído e vibração que são encontrados em sistemas convencionais em condições de baixa vazão, geralmente causados pela válvula de controle que se encontram nesse caso parcialmente abertas;

Também são citadas algumas desvantagens, dentre elas pode-se destacar:

- Custo de instalação relativamente alto;
- O inversor de frequência requer a implantação e a manutenção por técnicos especializados, devido aos circuitos sofisticados.
- A redução da rotação promove um aumento na temperatura do motor, havendo necessidade da instalação ser em um ambiente bem ventilado e livre de produtos inflamáveis.
- Pode haver subutilização do equipamento caso haja má localização de sensores no sistema, que são essenciais para a emissão de parâmetros que servirão de referência ao inversor de frequência para as correções necessárias na velocidade de rotação da bomba.
- Necessidade de implementação de sensores de pressão, vazão e nível em pontos críticos do sistema aumentando o custo do investimento;
- Limitação do uso em sistemas de bombeamento de líquido com partículas em suspensão, pois esse tipo de sistema requer uma velocidade mínima de bombeamento para que não ocorra sedimentação de partículas ao longo da tubulação de recalque, que podem ocasionar a obstrução da tubulação.
- A operação com o inversor de frequência afeta parâmetros significativos da bomba com a mudança de velocidade como o rendimento, o NPSH (Net Positive Suction Head, que representa a carga positiva de sucção) e a potência consumida;

- A instalação deve ser em um ambiente de baixa agressividade, pois os componentes eletrônicos são menos tolerantes a locais corrosivos e com umidade.

Gurgel (2006) avaliou a aplicação de inversores de frequência em quatro sistemas de bombeamento de água tratada da cidade de São José dos Campos. Foi proposta uma metodologia para a seleção de inversores de frequência, com base na metodologia recomendada pelo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004), em que foi feita a avaliação sequencial de um fluxograma e da análise gráfica das informações instantâneas e históricas dos parâmetros de vazão, pressão e frequência de rotação de um banco de dados existente. Em seu trabalho, concluiu-se que a aplicação de inversores de frequência nos sistemas estudados estava adequada e foi recomendada a sua aplicação em sistemas de bombeamento semelhantes.

Perroni e Wendland (2005) desenvolveram e testaram uma metodologia prática para avaliar o consumo de energia elétrica nos equipamentos de bombeamento de poços profundos utilizados em sistemas públicos de abastecimento de água, com base em séries históricas de dados operacionais e de monitoramento. O autor obteve que a utilização de equipamentos de bombeamento de alto desempenho poderia gerar uma redução média de 15% de consumo total de energia elétrica e indicou que com a utilização de inversores de frequência para o acionamento das bombas dos poços a economia pode ser ainda maior devido aos seguintes fatores:

- A capacidade da bomba do poço pode ser superdimensionada inicialmente, sem que isso represente um acréscimo de consumo de energia, pois as variações de nível da água serão compensadas com a mudança da rotação da bomba;
- Nos primeiros anos de operação, a bomba irá funcionar com baixa rotação e poderá ser acelerada progressivamente de forma a manter constante a vazão, mesmo que o poço venha a apresentar futuramente queda do nível dinâmico; e
- Durante cada partida da bomba haverá menor consumo de energia, pois a rotação da bomba será baixa devido ao nível dinâmico alto.

Ferreira (2007) apresenta uma metodologia de análise para a comparação entre o consumo energético de um sistema de bombeamento convencional, com controle de vazão por válvula de estrangulamento ou por inversor de frequência, com acionamento por motor padrão ou motor de alto rendimento. Com o motor convencional, para uma vazão de $2\text{m}^3/\text{h}$ o autor obteve que a economia obtida com a utilização do inversor de frequência frente ao controle por válvula de estrangulamento foi de aproximadamente 53%.

Segundo Haested et al (2004 *apud* GURGEL, 2006), a fim de evitar a pressurização constante das redes de um sistema de distribuição de água em que a reservação não flutue, uma bomba de velocidade variável pode ser eficiente no bombeamento direto de água aos consumidores, porém esta solução não se mostra tão eficiente quanto uma bomba de velocidade constante e um reservatório elevado corretamente dimensionado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Configurações dos sistemas de abastecimento de zonas altas

Este trabalho avaliou 3 diferentes configurações de sistemas para abastecimento de zonas altas, a fim de comparar o consumo energético dos sistemas de bombeamento para os diferentes casos. As configurações analisadas foram: bombeamento direto para reservatório de montante que abastece a rede; bombeamento para abastecimento de rede e reservatório de jusante e pressurização da rede através de elevatória com inversor de frequência.

Na configuração com reservatório de montante, o sistema de bombeamento de água recalca diretamente para um reservatório através de adutora virgem, sendo o reservatório responsável pelo abastecimento da rede de distribuição. Este sistema é amplamente aplicado devido à sua maior flexibilidade. Como a adutora não é conectada diretamente à rede, a mesma suporta maiores pressões internas, permitindo a aplicação desse sistema em locais onde há maior desnível entre a EET e as cotas mais elevadas a serem abastecidas.

No caso de sistemas com reservatório de jusante, o bombeamento é feito diretamente para a rede de distribuição, atendendo o consumo da população e o volume não consumido sendo nele armazenado. Quando o reservatório atinge seu nível máximo, o sistema de bombeamento é desligado, e a rede é abastecida somente pelo reservatório até que este atinja seu nível mínimo e o recalque se reinicie. É recomendada a implantação de uma tubulação principal para o recalque da EET ao reservatório, e a interligação da rede nesta tubulação, porém há casos em que a rede é conectada à EET sem qualquer alteração.

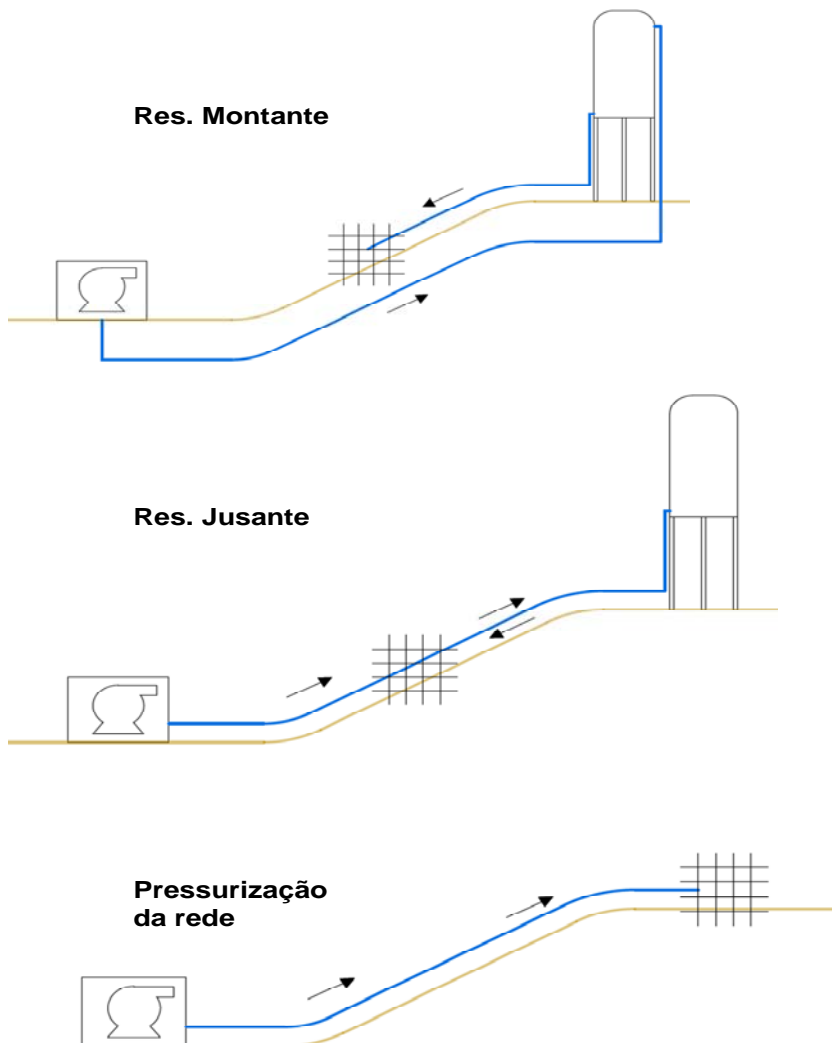
Para o terceiro caso, sistema com pressurização da rede e inversor de frequência, não há reservatório após a EET, sendo o abastecimento feito apenas pelo sistema de bombeamento, com a utilização de inversor de frequência. O inversor de frequência garante que a bomba opere em diferentes rotações de acordo com a necessidade de vazão a ser recalçada momentaneamente. O sistema de bombeamento pode ser programado para

que a pressão ou a vazão na saída na bomba sejam constantes. Com utilização de um pressostato o sistema pode ser configurado para que seja mantida a pressão mínima na rede.

Na

Figura 3 apresenta-se um esquema para cada tipo de configuração estudada.

Figura 3 - Representação esquemática das configurações de estudo.



3.2 Cálculo das vazões de projeto e dimensionamento de tubulações e reservatórios

Em sistemas de abastecimento, a vazão de projeto é calculada de acordo com as previsões de população e consumo a serem atendidos. O dimensionamento dos sistemas é feito de acordo com a vazão máxima a ser atendida, levando-se em conta a hora de maior consumo do dia de maior

consumo de água. Desta forma, o cálculo da vazão de distribuição (Q) de projeto foi feito através da Equação 4.

$$Q = \frac{K_1 * K_2 * P * q}{86400}$$

Equação 4

onde:

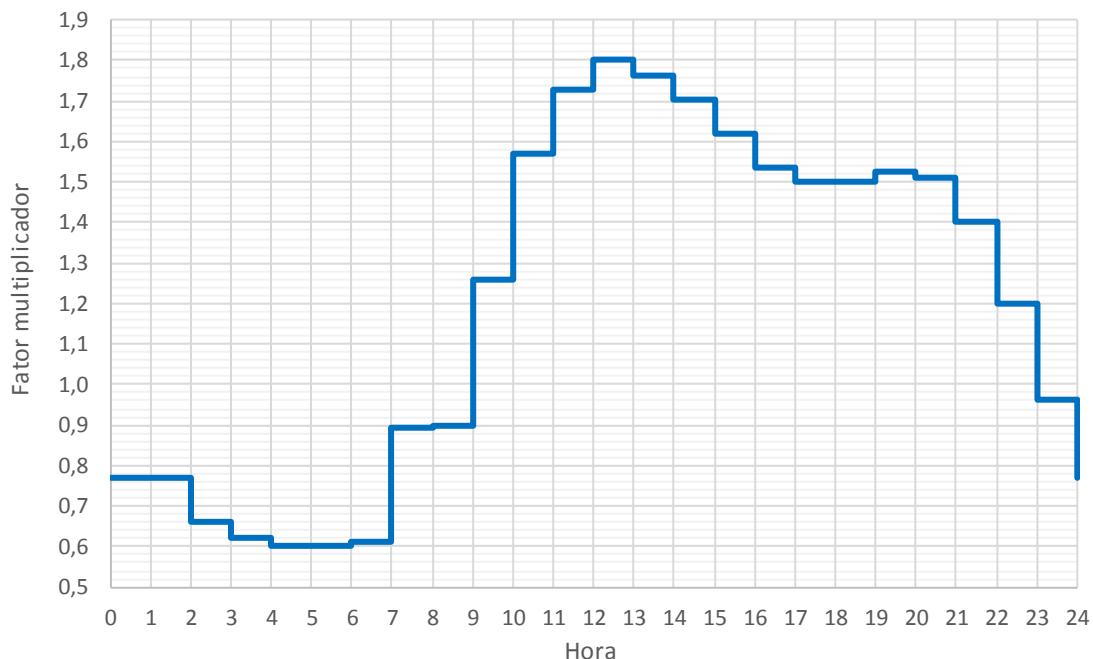
- Q = vazão de projeto (L/s);
- K1=Coeficiente do dia de maior consumo
- K2=Coeficiente da hora maior consumo
- P = População a ser abastecida
- q = Consumo per capta de água (L / hab. x dia)

Neste trabalho, os parâmetros adotados foram:

- Coeficiente do dia de maior consumo (K1) = 1,2;
- Coeficiente da hora de maior consumo (K2) = 1,5;
- Consumo per capta: 150 l / hab. x dia;

Para as simulações hidráulicas, foi utilizada a curva de consumo horário de acordo como apresentado na Figura 4. Esta curva de consumo, que geralmente é utilizada pela Sanepar – Uspond, distribui o consumo diário de forma realista, com baixo consumo durante a madrugada e maior consumo no período da tarde. Na delimitação do trabalho não foram consideradas variações de consumo mensais e anuais.

Figura 4 - Curva padrão de consumo horário.



Nas configurações com reservatório, a capacidade de reserva necessária foi tomada como igual ou maior que 1/3 do volume aduzido no dia de maior consumo.

Adotou-se como limites as velocidades mínimas de 0,6 m/s e máxima de 3,0 m/s tanto para o barrilete como para a tubulação de recalque, conforme recomendado pela NBR 12214/1992, sendo o dimensionamento feito buscando velocidades mais baixas, a fim de minimizar as perdas de carga na tubulação de recalque.

Com as vazões a serem simuladas e os diâmetros das tubulações para os diferentes casos, pode ser feito o cálculo da altura manométrica dos sistemas.

3.3 Cálculo das alturas manométricas e escolha das bombas

Para o cálculo da altura manométrica e escolha das bombas, são necessários dados a respeito da geometria do sistema, vazão a ser recalçada e perda de carga na tubulação. Inicialmente, foi feito o cálculo das perdas de carga nos sistemas.

Para o cálculo das perdas de carga nas tubulações, foi utilizada a fórmula universal. A altura manométrica do sistema de bombeamento denominada H_m é função da altura estática da elevação do fluido e das perdas de carga existentes no circuito. A altura manométrica é dada pela Equação 5:

#

$$H_m = DG + HR + h_a + h_b \quad \text{Equação 5.}$$

onde:

- H_m = Altura manométrica total (m)
- DG = Desnível geométrico (m)
- HR = altura de entrada no reservatório
- h_a = Perda de carga na tubulação de recalque (m)
- h_b = Perda de carga no barrilete (m)

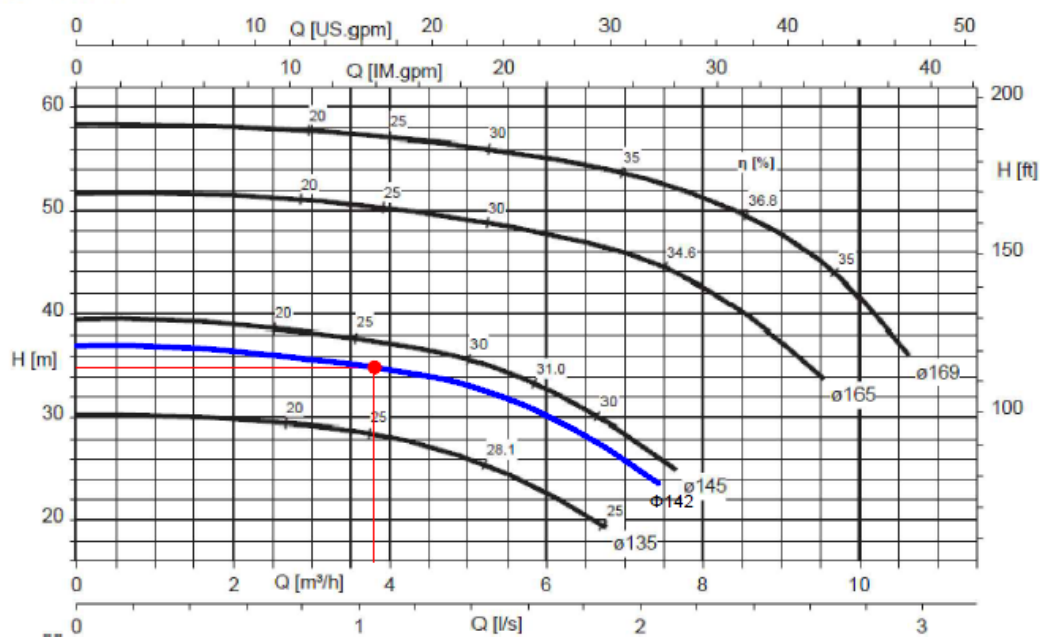
É necessário o cálculo da altura manométrica para cada vazão a ser recalçada para todas as configurações de sistema a serem analisadas. A escolha da bomba é feita através de catálogos de fabricantes.

Na Figura 5 mostra um exemplo de curvas de bombas disponível em catálogo.

Figura 5 - Exemplo de escolha de bombas em catálogo do fabricante.

MegaCPK 040-025-160, n = 3.500 rpm

Meganorm, Megabloc

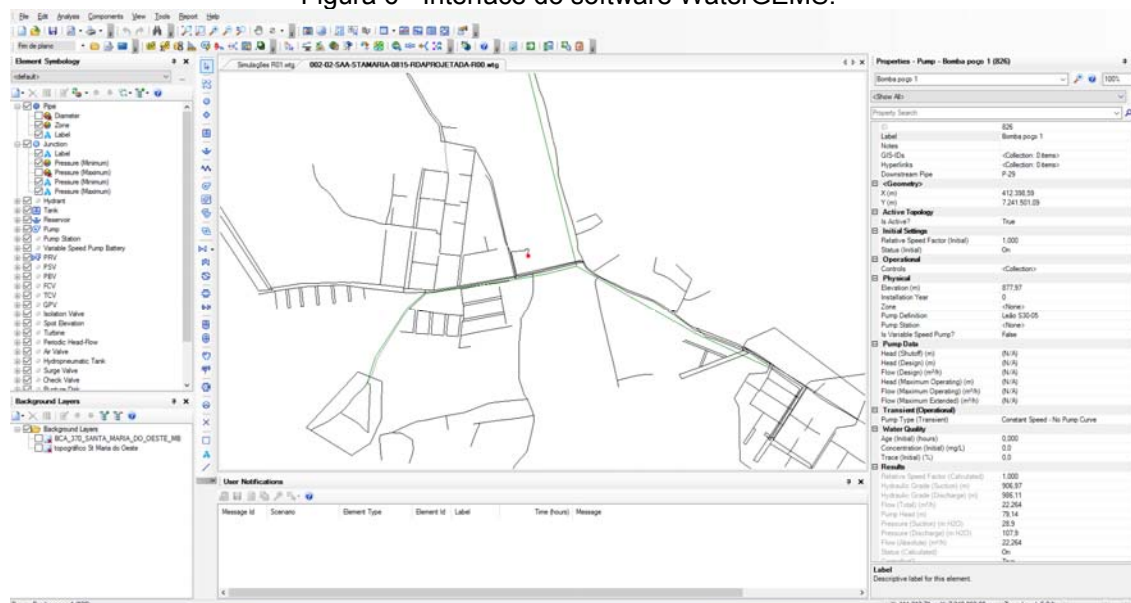


Na Figura 5, o ponto vermelho indica o ponto de operação do sistema, com a vazão e a altura manométrica de projeto. As curvas em preto mostram as curvas de operação da bomba com diâmetros padronizados de rotores. A curva em azul mostra a curva da bomba com diâmetro do rotor otimizado para o ponto de operação requerido, sendo os dados destas curvas inseridos do software. As curvas do sistema ainda apresentam o rendimento das bombas de acordo com a vazão recalçada.

3.4 Utilização do software WaterGEMS

Neste trabalho, foram feitas simulações hidráulicas com o software WaterGEMS V8i. Neste programa, são inseridos dados a respeito da fonte de abastecimento, topologia do sistema, estações de bombeamento, tubulações, reservatórios, consumo de água e custos de energia. Na Figura 6 mostra a interface do programa.

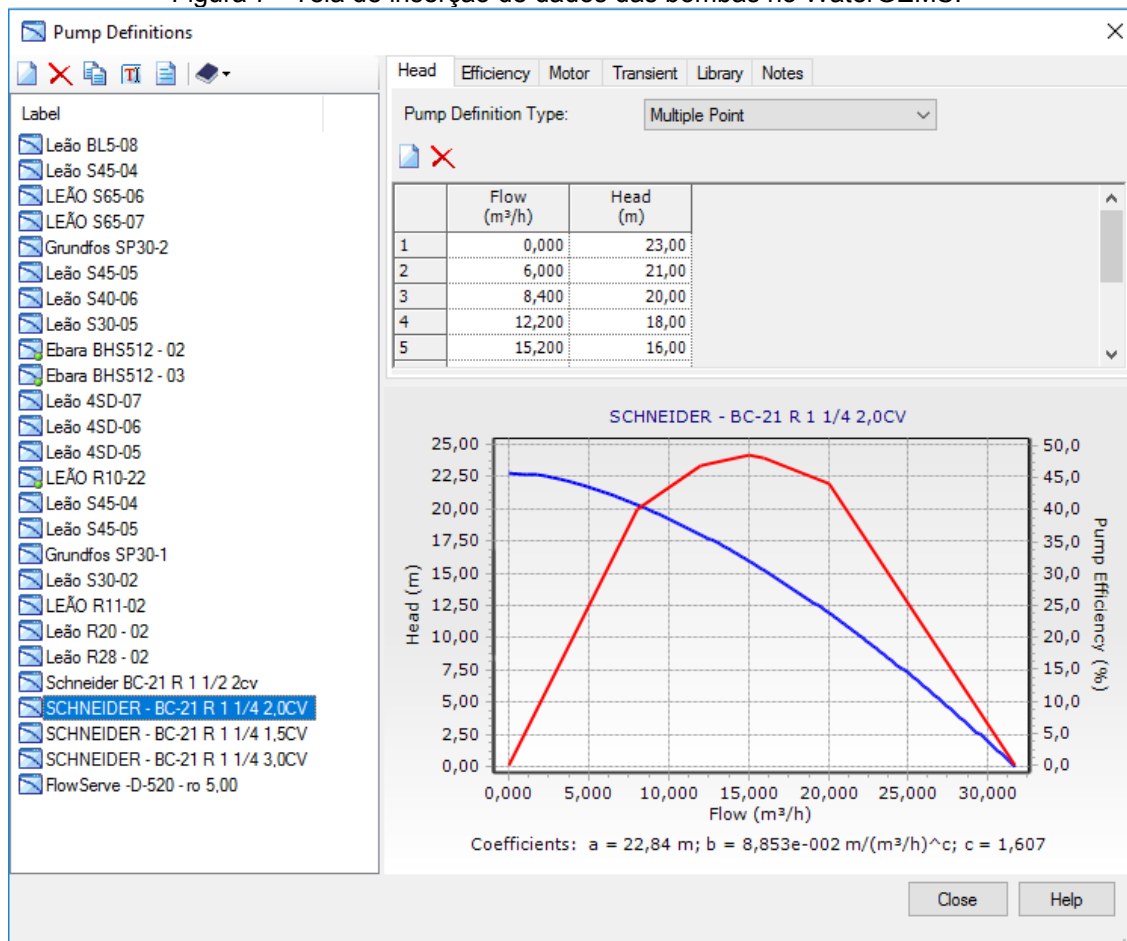
Figura 6 - Interface do software WaterGEMS.



Com as simulações, foi possível a obtenção de diversos dados acerca do funcionamento do sistema, como variação do consumo, vazão nas tubulações, pressão nos nós, nível dos reservatórios, funcionamento das estações elevatórias, eficiência das bombas, gastos com energia, entre outros.

As bombas foram inseridas no software através de suas curvas características, obtidas em catálogos de fabricantes. Além das curvas, da altura manométrica em função da vazão, também foram inseridas as curvas de eficiência. Na Figura 7 mostra a tela de inserção de dados das bombas no programa.

Figura 7 - Tela de inserção de dados das bombas no WaterGEMS.



Para as tubulações, foram inseridos dados como material, diâmetro, rugosidade, e comprimento. Foram inseridas tubulações que representam um anel de abastecimento de rede ou da adutora, quando esta é existente no sistema.

Nas configurações com reservatório, este foi inserido logo após o ponto mais distante da EET. Foram inseridas as dimensões do reservatório, da base em que o reservatório é assentado, além dos níveis operacionais. Considerou-se para todos os cenários a instalação de reservatórios elevados cilíndricos em fibra de vidro (PRFV), assentados sobre base com estrutura de concreto. As dimensões dos reservatórios para as diferentes capacidades dimensionadas foram obtidas de acordo com catálogo de fabricante. Usualmente, a base para reservatórios elevados (REL) costumam ter altura de 3,0, 6,0 ou 9,0m. As bases em cada cenário foram definidas de acordo com a altura do reservatório, de forma a garantir a pressão mínima de 10 m.c.a. no ponto da rede mais elevado e próximo ao reservatório.

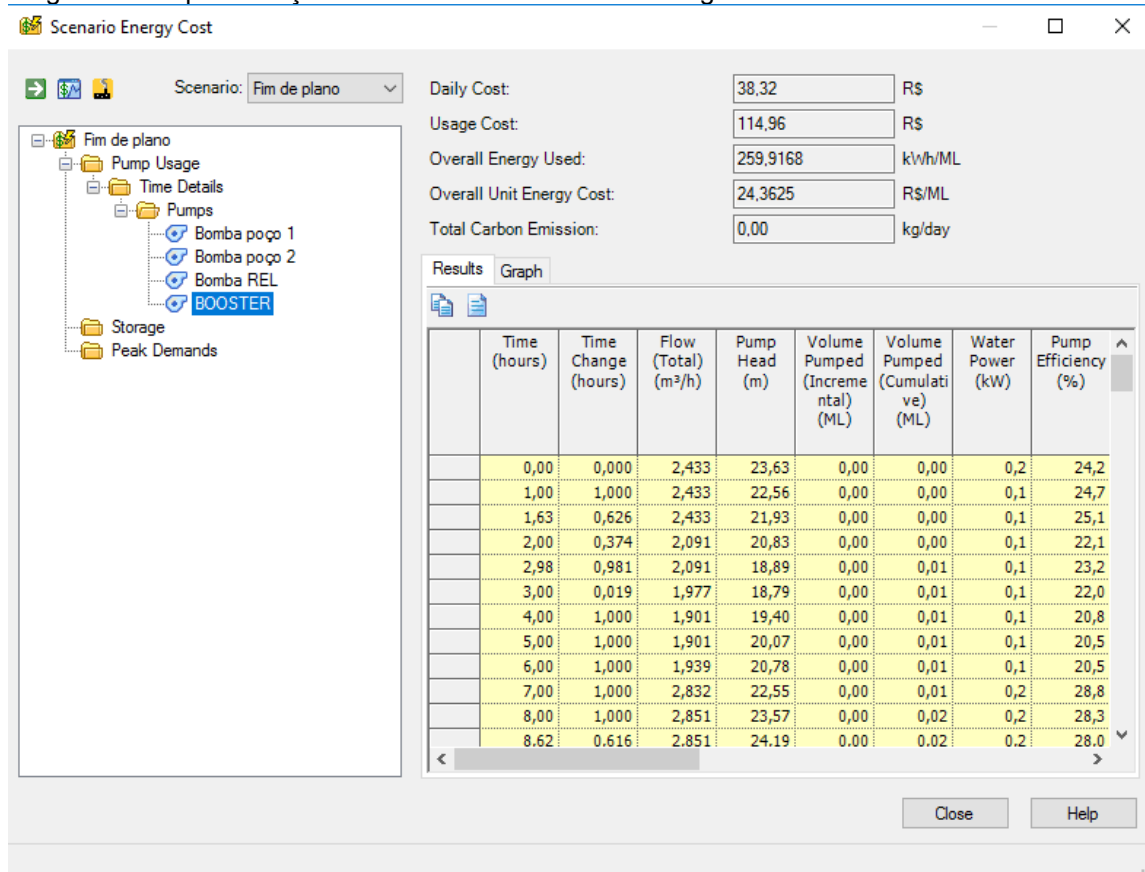
O consumo de água foi distribuído em diferentes nós. Além do volume consumido, é inserido no programa a curva de distribuição do consumo durante o dia, já contemplando os coeficientes k_1 e k_2 .

No Software WaterGEMS foram inseridas as tarifas referentes ao consumo de energia das bombas, desta forma o programa efetuou o cálculo dos gastos com operação do sistema. As tarifas utilizadas foram as tarifas vigentes para clientes do subgrupo A4 (2,3 a 25 kV), enquadrados na Modalidade Tarifária Azul. Segundo a Resolução ANEEL Nº 2.096, de 21 de junho de 2016, as tarifas sem os impostos ICMS e PIS/COFINS referentes ao consumo em horário de ponta é de R\$0,39683/kWh e R\$0,27930 fora de ponta. Sendo o horário de ponta das 18:00 as 21:00 horas. Nos sistemas com reservatórios, as bombas foram configuradas para não funcionarem nos horários de ponta.

Foram feitas simulações dos sistemas para 120 horas de operação. Utilizando um período estendido de simulação, são minimizados os efeitos da variação diária no funcionamento das bombas. Neste período, o software calcula as variações horárias no consumo, variação no nível dos reservatórios, horários de funcionamento das bombas, vazão e volume recalçados, eficiência das bombas, energia consumida e custos referentes à energia, entre outros dados.

Na Figura 8 mostra a apresentação de dados sobre consumo energético dada pelo WaterGEMS.

Figura 8 – Representação de dados sobre consumo energético obtidos com o WaterGEMS.



Para avaliar qual configuração do sistema com menor consumo de energia, foram analisados e comparados os resultados obtidos com relação ao do custo por volume bombeado, além do custo e consumo anuais com energia.

3.5 Simulações com sistemas esquemáticos

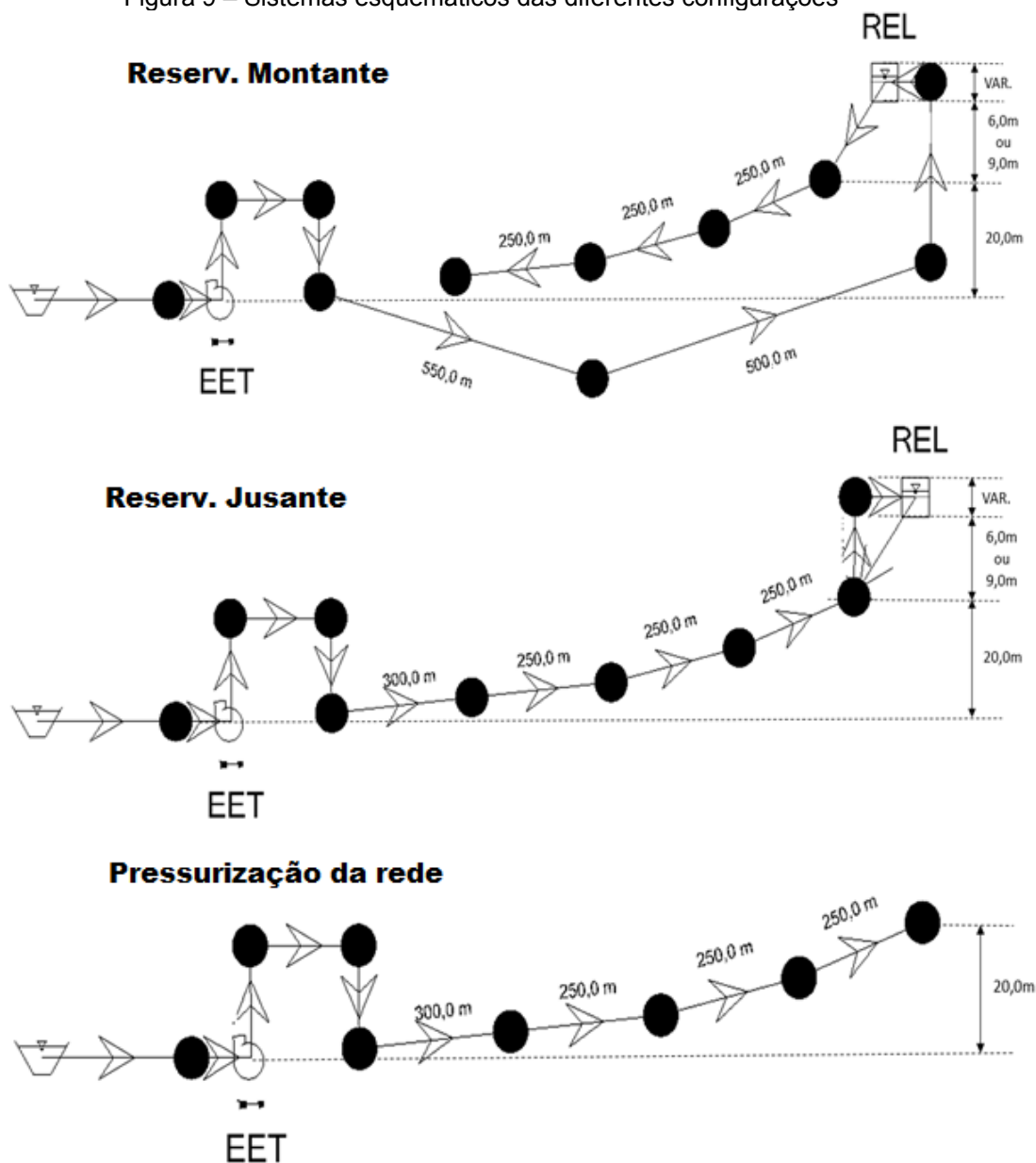
Para as simulações foi definido um sistema esquemático básico, em que as características básicas das três configurações de sistema pudessem ser avaliadas de forma semelhante. Para isso, foi estabelecida uma topografia genérica, representando o desnível e a distância entre as fontes de abastecimento e áreas mais altas a serem atendidas, considerando casos reais já projetados na atividade profissional, resultando em diferença de cota de 20 metros e distância de 1.000 m entre a EET e o ponto mais distante da rede.

Foram estabelecidas faixas de vazão de abastecimento com objetivo de representarem sistemas de pequeno e médio porte, com população atendida de 250 pessoas a 3.330 pessoas. As populações foram definidas considerando os principais volumes de reservatórios em PRFV existentes comercialmente.

Para representar a fonte de abastecimento do sistema, correspondente ao reservatório, estação de tratamento de água (ETA) ou rede de abastecimento à montante da estação elevatória, foi inserida uma fonte de água infinita, já que foi considerado que haverá disponibilidade hídrica para o funcionamento do sistema. Para cada uma das 3 configurações de sistema avaliadas, e faixas de vazão, foram feitos o dimensionamento das tubulações de barrilete e de recalque, dimensionamento do reservatório nas configurações em que este está presente, cálculo da altura manométrica, escolha das bombas. Após obtenção destes parâmetros, estes foram inseridos no programa computacional para realização das simulações.

Na Figura 9 apresenta os esquemas simulados no software WaterGEMS para as diferentes faixas de vazão.

Figura 9 – Sistemas esquemáticos das diferentes configurações

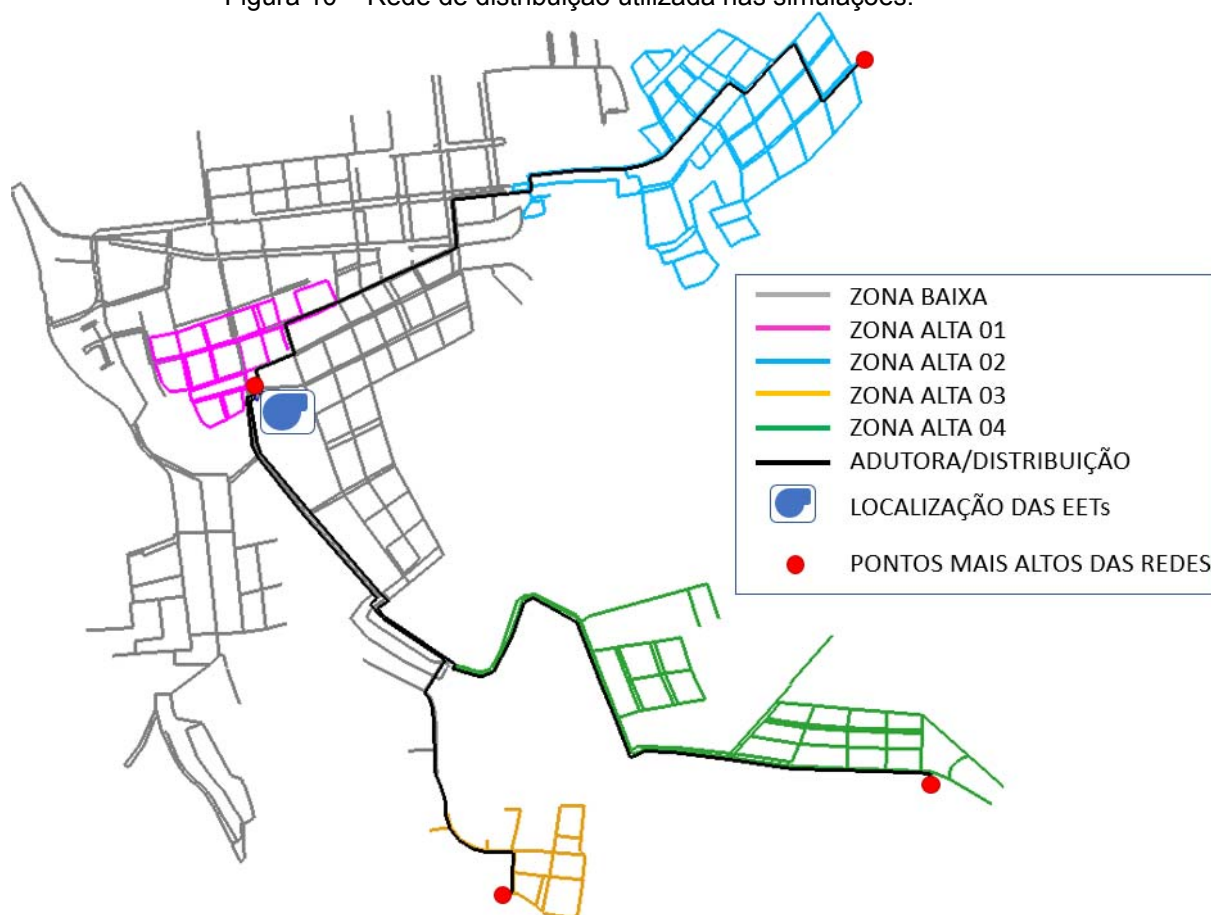


A estação de bombeamento foi inserida na cota 0,00 dos sistemas esquemáticos. Na configuração do sistema com inversor de frequência, a bomba foi programada para variar as suas rotações de forma que seja mantida a pressão mínima de 10 m.c.a. no ponto mais distante da rede. Já nas configurações com reservatórios, a operação da bomba foi definida de forma que esta entre em operação quando o reservatório se esvazia à metade de sua altura e parando quando este atinge sua capacidade máxima.

3.6 Simulações com rede de distribuição

A fim de aproximar as condições do trabalho à realidade, foram feitas também simulações em uma rede de distribuição fictícia, baseada na rede existente na cidade de Sapopema-PR. Devido a topografia do local e a localização do centro de distribuição, são necessárias estações elevatórias para o abastecimento de 04 zonas altas. Na Figura 10 é apresentada a rede de distribuição utilizada nas simulações.

Figura 10 – Rede de distribuição utilizada nas simulações.



As estações elevatórias encontram-se no mesmo terreno onde se situam a estação de tratamento de água e os reservatórios principais. Foi considerado que a produção de água e a reservação são suficientes para o abastecimento de todo o sistema, sendo que foi desconsiderada a variação do nível dos reservatórios à montante das EETs.

Nas configurações com reservatórios (REL), estes foram inseridos nos nós com cota mais elevada das zonas altas estudadas, Já na configuração com inversor de frequência, este nó foi tomado como nó de controle para manutenção da pressão mínima em 10m.c.a.

Foram dimensionadas as tubulações interligando as EETs a estes nós, atuando como adutora sem interligação com a rede no sistema quando o reservatório é de montante, interligada à rede quando o reservatório é de jusante e quando o controle é por inversor de frequência.

A Zona Alta 01 encontra-se próxima as EETs, sendo o ponto mais alto dela no mesmo nível das EETs. A rede de distribuição da Zona Alta 01 tem 3.658m de tubulações, abastecendo uma população de 999 habitantes.

Na Zona Alta 02 foi considerada uma população de 2.506 habitantes, abastecidos por 9.706m de rede. O nó mais alto desta rede está localizado num ponto distante 2.222,80m e num nível 5,00m acima do local onde foram instaladas as EETs.

A Zona Alta 03 tem uma população de 508 habitantes, abastecidos por 1.884m de rede. O ponto mais alto desta rede está a 1.664,13m da localização das EETs e numa cota 15,65m mais elevada.

Já a Zona Alta 04 tem 1.507 habitantes, sua rede de distribuição tem 8.152m de tubulações, estando o ponto mais alto a 2.532,71m de distância das EETs e com 10,40m de elevação.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados dos estudos com sistemas esquemáticos

4.1.1 Cálculo das vazões de projeto, dimensionamento dos reservatórios e escolha das bombas

Na Tabela 2 apresenta-se os parâmetros básicos de projeto calculados para as simulações do sistema esquemático, com a vazão de projeto, diâmetros nominais (DN) das tubulações e capacidade do reservatório. Os valores calculados para diâmetro dos tubos e volume do reservatório foram aproximados para os existentes comercialmente.

Tabela 2 - Parâmetros básicos de projeto calculados para sistema esquemático.

| População abastecida (hab.) | Vazão de projeto (m³/h) | DN do barrilete (mm) | DN da tubulação de recalque (mm) | Cap. do reservatório (m³) |
|------------------------------------|---|-----------------------------|---|---|
| 250 | 2,81 | 32 | 50 | 15 |
| 500 | 5,63 | 50 | 50 | 30 |
| 1000 | 11,25 | 65 | 75 | 60 |
| 1650 | 18,56 | 80 | 100 | 100 |
| 2000 | 22,50 | 80 | 100 | 120 |
| 2500 | 28,13 | 100 | 100 | 150 |
| 3330 | 37,46 | 100 | 150 | 200 |

Conforme visto na Tabela 2. As faixas de vazão analisadas variam de 2,81 a 37,46m³, o DN do barrilete do sistema de bombeamento de DN32 a DN100, a tubulação de recalque de DN50 a DN150 e os reservatórios de 15 a 200m³.

Na Tabela 3 apresenta-se a perda de carga calculada no barrilete para os diferentes sistemas.

Tabela 3 – Perda de carga no barrilete para sistema esquemático.

| População | Barrilete | | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 250 | 500 | 1000 | 1650 | 2000 | 2500 | 3330 |
| DN | 32 | 50 | 65 | 80 | 80 | 100 | 100 |
| Material: | FG | FG | FG | FG | FG | FG | FG |
| Rugosidade e (m) | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| Diâmetro interno (mm) | 35,2 | 52,5 | 65,7 | 77,9 | 77,9 | 102,3 | 102,3 |
| Diâmetro interno (m) | 0,0352 | 0,0525 | 0,0657 | 0,0779 | 0,0779 | 0,1023 | 0,1023 |
| Comprimento real (m) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Comprimento equivalente (m) | 6,98 | 11,08 | 13,56 | 16,4 | 16,4 | 21,9 | 21,9 |
| Comprimento total (m) | 12,98 | 17,08 | 19,56 | 22,4 | 22,4 | 27,9 | 27,9 |
| Vazão (m ³ /h) | 2,8 | 5,6 | 11,3 | 18,6 | 22,5 | 28,1 | 37,5 |
| Vazão (m ³ /s) | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,010 |
| Velocidade (m/s) | 0,80 | 0,72 | 0,92 | 1,08 | 1,31 | 0,95 | 1,27 |
| Rey | 28063 | 37631 | 60140 | 83690 | 101443 | 96559 | 128617 |
| <i>f</i> | 0,02376 | 0,02219 | 0,01998 | 0,01863 | 0,01790 | 0,01811 | 0,01710 |
| <i>J</i> | 0,02220 | 0,01123 | 0,01318 | 0,01428 | 0,02016 | 0,00816 | 0,01367 |
| Perda de carga | 0,29 | 0,19 | 0,26 | 0,32 | 0,45 | 0,23 | 0,38 |

Pode-se observar que a perda de carga no barrilete varia de 0,19 a 0,45. Na Tabela 4 apresenta-se as perdas de carga calculadas na tubulação de recalque.

Tabela 4 – Perdas de carga na tubulação de recalque, para sistema esquemático.

| Tubulação de recalque | | | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| População | 250 | 500 | 1000 | 1650 | 2000 | 2500 | 3330 |
| DN | 50 | 50 | 75 | 100 | 100 | 100 | 150 |
| Material: | PVC | PVC | PVC | PVC | PVC | PVC | PVC |
| Rugosidade e (m) | 0,0000 1 | 0,0000 1 | 0,0000 1 | 0,0000 1 | 0,0000 1 | 0,0000 1 | 0,0000 1 |
| Diâmetro interno (mm) | 54,6 | 54,6 | 77,2 | 100 | 100 | 100 | 156,4 |
| Diâmetro interno (m) | 0,0546 | 0,0546 | 0,0772 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1000 | 0,1564 |
| Comprimento real (m) | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 | 1000,0 |
| Comprimento equivalente (m) | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 | 50,0 |
| Comprimento total (m) | 1050 | 1050 | 1050 | 1050 | 1050 | 1050 | 1050 |
| Vazão (m³/h) | 2,8 | 5,6 | 11,3 | 18,6 | 22,5 | 28,1 | 37,5 |
| Vazão (m³/s) | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,010 |
| Velocidade (m/s) | 0,33 | 0,67 | 0,67 | 0,66 | 0,80 | 0,99 | 0,54 |
| Rey | 18092 | 36183 | 51181 | 65195 | 79024 | 98780 | 84127 |
| f | 0,0264 7 | 0,0223 5 | 0,0206 5 | 0,0195 7 | 0,0187 7 | 0,0179 1 | 0,0185 3 |
| J | 0,0027 5 | 0,0093 0 | 0,0060 8 | 0,0043 0 | 0,0060 7 | 0,0090 4 | 0,0017 7 |
| Perda de carga | 2,89 | 9,77 | 6,39 | 4,52 | 6,37 | 9,49 | 1,86 |

Para o cálculo da altura manométrica dos cenários com pressurização da rede, foi considerado que o sistema de bombeamento deveria garantir a pressão mínima na rede de 10m.c.a. no ponto mais alto e distante da EET. Já para os cenários com reservatórios, o sistema de bombeamento deveria garantir o abastecimento do REL, enquanto que o reservatório também deveria garantir pressão mínima na rede de 10m.c.a. no ponto mais alto e distante da EET, sendo neste caso o ponto mais próximo do REL. Na Tabela 5 apresenta-se as dimensões dos reservatórios utilizadas.

Tabela 5 – Dimensões dos reservatórios utilizados para o abastecimento das populações dos diferentes cenários para sistema esquemático.

| População (hab) | 250 | 500 | 1000 | 1650 | 2000 | 2500 | 3330 |
|---|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Capacidade (m³) | 15 | 30 | 60 | 100 | 120 | 150 | 200 |
| Diâmetro (m) | 2,00 | 3,00 | 3,30 | 3,30 | 3,80 | 3,80 | 4,00 |
| Altura total (m) | 4,99 | 4,54 | 7,37 | 12,09 | 10,90 | 13,55 | 16,41 |
| Altura útil (m) | 4,49 | 3,79 | 6,54 | 11,26 | 9,95 | 12,60 | 15,41 |
| Altura média (m) | 2,25 | 1,90 | 3,27 | 5,63 | 4,98 | 6,30 | 7,71 |
| Altura da base do REL (m) | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 9,00 | 6,00 | 6,00 |
| Altura da entrada no reserv. (m) | 13,49 | 12,79 | 15,54 | 20,26 | 18,95 | 18,60 | 21,41 |

As dimensões utilizadas são referentes ao catálogo comercial da fabricante EDRA. A altura de entrada no reservatório é a soma da altura útil e altura da base dos reservatórios. Para os reservatórios de menor capacidade, foram consideradas bases com 9,00m de altura, a fim de garantir a pressão mínima de 10m.c.a. considerando as variações de nível já nos reservatórios maiores, pode ser considerada uma altura da base de 6,00m, devido à maior altura do nível de água.

Para escolha das bombas, foram utilizados dados de catálogos comerciais. Para uniformização dos resultados, em todos os cenários foram empregadas bombas centrífugas de um único fabricante. As bombas utilizadas foram da linha da fabricante KSB MegaCPK/Meganorm/Megabloc, pois a fabricante permite a usinagem de rotores com diâmetro otimizado para a curva do sistema calculado, por isso, sobre as curvas do catálogo foram traçadas curvas que passassem pelo ponto de operação dos sistemas calculados. As curvas do catálogo são mostradas no Anexo 1.

Na Tabela 6 apresenta-se as bombas utilizadas para os cenários com pressurização da rede e na Tabela 7 as dos cenários com reservatórios

Tabela 6 – Bombas utilizadas nos cenários com pressurização da rede para sistema esquemático

| Vazão (m³/h) | Altura manométrica total (m.c.a) | Bomba |
|---------------------|---|-----------------------|
| 2,81 | 33,18 | Mega 040-025-160 Φ140 |
| 5,63 | 39,96 | Mega 040-025-160 Φ155 |
| 11,25 | 36,64 | Mega 050-032-160 Φ147 |
| 18,56 | 34,84 | Mega 050-032-160 Φ156 |
| 22,50 | 36,82 | Mega 060-040-160 Φ147 |
| 28,13 | 39,72 | Mega 060-040-160 Φ156 |
| 37,46 | 32,24 | Mega 080-050-160 Φ131 |

Tabela 7 – Bombas utilizadas nos cenários com reservatórios para sistema esquemático.

| Vazão (m³/h) | Altura manométrica total (m.c.a) | Bomba |
|---------------------|---|-----------------------|
| 2,81 | 36,67 | Mega 040-025-160 Φ144 |
| 5,63 | 42,75 | Mega 040-025-160 Φ161 |
| 11,25 | 42,18 | Mega 050-032-160 Φ147 |
| 18,56 | 45,10 | Mega 050-032-160 Φ168 |
| 22,50 | 45,77 | Mega 060-040-160 Φ159 |
| 28,13 | 48,32 | Mega 060-040-160 Φ168 |
| 37,46 | 43,65 | Mega 080-050-160 Φ150 |

As curvas de operação e de eficiência dessas bombas foram inseridas no software para realização das simulações hidráulicas.

4.1.2 Resultados das simulações

Nas Figura 11 a Figura 14 são ilustrados os resultados obtidos, no software WaterGEMS, para as três configurações, considerando a vazão de 28,1m³/h, para facilitar a comparação entre elas. Na Figura 11 os resultados são dos horários de funcionamento da bomba e a vazão recalçada e na Figura 12 a altura manométrica. Na Figura 13 apresenta-se o consumo de energia das bombas e na Figura 14 o gasto financeiro com energia elétrica, considerando os valores vigentes de tarifas.

Figura 11 – Variação da vazão recalçada na simulação com vazão de 28,1 m³/h para as configurações estudadas

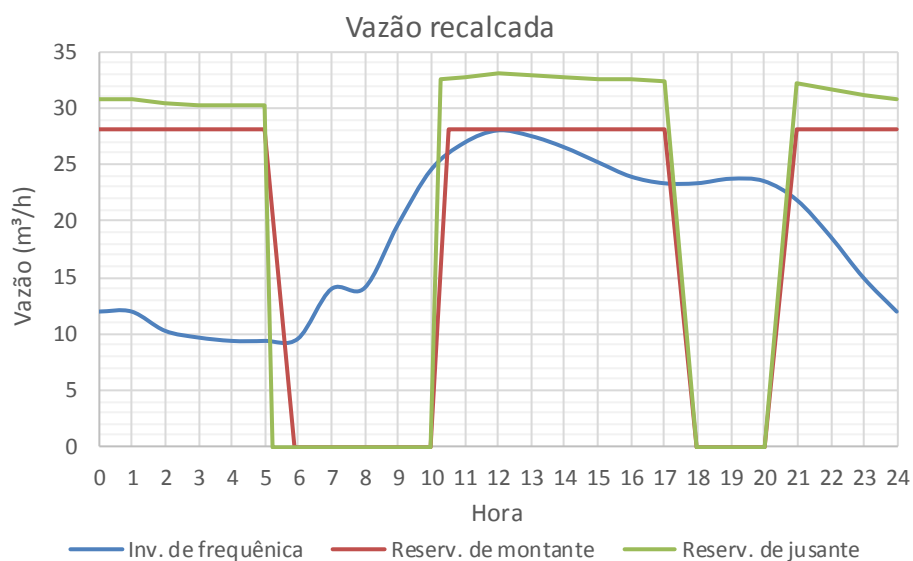


Figura 12 – Variação da altura manométrica das bombas na simulação com vazão de 28,1 m³/h para as configurações estudadas

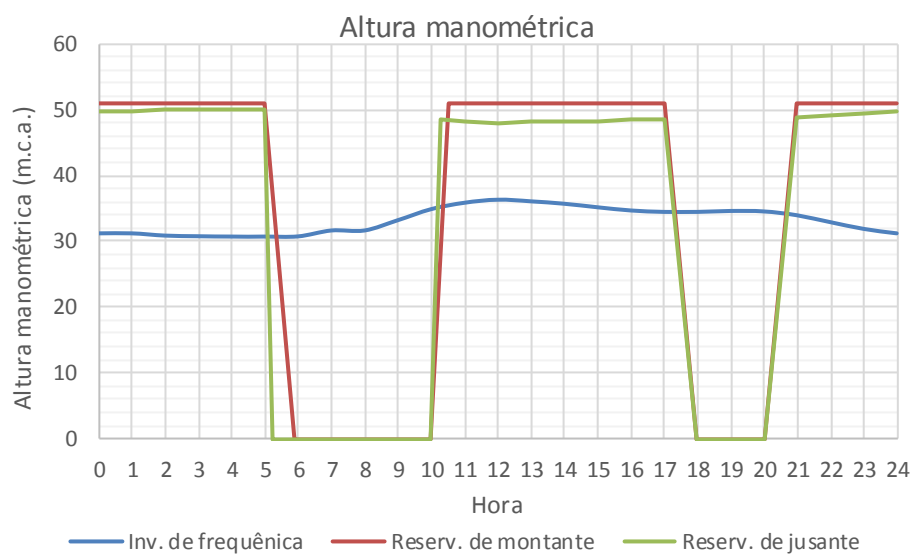


Figura 13 – Consumo de energia das bombas para vazão de projeto de 28,1m³/h e todas as configurações simuladas

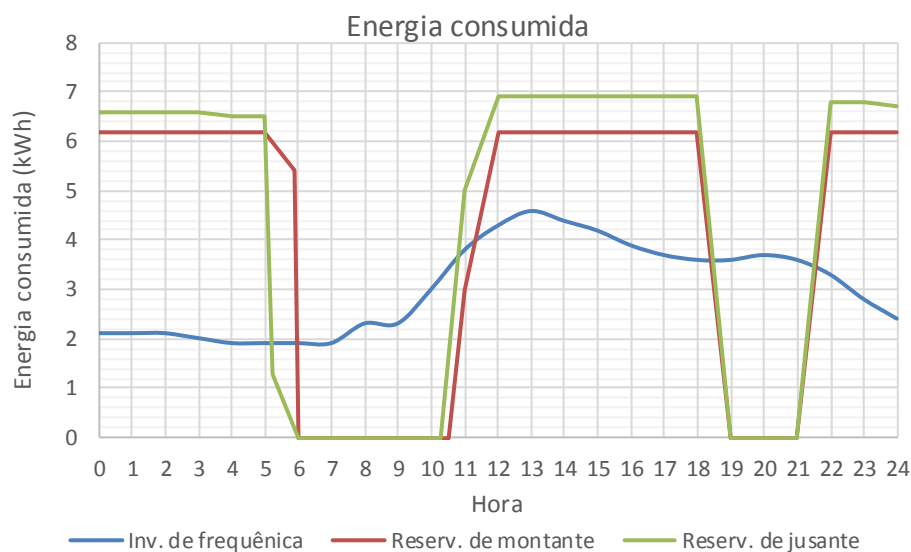
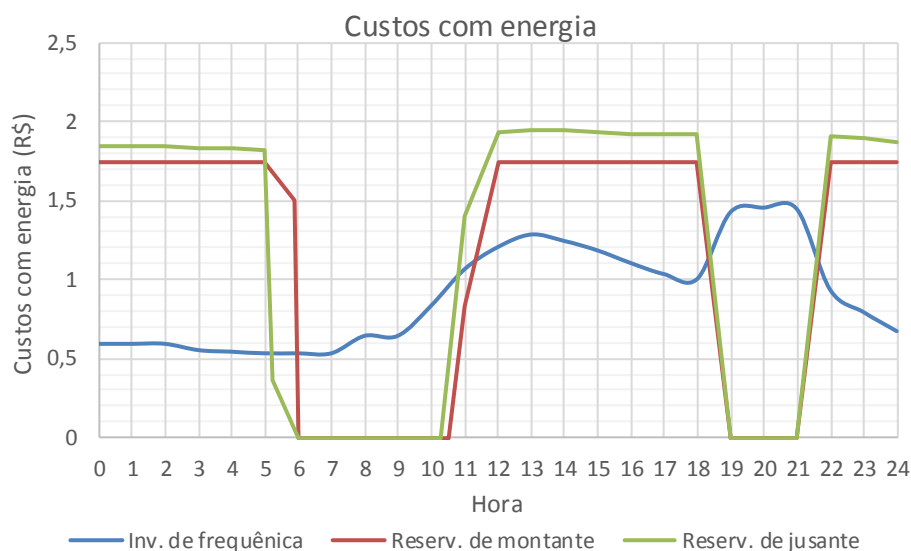


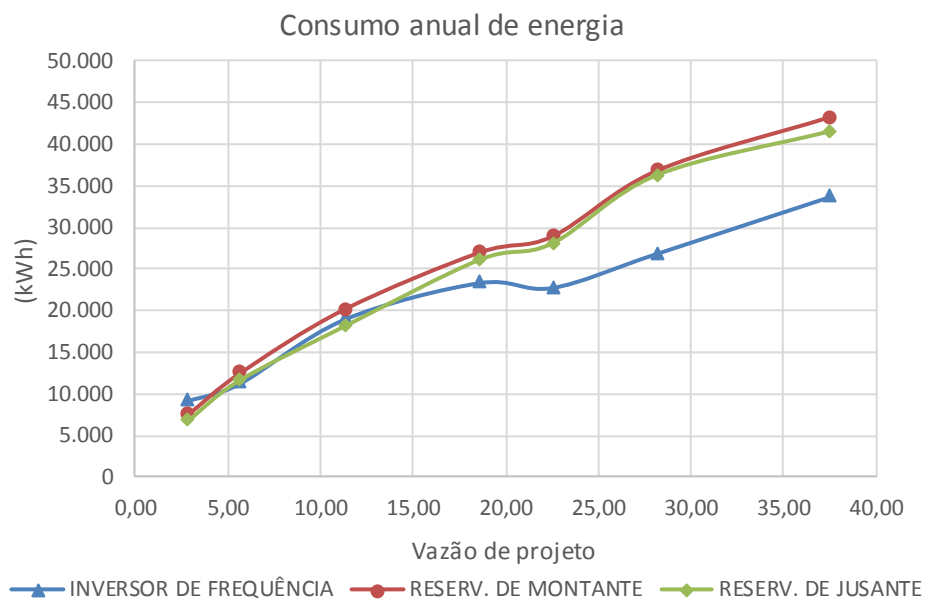
Figura 14 – Gastos com energia das bombas para vazão de projeto de 28,1m³/h e todas as configurações simuladas



Verifica-se que nos sistemas com reservatórios, as bombas ficam inoperantes nos horários com o custo energia kw/h mais caro, conforme foram programadas para não entrarem em operação, e durante o período da manhã, quando o consumo é menor e os reservatórios conseguem manter o abastecimento.

Na Figura 15 apresenta-se o consumo anual de energia dos diferentes sistemas para as diferentes faixas de vazão analisadas.

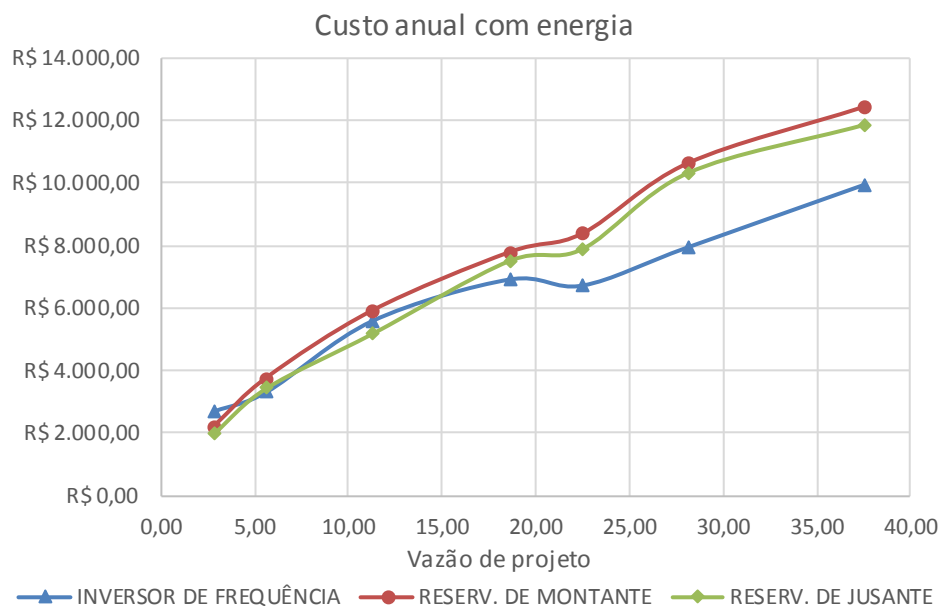
Figura 15 - Consumo anual de energia em função da vazão de projeto para todas as configurações simuladas



Observa-se que para a menor vazão analisada (2,81 m³/h), a configuração com menor consumo energético é a com reservatório de jusante, sendo o consumo energético anual da configuração com reservatório de montante é 10% maior, enquanto que o consumo da configuração com pressurização da rede é 36% maior. Já para a maior faixa de vazão analisada, a configuração de sistema que apresenta o menor consumo energético é a pressurização da rede. Para este caso, o consumo do sistema com reservatório de jusante é 23% maior, enquanto que com reservatório de montante é 28% maior.

Na Figura 16 mostra-se a variação do custo anual com energia para funcionamento das EETs.

Figura 16 – Custo anual com energia em função da vazão de projeto para todas as configurações estudadas



Para a menor faixa de vazão analisada (2,81 m³/h) a configuração com reservatório de jusante, a mais econômica, tem um custo anual com energia elétrica para operação de R\$2.022,10. Em seguida, a configuração com reservatório de montante tem um custo de R\$2.222,85 e a com inversor de frequência demanda R\$2.708,30 a cada ano. Neste caso, durante um período de projeto de 20 anos, a economia de energia entre um sistema com reservatório de jusante e com inversor de frequência é de R\$13.724,00. Este valor é bastante inferior ao custo de implantação de um reservatório em PRFV de 15 m³, que pode alcançar os R\$150.000,00 quando considerados também os custos da estrutura de base do REL.

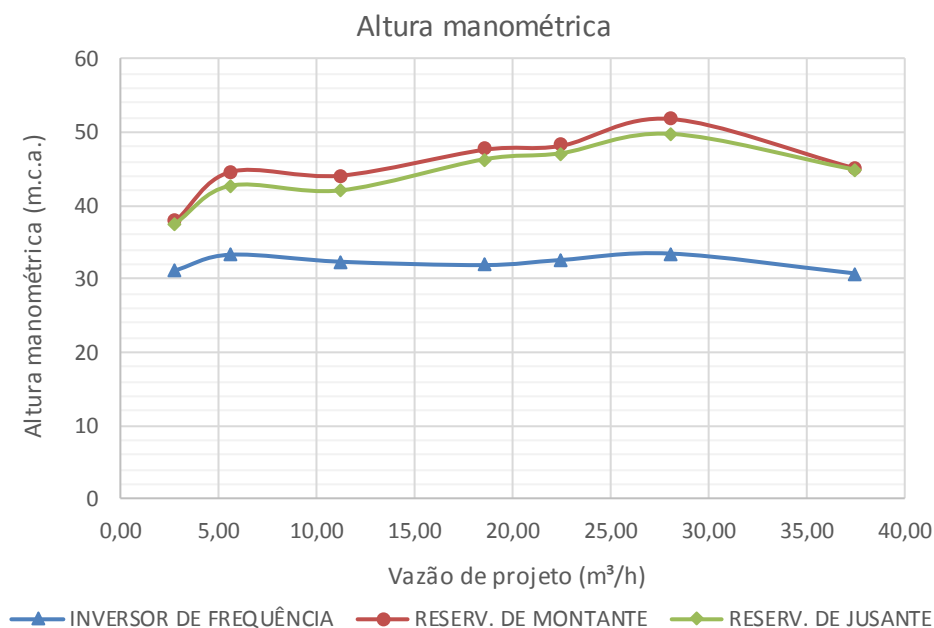
Já para a maior faixa de vazão estudada (37,46 m³/h), o sistema controlado por inversor de frequência tem o menor gasto com energia, demandando anualmente R\$9.946,25 (consumo de 33.682,20 kWh), enquanto que para o sistema com reservatório de jusante é de R\$11.877,10 (consumo de 41.427,50 kWh) anuais e R\$12.446,50 (consumo de 43.208,70 kWh) para o sistema com reservatório de montante. Para um período de projeto de 20 anos, a economia com energia elétrica quando utilizado um sistema com inversor de frequência em relação a um sistema com reservatório de montante é de R\$50.005,00. O custo total de implantação de

um reservatório elevado com capacidade de 200m³ é de aproximadamente R\$335.000,00.

Apesar do menor gasto com energia elétrica apresentado pelo uso do inversor de frequência, deve ser levado em conta pelas empresas de saneamento, nas tomadas de decisões, os maiores riscos relacionados principalmente a quedas de energia. Com a falta de energia elétrica, o bombeamento é interrompido, causando desabastecimento imediato da rede, que além de prejudicar o consumo d'água pode facilitar infiltrações e contaminação da rede. Nas configurações com reservatórios, o desabastecimento não ocorre de imediato, pois os mesmos mantêm um volume armazenado que é utilizado até a normalização do sistema. Além disso, quedas de energia podem causar danos ao inversor de frequência, necessitando de reparos, através de mão de obra especializada existente apenas em grandes centros urbanos.

Uma das causas do maior consumo de energia pelos sistemas com reservatórios é a maior altura manométrica a ser vencida pelo sistema de bombeamento, principalmente devido ao desnível geométrico imposto pelo reservatório (REL) para cada faixa de vazão simulada. Com inversores de frequência, pode-se configurar a EET para que a pressão mínima na rede no ponto mais alto seja o limite recomendado de 10 m.c.a., enquanto que com os reservatórios, a pressão mínima deve ser suficiente para garantir o enchimento do reservatório, que além de estar apoiado sobre uma base elevada tem sua entrada pela parte superior. Na Figura 17 apresenta-se a variação da altura manométrica para as diferentes faixas de vazão analisadas.

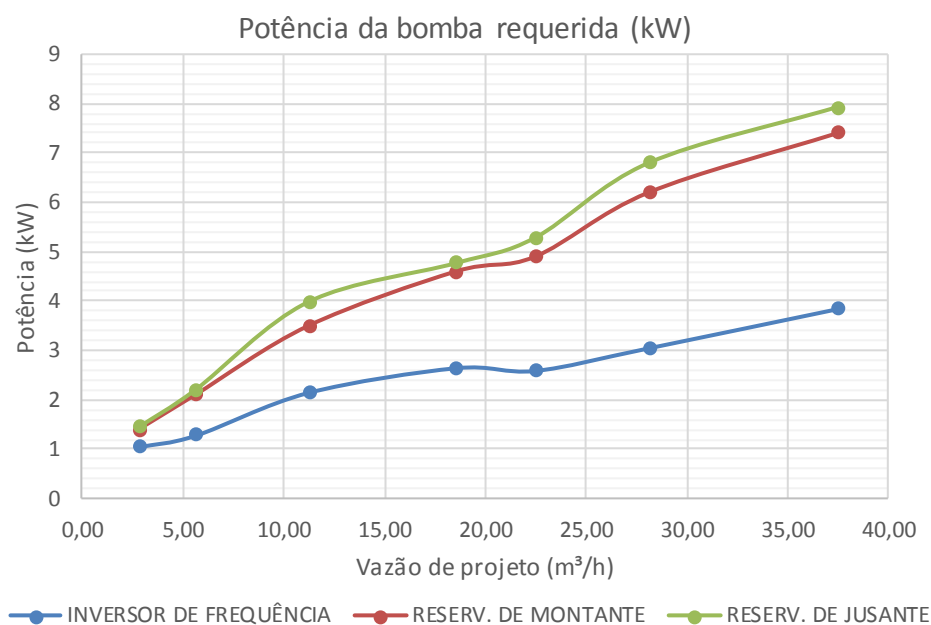
Figura 17 – Variação de altura manométrica com a vazão de projeto para todas configurações simuladas



A altura manométrica para o sistema com reservatório de montante para a vazão de 37,5m³/h, que representa o caso com a maior altura de entrada no reservatório (6,00m de base e 15,41m de altura do reservatório), é de 44,89m.c.a., já a altura manométrica para o sistema inversor de frequência e mesma vazão é de 30,73m.c.a. Reservatórios mais largos e baixos poderiam diminuir a altura a ser vencida pela bomba, porém necessitariam de bases maiores e mais dispendiosas de serem construídas. No caso de reservatórios de fibra de vidro, com maior largura também apresentam maior dificuldade de transporte.

Na Figura 18 mostra a potência requerida pelas bombas para as diferentes faixas de vazão.

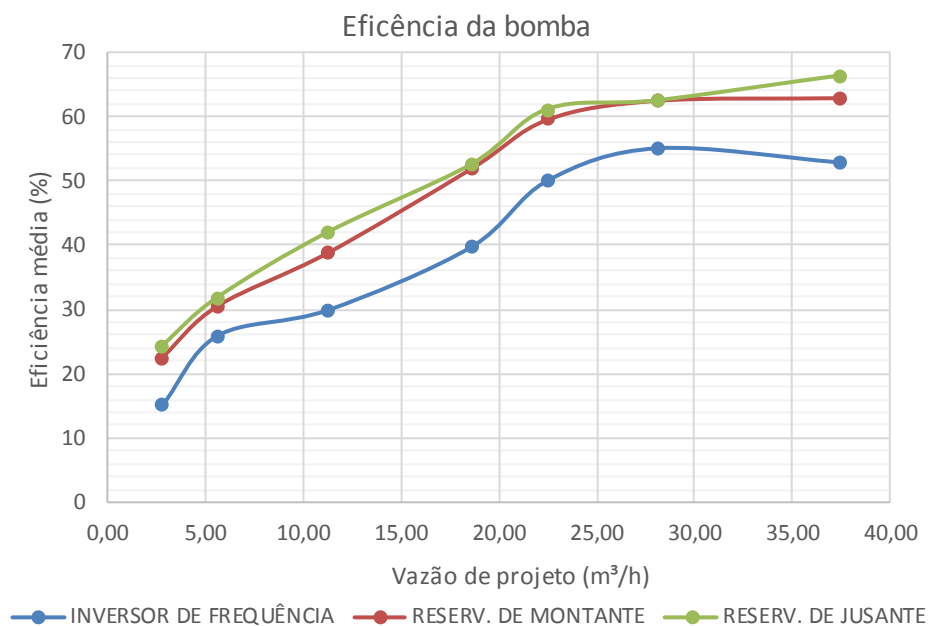
Figura 18 – Potência requerida de bombas de acordo com as vazões para todas as configurações simuladas.



Verifica-se que a potência requerida pelas bombas nos sistemas com reservatórios é maior que quando o sistema é controlado por inversor de frequência, justificando o maior consumo energético desses sistemas. Com a menor vazão estudada (2,81 m³/h), esta diferença é pequena, neste caso as bombas dos sistemas com reservatórios demandam uma potência de 1,4kW, enquanto que a bomba com inversor de frequência demanda 1,0kW. Já para a maior vazão (37,46 m³/h), os sistemas com reservatórios de montante e jusante requerem potências de 7,9 e 7,4kW respectivamente, enquanto a bomba operando com inversor de frequência requer 3,85kW, cerca de 49% do requerido pela bomba para o sistema com reservatório de montante.

Observou-se que as bombas centrífugas analisadas costumam apresentar baixa eficiência para pequenas vazões, sendo mais eficientes com vazões maiores. Na Figura 19 apresenta-se a eficiência média das bombas.

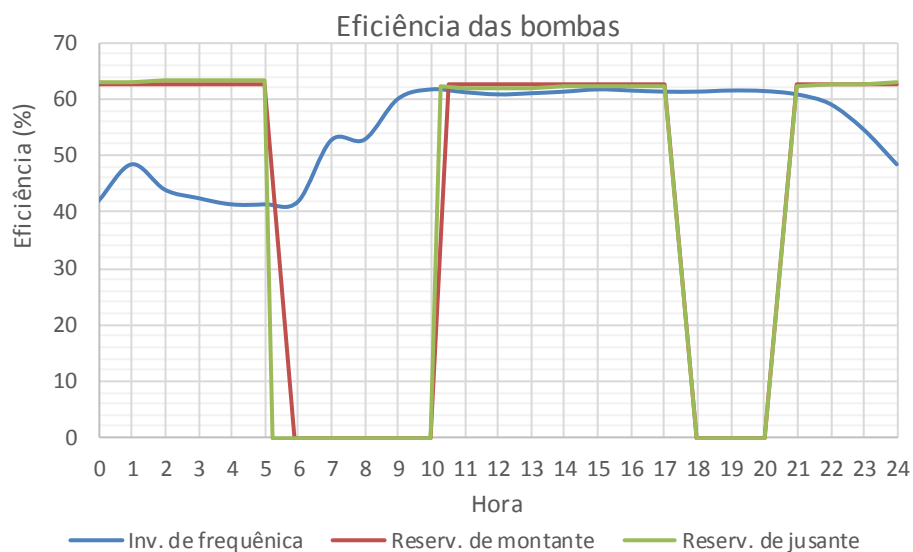
Figura 19 – Eficiência média das bombas selecionadas de acordo com a vazão para todas as configurações simuladas



Para a menor vazão analisada (2,81 m³/h), a eficiência das bombas quando há reservatório foi na ordem de 24%, enquanto que para uso de inversor de frequência foi de 15%. Já para a maior vazão (37,46 m³/h) a eficiência das bombas é consideravelmente melhor, sendo cerca de 65% para os sistemas com reservatórios e 53% quando empregado inversor de frequência.

A menor eficiência média do sistema com inversor de frequência é devido à grande variação do ponto de operação da bomba durante seu funcionamento. Com a variação da rotação e deslocamento das curvas de operação, a bomba tende a trabalhar com melhor eficiência nas condições de maior consumo, condição para qual foi dimensionada, e com menor eficiência quando está sendo pouco exigida. Na Figura 20 apresenta-se a variação da eficiência das bombas durante seu funcionamento, para a vazão de projeto de 28,1m³/h.

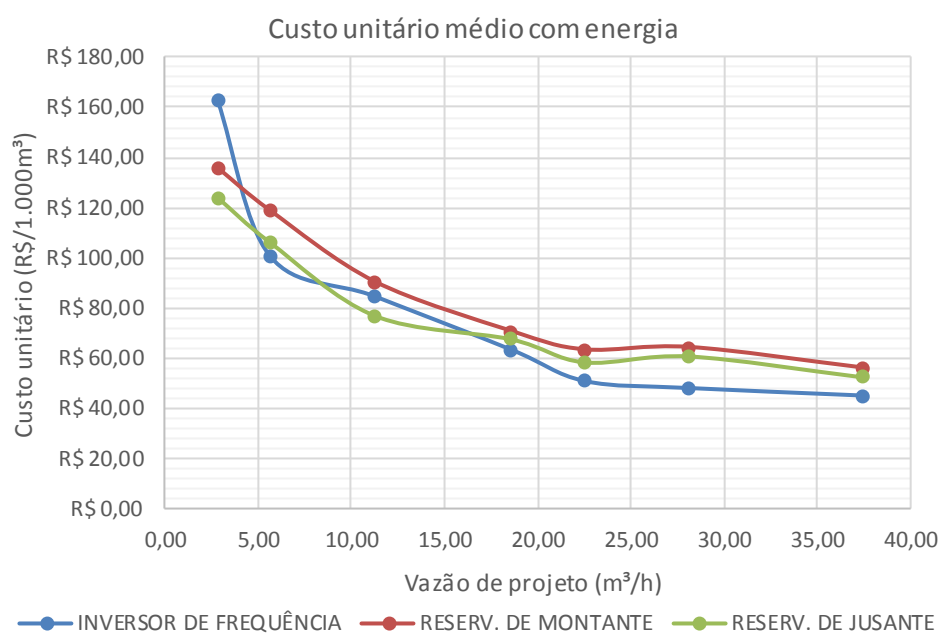
Figura 20 – Variação da eficiência das bombas com o tempo para vazão de projeto de 28,1m³/h para todas as configurações simuladas



Na Figura 20, observa-se que os sistemas com reservatórios apresentam eficiência da bomba constantes, enquanto que com o inversor de frequência há significativa variação.

A disparidade observada entre a eficiência das bombas de maior e menor vazão refletem numa grande variação do custo unitário por volume bombeado para as diferentes faixas de vazão. Na Figura 21 apresenta-se o custo unitário médio em R\$/1000m³ para as diferentes faixas de vazão.

Figura 21 – Custo unitário médio com energia.



O custo para o bombeamento de 1000m³ para a menor vazão analisada (2,81 m³/h) é de R\$163,07 para o sistema com inversor de frequência, R\$135,71 para o sistema com reservatório de montante e R\$123,92 com reservatório de jusante. Já para a maior vazão calculada (37,46 m³/h), esses custos são de R\$45,15 para o sistema com inversor de frequência, R\$55,99 para o sistema com reservatório de montante e R\$52,46 com reservatório de jusante.

Os resultados das simulações esquemáticas também podem ser vistos no Anexo 2.

4.2 Resultados dos estudos com rede de distribuição

4.2.1 Cálculo das vazões de projeto, dimensionamento dos reservatórios e escolha das bombas

Na Tabela 8 mostra-se os parâmetros básicos de projeto calculados, com a vazão de projeto, diâmetros nominais (DN) das tubulações e capacidade dos reservatórios. Os valores calculados para diâmetro dos tubos e volume do reservatório foram aproximados para os existentes comercialmente.

Tabela 8 - Parâmetros básicos de projeto calculados.

| Zona | População abastecida (hab.) | Vazão de projeto (m ³ /h) | DN do barrilete (mm) | DN da tubulação de recalque (mm) | Cap. do reservatório (m ³) |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------|--|
| Zona Alta 01 | 999 | 11,2 | 65 | 75 | 60 |
| Zona Alta 02 | 2.506 | 28,2 | 100 | 100 | 150 |
| Zona Alta 03 | 508 | 5,7 | 50 | 50 | 30 |
| Zona Alta 04 | 1.507 | 17,0 | 80 | 100 | 100 |

Conforme visto na Tabela 8, as vazões de projeto variam de 5,7 a 28,2m³/h, o DN do barrilete do sistema de bombeamento de DN50 a DN100, a tubulação de recalque de DN50 a DN100 e os reservatórios de 30 a 150m³.

A Tabela 9 mostra a perda de carga calculada no barrilete para os sistemas de abastecimento das diferentes zonas.

Tabela 9 – Perda de carga nos barriletes para sistema com rede de distribuição.

| | Barrilete | | | |
|------------------------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Zona 01 | Zona 02 | Zona 03 | Zona 04 |
| DN | 65 | 100 | 50 | 80 |
| Material: | FG | FG | FG | FG |
| Rugosidade e (m) | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| Diâmetro interno (mm) | 65,7 | 102,3 | 52,5 | 77,9 |
| Diâmetro interno (m) | 0,0657 | 0,1023 | 0,0525 | 0,0779 |
| Comprimento real (m) | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Comprimento equivalente (m) | 13,56 | 21,9 | 11,08 | 16,4 |
| Comprimento total (m) | 19,56 | 27,9 | 17,08 | 22,4 |
| Vazão (m³/h) | 11,2 | 28,2 | 5,7 | 17,0 |
| Vazão (m³/s) | 0,003 | 0,008 | 0,002 | 0,005 |
| Velocidade (m/s) | 0,92 | 0,95 | 0,73 | 0,99 |
| Rey | 60067 | 96793 | 38268 | 76451 |
| f | 0,01998 | 0,01810 | 0,02210 | 0,01898 |
| J | 0,01315 | 0,00820 | 0,01157 | 0,01214 |
| Perda de carga | 0,26 | 0,23 | 0,20 | 0,27 |

Tabela 10 - Perda de carga nas tubulações de recalque ou de distribuição para sistema com rede de distribuição.

| | Tubulação de recalque / distribuição | | | |
|------------------------------------|---|----------------|----------------|----------------|
| | Zona 01 | Zona 02 | Zona 03 | Zona 04 |
| DN | 75 | 100 | 50 | 100 |
| Material: | PVC | PVC | PVC | PVC |
| Rugosidade e (m) | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 | 0,00001 |
| Diâmetro interno (mm) | 77,2 | 100,0 | 54,6 | 100,0 |
| Diâmetro interno (m) | 0,0772 | 0,1000 | 0,0546 | 0,1000 |
| Comprimento real (m) | 25,00 | 2222,80 | 1664,13 | 2532,71 |
| Comprimento equivalente (m) | 1,25 | 111,14 | 83,21 | 126,64 |
| Comprimento total (m) | 26,25 | 2333,94 | 1747,34 | 2659,35 |
| Vazão (m³/h) | 11,2 | 28,2 | 5,7 | 17,0 |
| Vazão (m³/s) | 0,003 | 0,008 | 0,002 | 0,005 |
| Velocidade (m/s) | 0,67 | 1,00 | 0,68 | 0,60 |
| Rey | 51119 | 99019 | 36796 | 59555 |
| f | 0,02065 | 0,01790 | 0,02227 | 0,01996 |
| J | 0,00607 | 0,00908 | 0,00958 | 0,00366 |
| Perda de carga | 0,16 | 21,19 | 16,74 | 9,74 |

A velocidade nas tubulações de recalque/distribuição de 0,60 a 1,00m/s. A perda de carga variou de 0,16m na Zona 01, em que o reservatório está adjacente a EET, a 21,19m na Zona 02, em que o reservatório está distante e a velocidade da água é mais alta. É possível observar que apesar de as Zonas 02 e 04 terem tubulações de recalque com o mesmo diâmetro e comprimento semelhante, a perda de carga na tubulação da Zona 02 é maior do que a da Zona 04, devido a maior vazão e consequentemente maior velocidade de escoamento. Caso fosse adotada uma tubulação DN150 a perda de carga seria reduzida, porém a velocidade de escoamento ficaria inferior a 0,6m/s, o que não é recomendado.

Assim como nas simulações esquemáticas, foi considerado nestes cenários com inversor de frequência que o sistema de bombeamento deveria garantir a pressão mínima na rede de 10m.c.a., sendo o nó de cota mais elevada de cada zona tomado como ponto de referência. Para os cenários com reservatórios o sistema de bombeamento deve garantir o abastecimento adequado do REL, sendo que este reservatório necessita ter um nível d'água adequado para garantir também a pressão mínima na rede de 10m.c.a. Na Tabela 11 são mostradas as dimensões dos reservatórios utilizadas.

Tabela 11 – Dimensões dos reservatórios utilizados para o abastecimento das populações das diferentes zonas altas.

| | Zona 01 | Zona 02 | Zona 03 | Zona 04 |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| População (hab) | 999 | 2506 | 508 | 1507 |
| Capacidade (m³) | 60 | 150 | 30 | 100 |
| Diâmetro (m) | 3,30 | 3,80 | 3,00 | 3,30 |
| Altura total (m) | 7,37 | 13,55 | 4,54 | 12,09 |
| Altura útil (m) | 6,54 | 12,60 | 3,79 | 11,26 |
| Altura média (m) | 3,27 | 6,30 | 1,90 | 5,63 |
| Altura da base do REL (m) | 9,00 | 6,00 | 9,00 | 6,00 |
| Altura da entrada no reserv. (m) | 15,54 | 18,60 | 12,79 | 17,26 |

As dimensões utilizadas para estes reservatórios são as mesmas utilizadas nas simulações esquemáticas, referentes ao catálogo comercial da fabricante EDRA, sendo a altura de entrada no reservatório a soma da altura útil e altura da base dos reservatórios.

Para escolha das bombas, foram utilizados dados de catálogos comerciais. Foram empregadas bombas centrífugas de dois fabricantes, buscando-se as bombas com melhor ajuste ao sistema para cada caso. As bombas utilizadas foram da linha das fabricantes KSB Meganorm/Megabloc e Schneider BC. As curvas destas bombas também são mostradas no Anexo 1. Vale ressaltar que a fabricante KSB permite a usinagem de rotores com diâmetro otimizado para a curva do sistema calculado, enquanto que para as bombas Schneider devem ser utilizados os diâmetros de rotores disponíveis em catálogo. Nas Tabela 12 e Tabela 13 são apresentadas as alturas manométricas calculadas para os sistemas com inversor de frequência e com reservatórios respectivamente.

Tabela 12 – Altura manométrica total nos sistemas com inversor de frequência.

| Altura manométrica total – com inversor de frequência | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Zona 01 | Zona 02 | Zona 03 | Zona 04 |
| Desnível geométrico | 0,0 | 5,2 | 15,7 | 10,4 |
| Pressão mínima na rede | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Perda de carga barrilete | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| Perda de carga na adutora | 0,2 | 14,4 | 16,7 | 9,7 |
| Altura manométrica total (m.c.a.) | 10,4 | 29,6 | 42,6 | 30,4 |

Tabela 13 – Altura manométrica total nos sistemas com reservatórios.

| Altura manométrica total – com reservatórios | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Zona 01 | Zona 02 | Zona 03 | Zona 04 |
| Desnível geométrico | 0,0 | 5,2 | 15,7 | 10,4 |
| Altura de entrada no reservatório | 15,5 | 18,6 | 12,8 | 17,3 |
| Perda de carga barrilete | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0,3 |
| Perda de carga na adutora | 0,2 | 21,2 | 16,7 | 9,7 |
| Altura manométrica total (m.c.a.) | 16,0 | 45,2 | 45,4 | 37,7 |

A Tabela 14 apresenta as bombas utilizadas para os sistemas com inversor de frequência e a Tabela 15 as com reservatórios.

Tabela 14 – Bombas utilizadas nos sistemas com pressurização da rede

| | Vazão (m³/h) | Altura manométrica total (m.c.a.) | Bomba |
|----------------|---------------------|--|---------------------|
| Zona 01 | 11,2 | 10,4 | BC-92 S/T 1C 3/4 |
| Zona 02 | 28,2 | 29,6 | Mega 32-160 Φ162 |
| Zona 03 | 5,7 | 42,6 | Mega 25-200 Φ157 |
| Zona 04 | 17,0 | 30,4 | Mega 032-125.1 Φ138 |

Tabela 15 – Bombas utilizadas nos sistemas com reservatórios.

| | Vazão (m³/h) | Altura manométrica total (m.c.a.) | Bomba |
|----------------|---------------------|--|---------------------|
| Zona 01 | 11,2 | 16,0 | Mega 32-125.1 Φ115 |
| Zona 02 | 28,2 | 45,2 | Mega 32-160 Φ174 |
| Zona 03 | 5,7 | 45,4 | Mega 25-200 Φ162 |
| Zona 04 | 17,0 | 37,7 | Mega 032-160.1 Φ148 |

Após dimensionamento das tubulações, dos reservatórios e escolha das bombas foi feita a inserção dos dados necessários no software para realização das simulações hidráulicas.

4.2.2 Resultados das simulações na rede de distribuição analisada

4.2.2.1 Zona Alta 01

Na Figura 22 é apresentada a vazão recalçada pela bomba da EET-01 num período de 24 horas enquanto na Figura 23 apresenta-se a variação da altura manométrica.

Figura 22 – Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 01 para cada configuração simulada.

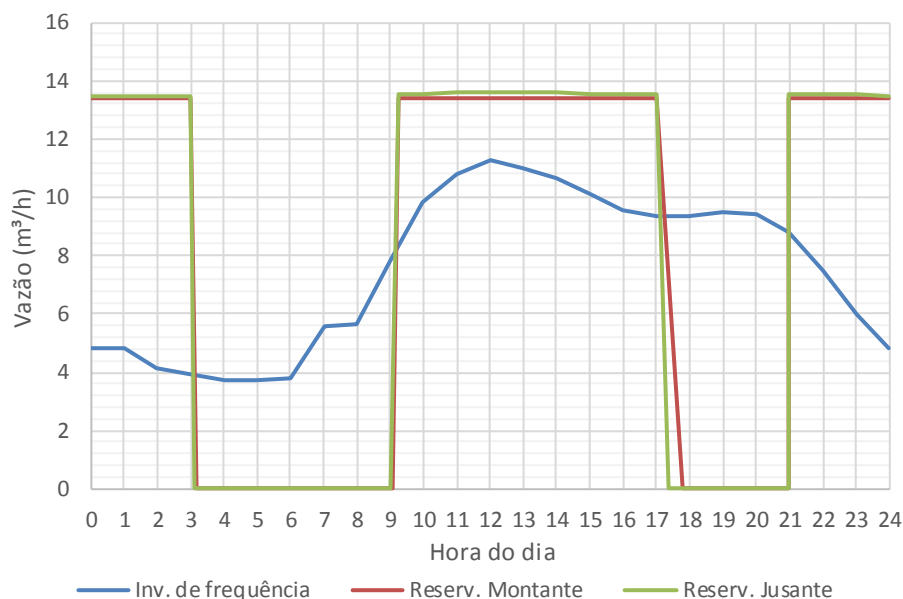
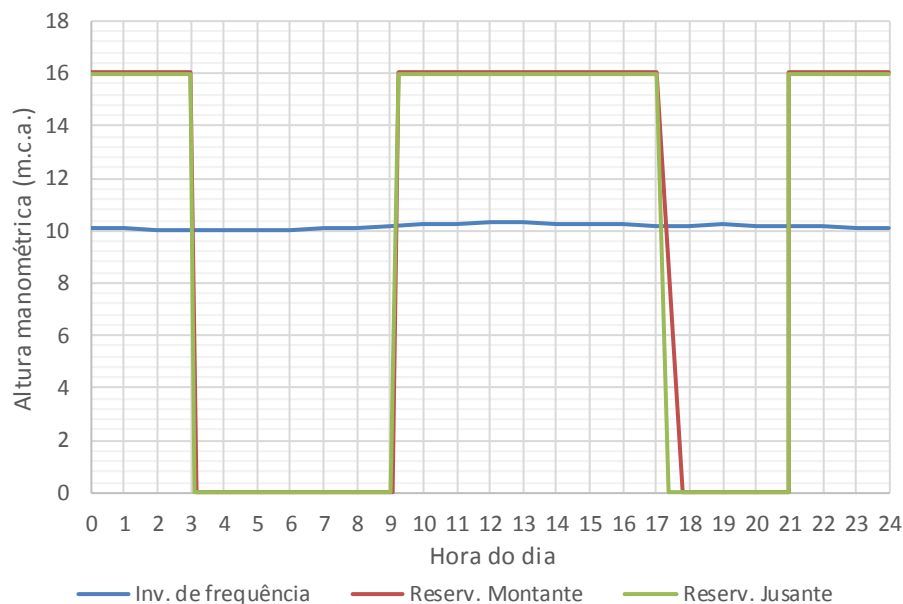


Figura 23 – Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 01 para cada configuração simulada.



Nas Figuras Figura 22 e Figura 23 pode-se observar que as bombas dos sistemas com reservatórios permanecem inoperantes durante aproximadamente 6 horas no período da manhã, em que há menor consumo, e das 18 às 21h, horário de pico de tarifação de energia. Com a pressuriza o da rede a bomba permanece operante continuamente, variando a vazão de acordo com o consumo.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das simula es referentes a Zona 01.

Tabela 16 – Resultados das simulações da Zona 01.

| Zona 01 | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Inv. de frequência | Reserv. Montante | Reserv. Jusante |
| Vazão Média (m³/h): | 7,52 | 13,37 | 13,33 |
| Alt. Manométrica Média (m): | 10,15 | 16,05 | 16,32 |
| Eficiência da Bomba Média (%): | 52,15 | 56,03 | 55,42 |
| Potência Máxima Requerida (kW): | 0,57 | 1,05 | 1,05 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 3.168,93 | 5.186,65 | 5.201,25 |
| Custo anual de energia (R\$) | 940,24 | 1.505,99 | 1.513,29 |
| Consumo unitário de energia (kWh/1.000m³) | 47,94 | 77,88 | 77,53 |

Conforme visto na Tabela 16, a vazão média da bomba quando há inversor de frequências é menor, já que nestes casos a vazão varia de acordo com o consumo. Como o reservatório se encontra próximo a EET, as perdas de carga na tubulação de recalque são baixas, desta forma a diferença da altura manométrica se dá principalmente pela altura de entrada do reservatório. A eficiência das bombas varia da ordem de 52 a 56%, porém as bombas dos sistemas com reservatórios requerem uma potência máxima de quase o dobro que a do sistema com pressurização da rede. Para este caso, o sistema com reservatório de jusante foi o que apresentou maior consumo de energia, seguido pelo sistema com reservatório de montante e pela pressurização da rede. A energia utilizada anualmente pelos sistemas com reservatórios neste caso é cerca de 64% maior do que com a adoção da solução com inversor de frequência, refletindo em gastos e num consumo de energia de 60 a 62% maior.

4.2.2.2 Zona Alta 02

O funcionamento e a vazão recalcada pela bomba da EET-02 são mostrados na Figura 24, enquanto que na Figura 25 são mostrados o funcionamento e a altura manométrica das bombas.

Figura 24 – Variação da vazão recalcada para abastecimento da Zona 02 para cada configuração simulada.

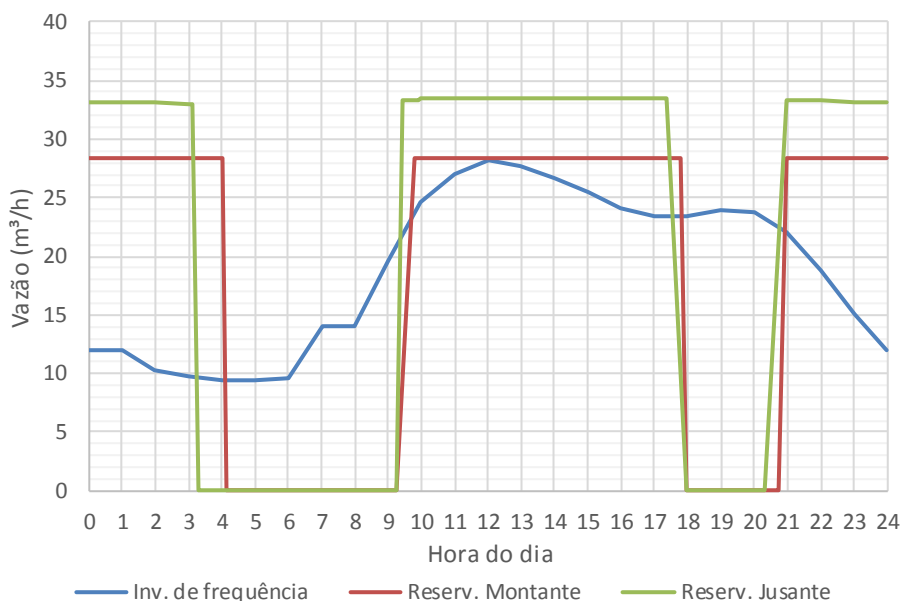
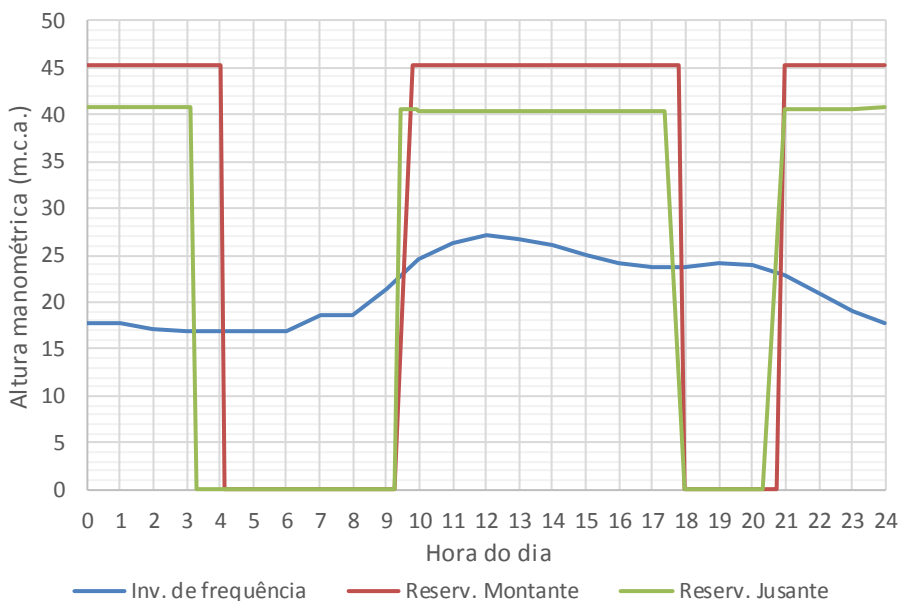


Figura 25 – Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 02 para cada configuração simulada.



Conforme visto nas Figura 24 e Figura 25, a vazão e a altura manométrica das duas configurações de sistema com reservatórios têm maior diferenciação entre si. Apesar de utilizarem a mesma bomba na EET-02, como o sistema com reservatório de jusante tem interligações com a rede de distribuição, parte da vazão recalcada é distribuída e consumida antes de chegar ao reservatório, desta forma as perdas na tubulação de recalque são

diminuídas, fazendo com que a bomba opere com uma menor altura manométrica e maior vazão.

Na configuração do sistema com inversor de frequência, é possível observar que a vazão e a altura manométrica da bomba são ajustadas de acordo com o consumo, de forma a garantir o abastecimento e a pressão mínima na rede.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados das simulações referentes a Zona 02.

Tabela 17 - Resultados das simulações da Zona 02.

| Zona 2 | | | |
|---|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Inv. de frequência | Reserv. Montante | Reserv. Jusante |
| Vazão Média (m³/h): | 18,88 | 28,34 | 33,32 |
| Alt. Manométrica Média (m): | 21,54 | 45,19 | 43,35 |
| Eficiência da Bomba Média (%): | 55,01 | 57,67 | 57,17 |
| Potência Máxima Requerida (kW): | 3,88 | 6,04 | 6,42 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 18.477,03 | 34.960,43 | 32.520,77 |
| Custo anual de energia (R\$) | 5.497,63 | 10.161,60 | 9.469,56 |
| Consumo unitário de energia (kWh/1.000m³) | 111,40 | 212,98 | 192,57 |

Na Zona 02, que apresentou grandes perdas na tubulação de recalque, observa-se que com a interligação desta tubulação na rede as perdas são amenizadas, devido à distribuição ao longo da rede. Quando comparados os sistemas com reservatório de montante e de jusante, verificou-se que a interligação na rede causa uma diminuição de 1,8m.c.a. na altura manométrica, o que fez com que a bomba da EET-02 recalcase uma vazão média 5m³/h superior. Para as diferentes configurações de abastecimento da Zona 02 a eficiência das bombas varia da ordem de 55 a 58%. A potência máxima requerida pela bomba do inversor de frequência é cerca de 60% da necessária para abastecimento dos sistemas com reservatórios. O sistema com reservatório de montante foi o que apresentou maior gasto energético seguido pela configuração com reservatório de jusante, enquanto que a rede com inversor de frequência se apresentou como a de menor consumo energético. Quando comparados os sistemas com reservatório de montante e com inversor de frequência, o primeiro consome

89,2% a mais de energia, com um consumo unitário 91,2% maior e um custo anual de operação 84,8% superior.

4.2.2.3 Zona Alta 03

Nas Figura 26 e Figura 27 é mostrado o funcionamento das bombas da EET-03, sendo que na primeira pode ser vista a vazão recalçada enquanto que na segunda é possível visualizar a altura manométrica das bombas.

Figura 26 – Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 03 para cada configuração simulada.

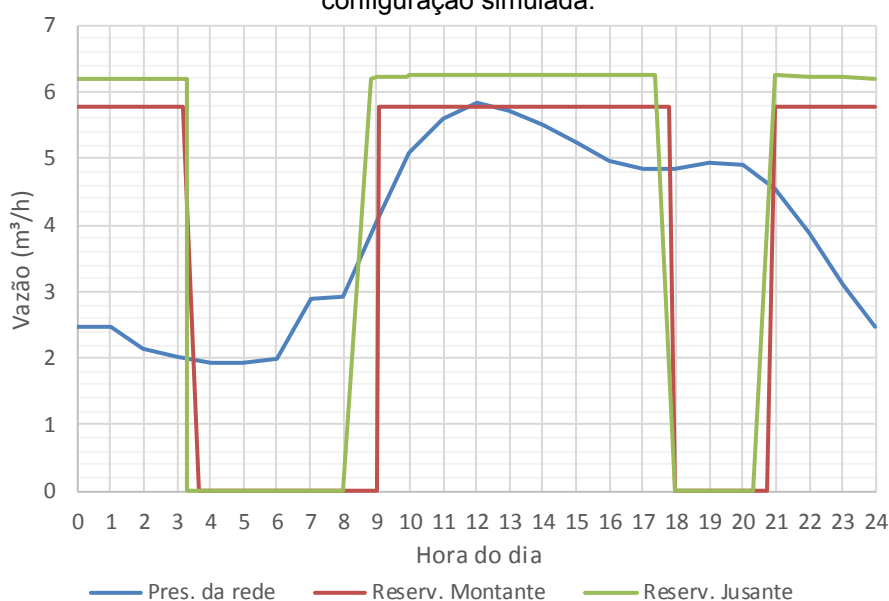
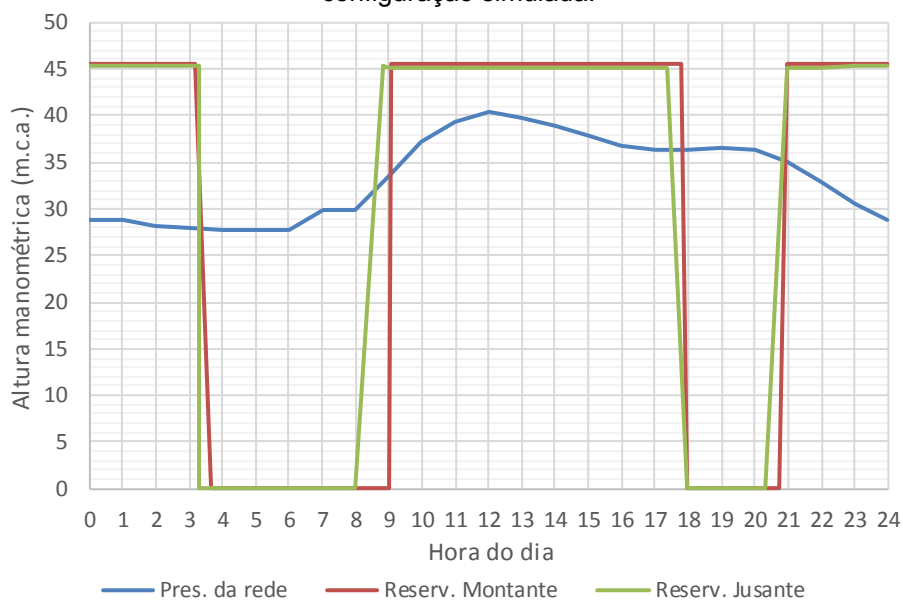


Figura 27 – Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 03 para cada configuração simulada.



Na EET-03, as bombas dos sistemas com reservatórios também permanecem inoperantes no período da manhã e de pico de energia, funcionando durante a tarde para garantir o abastecimento quando o consumo é maior, e durante a noite e madrugada para acúmulo de água no reservatório.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados das simulações referentes a Zona 03.

Tabela 18 - Resultados das simulações da Zona 03.

| Zona 3 | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Inv. de frequência | Reserv. Montante | Reserv. Jusante |
| Vazão Média (m³/h): | 3,89 | 5,76 | 6,22 |
| Alt. Manométrica Média (m): | 33,47 | 45,44 | 43,35 |
| Eficiência da Bomba Média (%): | 21,39 | 26,55 | 27,84 |
| Potência Máxima Requerida (kW): | 2,32 | 2,68 | 2,75 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 14.345,23 | 15.743,18 | 15.227,80 |
| Custo anual de energia (R\$) | 4.244,95 | 4.587,32 | 4.490,23 |
| Consumo unitário de energia (kWh/1.000m³) | 419,26 | 465,10 | 441,01 |

Durante a escolha de bombas para o atendimento da Zona 03, verificou-se que haviam poucas opções para baixas vazões e altura manométrica da ordem de 33m. Mesmo escolhendo as bombas com melhor rendimento dentre as disponíveis pelos dois fabricantes analisados, a eficiência média das bombas para abastecimento da Zona 03 variou de 21,4% para o sistema com pressurização da rede a 27,8% com o reservatório de jusante. Das 4 zonas altas analisadas, a Zona 03 foi a que apresentou menor diferença nos resultados. A potência máxima requerida pela bomba do sistema com reservatório de jusante é 0,43kW maior que a bomba para pressurização da rede. O abastecimento com reservatório de montante, o qual tem maior consumo energético, tem um consumo cerca de 10% maior que a pressurização da rede, que reflete num aumento de R\$342,37 no custo anual com energia. Devido ao baixo rendimento das bombas, o custo unitário de energia para o abastecimento da Zona 03 se mostrou bastante superior ao de outras zonas. Com o inversor de frequência, a bomba da EET-03 apresenta um consumo unitário 3,8 vezes superior à da EET-02 e 8,7 vezes

superior ao da EET-01. Já com reservatórios de montante o consumo unitário é 2,2 vezes superior ao da EET-01 e 6 vezes maior que o da EET-02.

4.2.2.4 Zona Alta 04

Na Figura 28 são mostrados o funcionamento e a vazão recalçada pela bomba da EET-04, enquanto que na Figura 29 são mostrados o funcionamento e a altura manométrica das bombas desta estação elevatória.

Figura 28 – Variação da vazão recalçada para abastecimento da Zona 04 para cada configuração simulada.

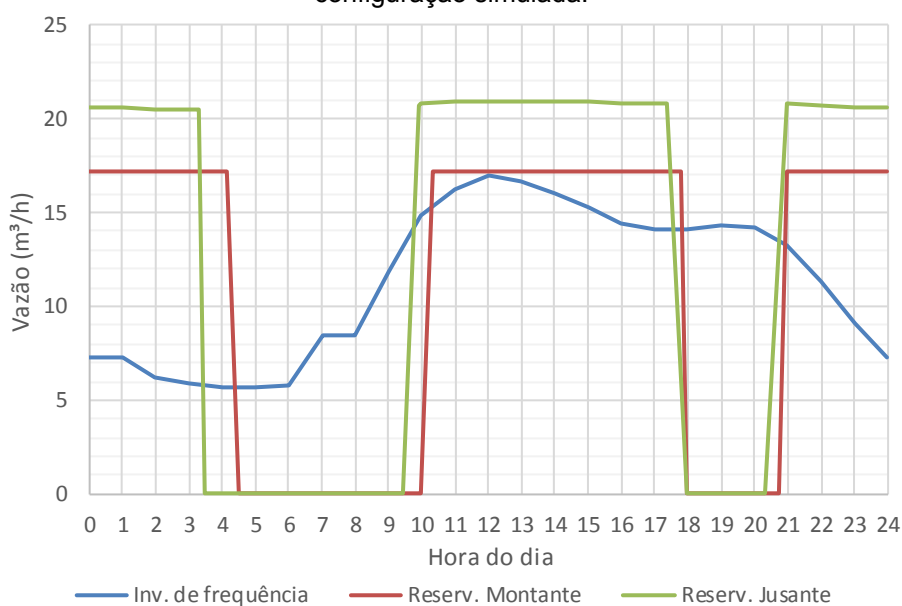
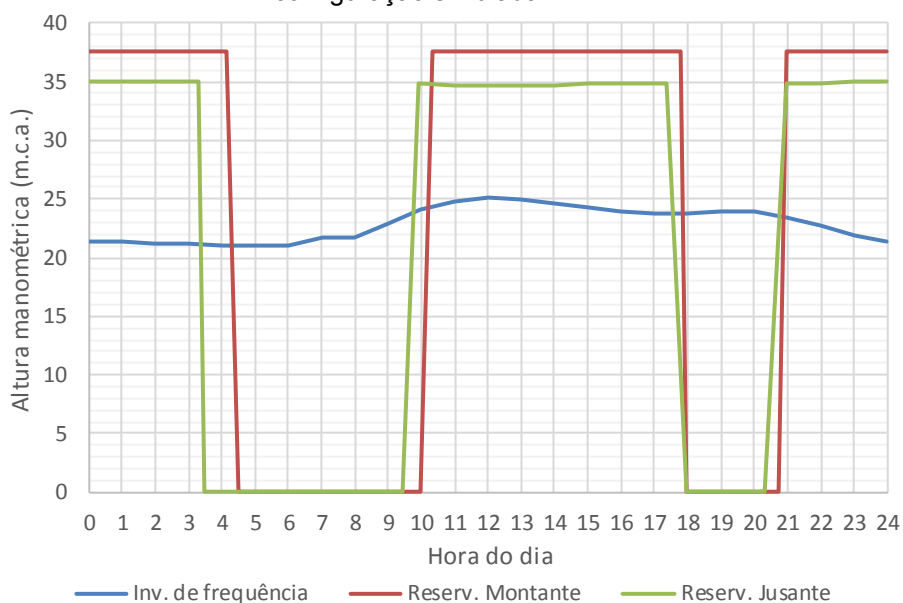


Figura 29 – Altura manométrica das bombas para abastecimento da Zona 04 para cada configuração simulada.



Assim como na EET-02, a interligação com a rede de distribuição no sistema com reservatório de jusante faz com que este tenha menor altura manométrica e maior vazão recalçada que quando o reservatório é de montante. Também é possível observar a variação horária na vazão e na altura manométrica da bomba da configuração do sistema com inversor de frequência.

Na Tabela 19 são apresentados os resultados das simulações referentes a Zona 04.

Tabela 19 - Resultados das simulações da Zona 04.

| Zona 4 | | | |
|--|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| | Inv. de frequência | Reserv. Montante | Reserv. Jusante |
| Vazão Média (m³/h): | 11,35 | 17,22 | 20,78 |
| Alt. Manométrica Média (m): | 22,92 | 37,51 | 35,30 |
| Eficiência da Bomba Média (%): | 52,08 | 52,63 | 54,36 |
| Potência Máxima Requerida (kW): | 1,86 | 3,34 | 3,62 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 11.670,51 | 19.134,76 | 17.739,73 |
| Custo anual de energia (R\$) | 3.452,17 | 5.550,92 | 5.206,36 |
| Consumo unitário de energia (kWh/1.000m³) | 116,98 | 193,76 | 174,21 |

Para o abastecimento da Zona 04, com as diferentes configurações de sistema a eficiência das bombas variou de 52 a 54%. A potência requerida pelas bombas dos sistemas com reservatório de montante e de jusante são 80 e 95% maiores respectivamente que quando há inversor de frequência. Assim como nas EETs 02 e 03, a configuração com reservatório de montante é a que tem maior consumo e custos com energia, seguida pela configuração com reservatório de jusante e pela pressurização da rede. A energia utilizada pela bomba quando há reservatório de montante é 64% maior que quando há inversor de frequência e 7,9% superior a consumida quando há reservatório de jusante. Já os custos anuais com energia das bombas dos sistemas com reservatórios de montante e jusante são 61 e 51% maiores que os do sistema com inversor.

5. CONCLUSÕES

Com as simulações do sistema esquemático, pode-se concluir que com exceção da menor vazão analisada, a configuração de sistema com estação elevatória para pressurização da rede com inversor de frequência, sem reservatórios, é a opção com menor consumo energético e menores custos com energia elétrica.

Nos sistemas com reservatórios, a altura manométrica das bombas é maior, devido a necessidade de ser vencida a altura da base e dos reservatórios, desta forma, a potência requerida da bomba é maior;

As configurações de sistema com reservatório apresentam maior rendimento médio das bombas, visto que elas funcionam sempre próximas do ponto de operação para o qual foram dimensionadas, enquanto que o rendimento das bombas com inversor de frequência varia conforme a operação.

O consumo de energia em função do volume bombeado diminuiu conforme aumento da vazão recalçada, fazendo com que o custo unitário médio com energia elétrica tende a cair conforme o aumento do volume bombeado.

Com as simulações das redes de distribuição, pode-se verificar que a utilização de bombas com inversores de frequência é a alternativa com menor consumo de energia dentre as analisadas, sendo que as configurações com reservatórios apresentaram consumos de energia de 6,2 a 84,8% superiores.

Os gastos para as duas configurações com reservatórios são de certa forma similares, com o sistema com reservatório de jusante apresentando consumo menor que o com reservatório de montante em quase todas as zonas altas analisadas. O único caso em que o sistema com reservatório de montante apresentou menor custo que o sistema com reservatório de jusante encontra-se na zona em que o reservatório se encontra no mesmo terreno que a EET, de forma que não há grandes perdas na tubulação de recalque da EET para o reservatório.

A eficiência das bombas também se mostrou como um dos principais fatores impactantes no consumo de energia. Durante o trabalho verificou-se que as bombas centrífugas com menor vazão costumam ter menor rendimento. No projeto de estações elevatórias deve-se atentar à diferença de rendimento entre bombas que podem atender ao sistema, devendo-se priorizar as de maior eficiência no ponto de operação de projeto. As bombas de alto rendimento também devem ter seu uso priorizado quando possível.

A utilização de inversor de frequência, apesar de apresentar o menor consumo de energia, pode não ser a melhor solução para o abastecimento de água em alguns casos. O inversor de frequência é um equipamento com maiores custos de manutenção, além disso, por requerer mão de obra especializada, sua utilização em áreas distantes de grandes centros urbanos pode ser restrita. Além disso, num momento em que haja falta de energia há desabastecimento da rede.

Apesar de terem um maior consumo de energia, os sistemas com reservatórios têm sua utilização mais recomendada, devido à maior simplicidade do sistema elétrico das EET e a robustez do sistema para abastecer a rede de distribuição em casos de parada da bomba ou quedas de energia.

O sistema com reservatório de jusante apresentou menor gasto de energia que o de montante. Isto se deve em grande parte a distribuição e consumo ao longo da rede minimizarem as perdas na tubulação entre a EET e o reservatório. Desta forma, esta opção se mostra adequada para sistemas em que a distância entre a EET e o reservatório é grande, estando a rede de distribuição localizada entre estes dois pontos. Esta configuração, porém, tem limitações quanto a altura manométrica e consequente pressão de saída na bomba, de forma garantir que a pressão na rede não seja superior a recomendada por normas. Além disso, como a rede de distribuição está interligada diretamente ao sistema de bombeamento, ela sofre variações bruscas de pressão conforme a bomba é ligada e desligada, gerando fadiga nas tubulações e diminuindo sua durabilidade.

O sistema com reservatório de montante, apesar do maior consumo de energia, é o que apresenta maior praticidade operacional. A

tubulação de recalque, por não estar interligada à rede, pode suportar maior pressão de serviço, permitindo que sejam vencidos grandes desníveis entre a EET e o reservatório. Além disso, as variações de pressão na rede ocorrem de forma gradativa, conforme o consumo e a variação do nível do reservatório. Esta configuração de sistema também se mostra como a mais adequada para o ajuste dos horários de funcionamento da bomba, permitindo que esta permaneça inoperante em períodos de pico tarifário de energia.

Para a concepção de sistemas de abastecimento de água, o projetista deverá ponderar as principais vantagens e desvantagens de cada sistema, a fim de decidir qual o mais adequado para cada caso. Também se mostra importante a simulação hidráulica com diferentes opções de abastecimento e diferentes bombas dentre as disponíveis para que sejam tomadas as melhores decisões acerca do projeto.

6. RECOMENDAÇÕES FUTURAS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, verifica-se a necessidade de estudos complementares em relação:

- À uma análise econômica levando em consideração os custos de implantação, operação e manutenção dos sistemas, estudando o retorno financeiro baseado na taxa de remuneração das companhias de saneamento e das taxas de juros atuais;
- À utilização de diferentes tipos de sistemas de bombeamento e a utilização de bombas de alto rendimento;
- À utilização das diferentes configurações analisadas em sistemas de abastecimento de grande porte;

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, R.; BARBOSA, P. S. F. **Efeito da Reservação Inicial Sobre o Desempenho Operacional de Sistemas de Abastecimento de Água.: O Seminário -Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água Estado da Arte e Questões Avançadas**, 2002.

BARRY, J. A.; **Watergy: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment. Cost-Effective Savings of Water and Energy. Alliance to Save Energy**, Washington, DC. 2007.

CARVALHO, P. S. O. **Controle para bombeamento distribuído com vistas à minimização dos custos energéticos aplicado a sistemas de abastecimento de água**. Paraíba, 2012. Tese de Doutorado-Universidade Federal da Paraíba, 2012.

COSTA, A.; FIGUEIREDO, M. M. P.; **Eficiência Económica na Operação de Estações Elevatórias de Abastecimento de Água (Economic Efficiency in the Operation of Pumping Stations of Water Supply)**. **4. as Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente**, 2009.

EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE; **Variable speed pumping. A guide to successful applications**. First edition. Bodmin, Cornwall: Elsevier, 2004

FERREIRA, R. A. et al.; **Metodologia de eficiência energética aplicada em sistemas de bombeamento. Eletrônica de Potência**, p. 251-257, 2007.

GOMES, H. P.; **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos**. 2ª ed, João Pessoa, Brasil, Editora UFPB, 2009.

GOMES, H. P.; BEZERRA, S. T. M.; CAMBOIM, W. L. L.; CARNEIRO, G. B. **Otimização operacional dos sistemas adutores Prata e Jucazinho**,

Pernambuco, Brasil. In: **Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética**. GOMES, H.P. (organizador). Editora Universitária/UFPB, João Pessoa, p. 29-36, 2010.

GURGEL, B. B. F. do A.; **Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência em estações elevatórias de água: estudo de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HAESTAD et al.; **Advanced water distribution modeling and management**. First edition. Chapter 8. Waterbury: Haestad Press, 2004.

JAIN, S. V.; PATEL, R. N. Investigations on pump running in turbine mode: a review of the state-of-the-art. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 841-868, 2014.

LUCARELLI, D.L.; BRUCOLI, A.C.; SOUZA, R.F.; **Bombeamento direto nas redes de abastecimento através de bombas de velocidade variável sem reservatório de distribuição** Revista DAE, v.38, n.118, p266, janeiro 1981.

MAIER, H. R. et al. Ant colony optimization for design of water distribution systems. **Journal of water resources planning and management**, v. 129, n. 3, p. 200-209, 2003.

MOURA, G.N.P. de. **A relação entre água e energia: gestão energética nos sistemas de abastecimento de água das companhias de saneamento básico do Brasil**. Curso de Ciências em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PERRONI, J. C. A.; WENDLAND, E.; Avaliação da Eficiência Energética em Poços Profundos Utilizados para Abastecimento Público. **RBRH–Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p. 123-134, 2005.

RIGHETTO, A. M. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. **Seminário de planejamento, projeto e operação de redes de abastecimento de água: o estado da arte e questões avançadas**. João Pessoa. 16p., 2002.

RODRIGUES, W. **Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. Campinas, 2007. Tese de Doutorado-Universidade Estadual de Campinas, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO [SNIS]. **Banco de dados. Aplicativo série histórica**. Brasil, 2007.

TOLEDO, F. et al. Logística de distribuição de água em redes urbanas: racionalização energética. **Pesquisa Operacional**, v. 28, n. 1, p. 75-91, 2008.

TSUTIYA, M. T.; **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. ABES. São Paulo, SP, Brasil. 185 p. 2001.

TSUTIYA, M.T.; **Abastecimento de água**. 2ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

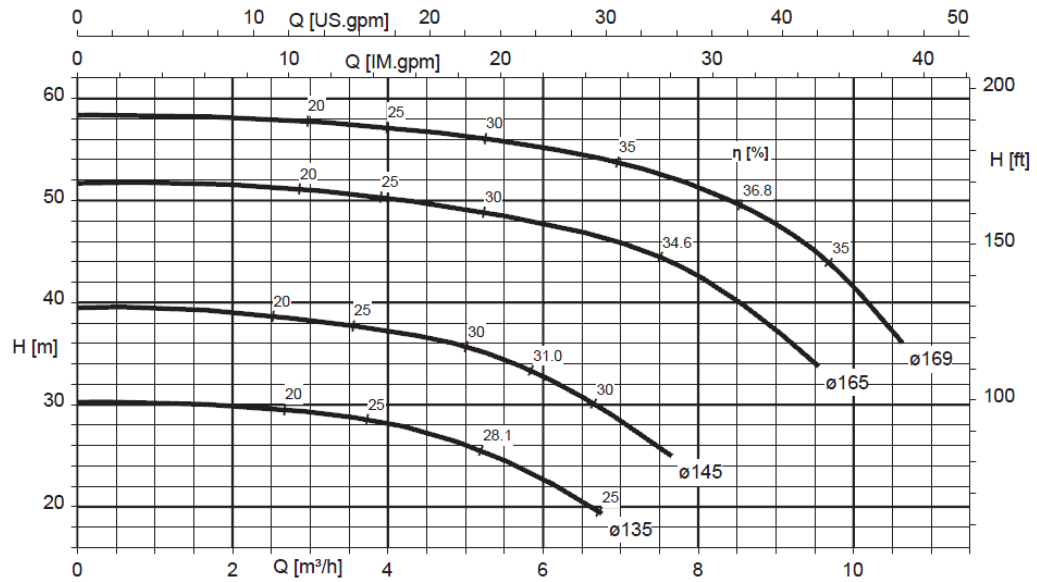
YANG Z., WU L. e DONG X, **Control System Design For Contant-pressure Water Supply**. Second International Conference on MultiMedia and Information Technology. Kaifeng, ISBN 978-0-7695-4008-5, pp. 55-57. 2010.

ANEXO 1 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS

BOMBAS SIMULAÇÕES ESQUEMÁTICAS:

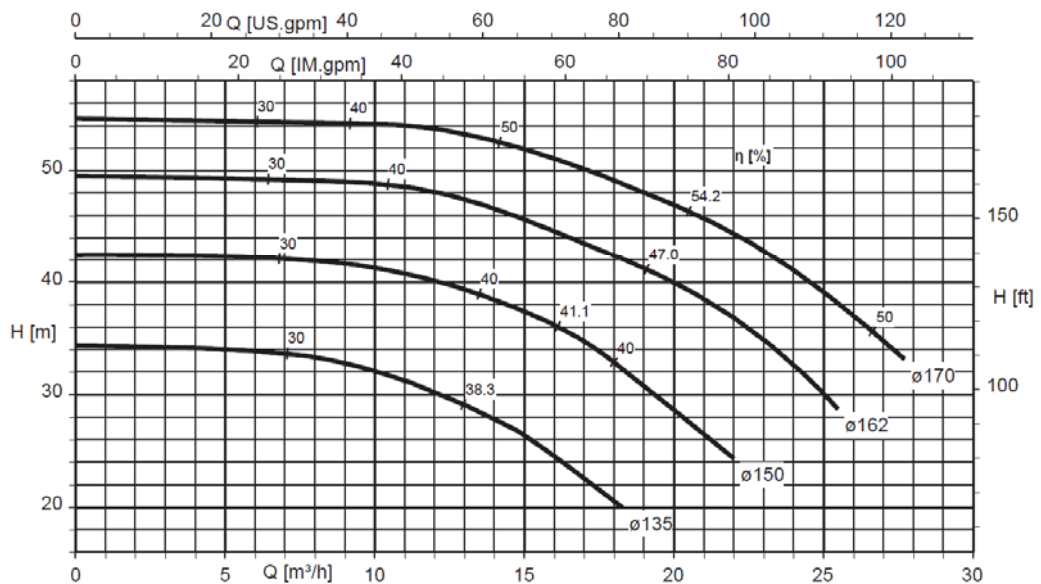
MegaCPK 040-025-160, n = 3.500 rpm

Meganorm, Megabloc

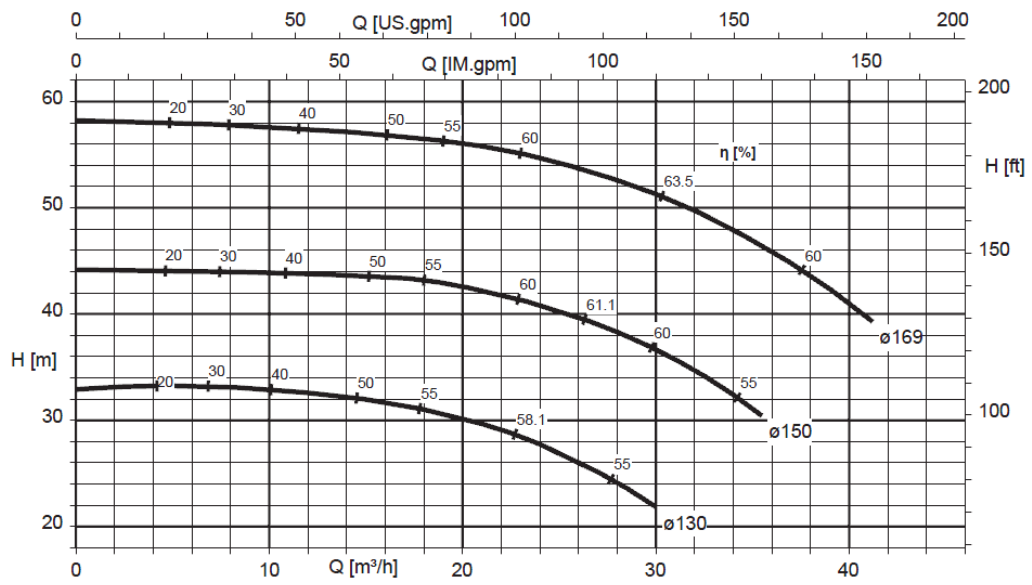


MegaCPK 050-032-160.1, n = 3.500 rpm

Meganorm, Megabloc

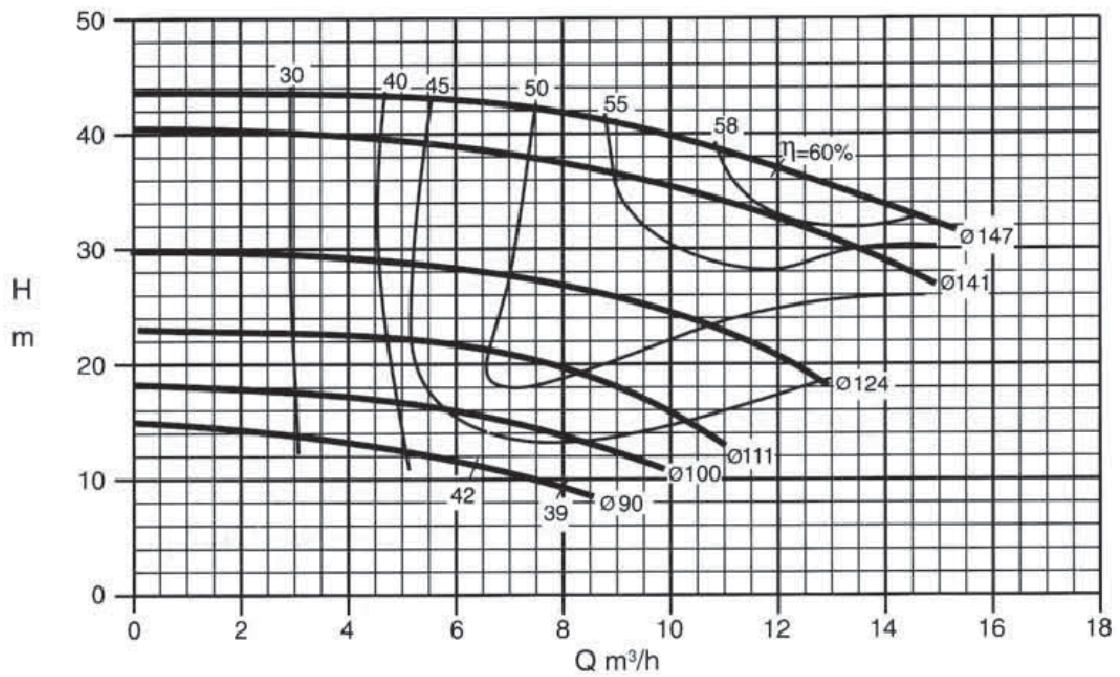


MegaCPK 065-040-160.1, n = 3500 rpm
Meganorm

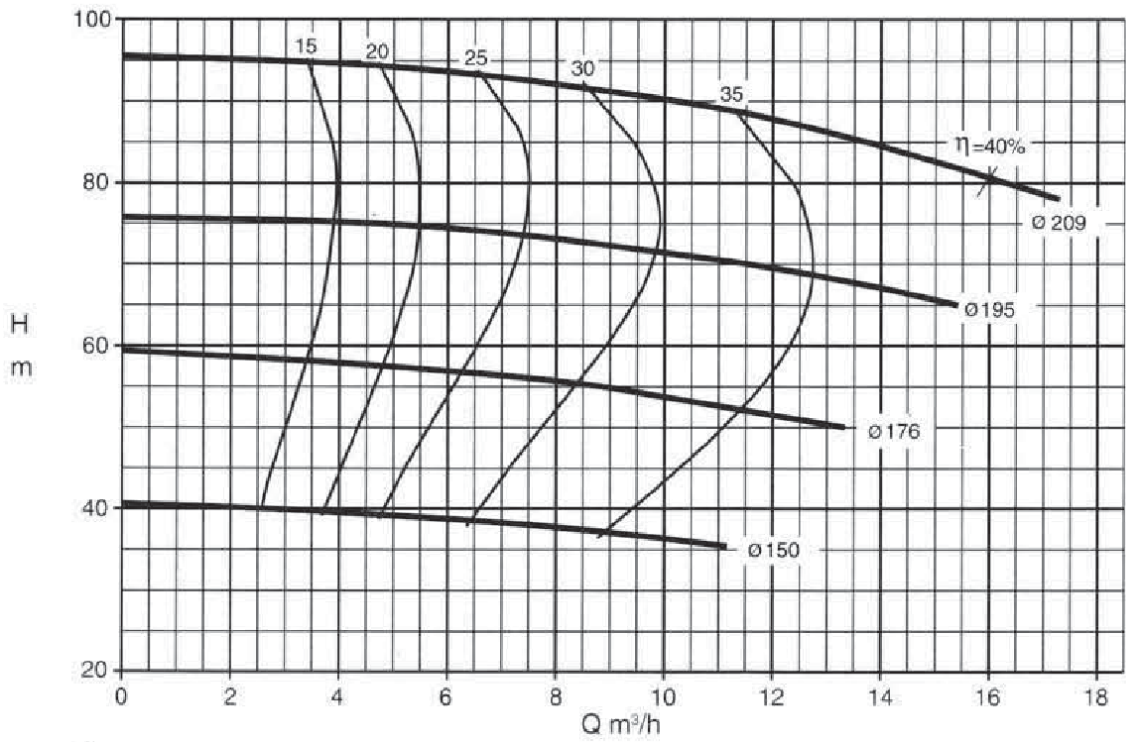


BOMBAS REDE DE DISTRIBUIÇÃO

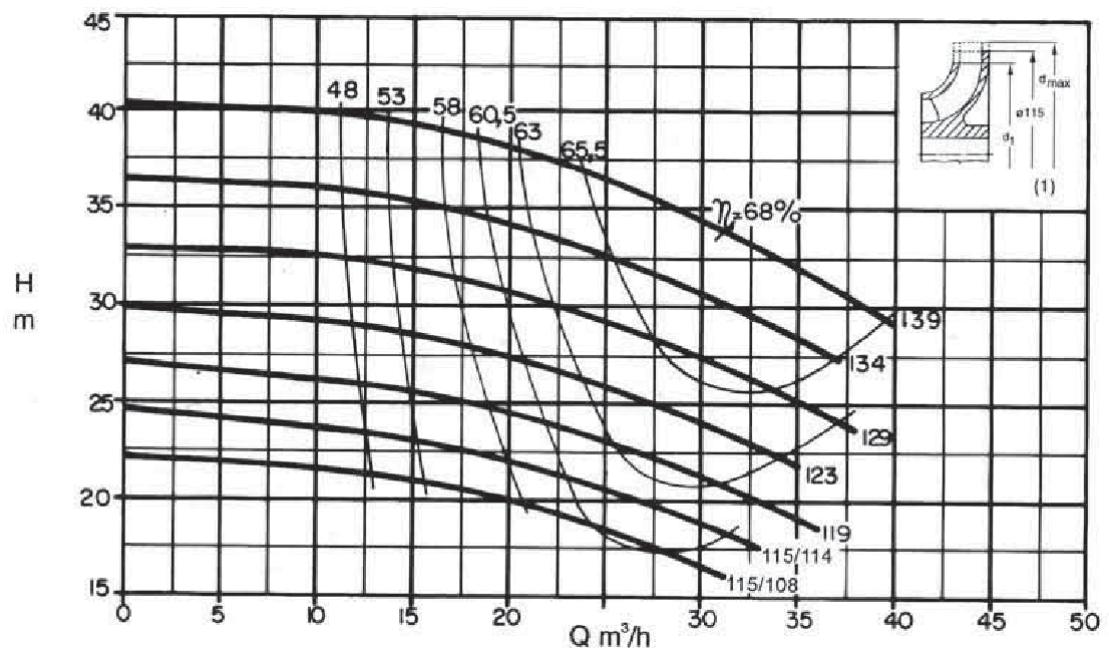
KSB MEGANORM/MEGABLOC 25-150 3500RPM



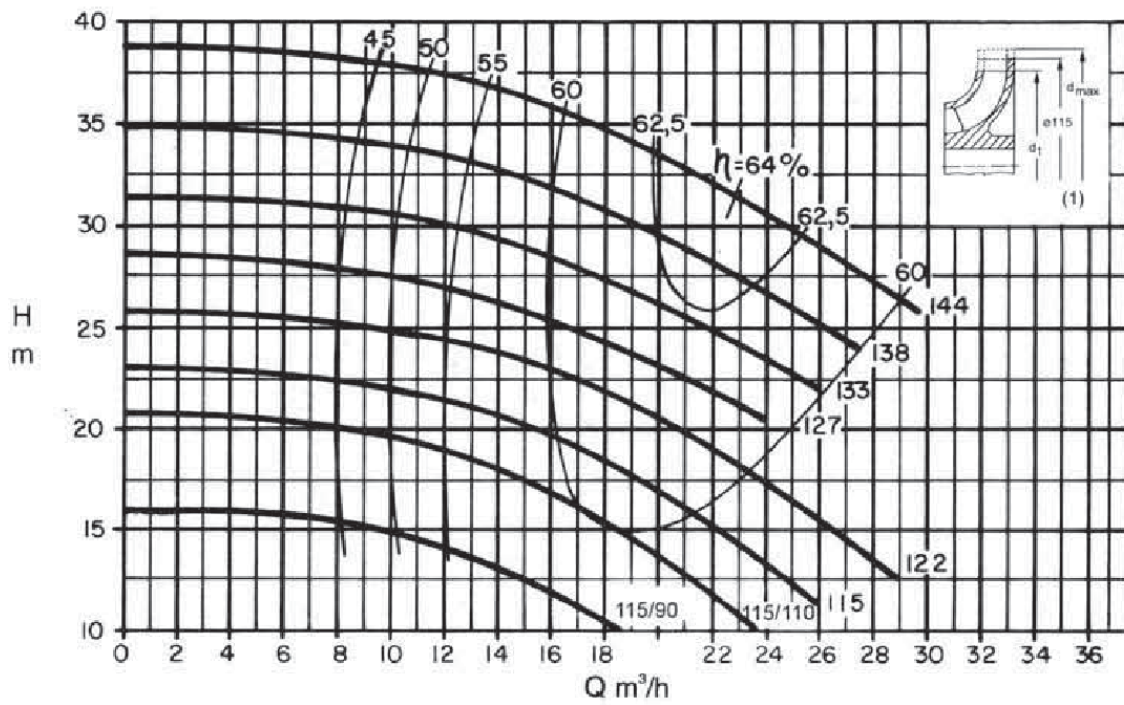
KSB MEGANORM/MEGABLOC 25-200 3500RPM



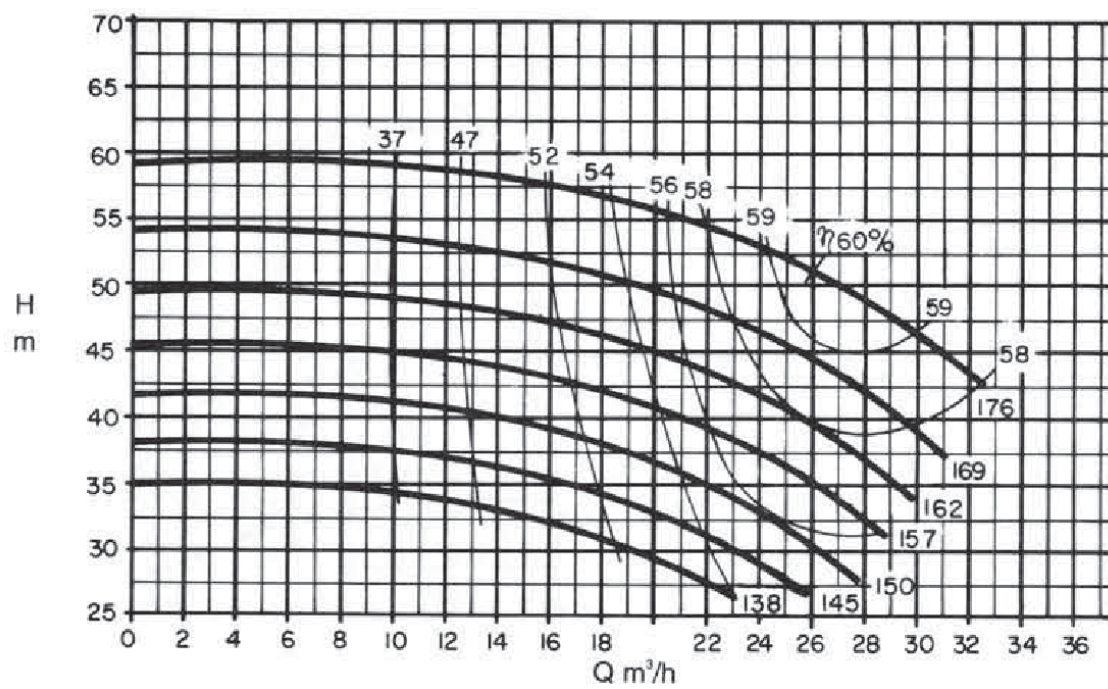
KSB MEGANORM/MEGABLOC 32-125 3500RPM



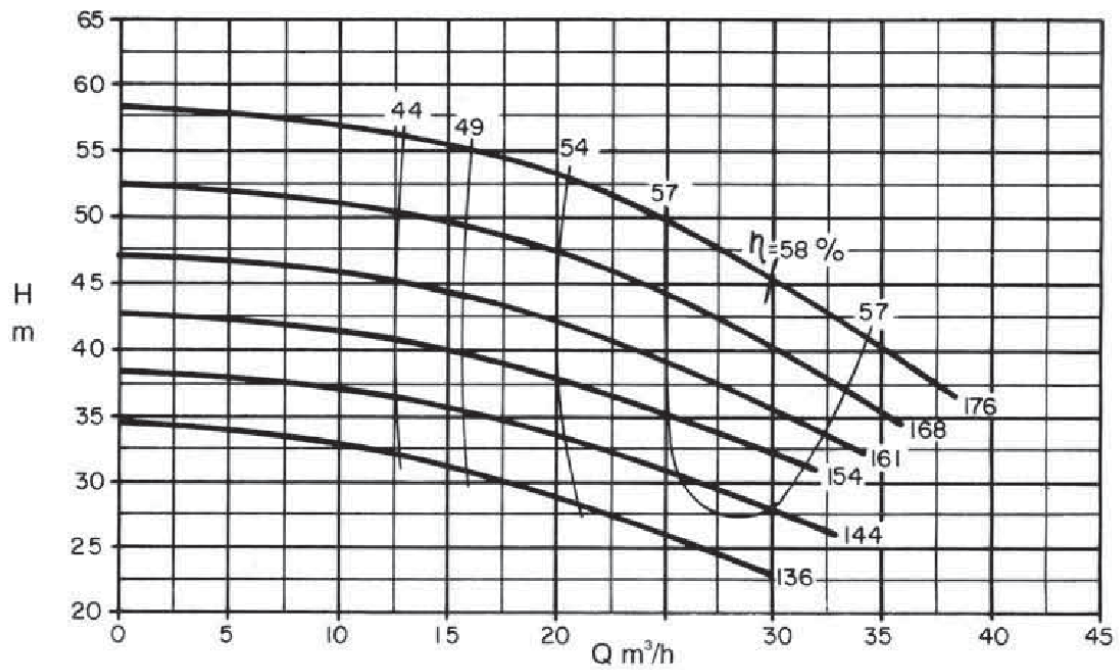
KSB MEGANORM/MEGABLOC 32-125.1 3500RPM



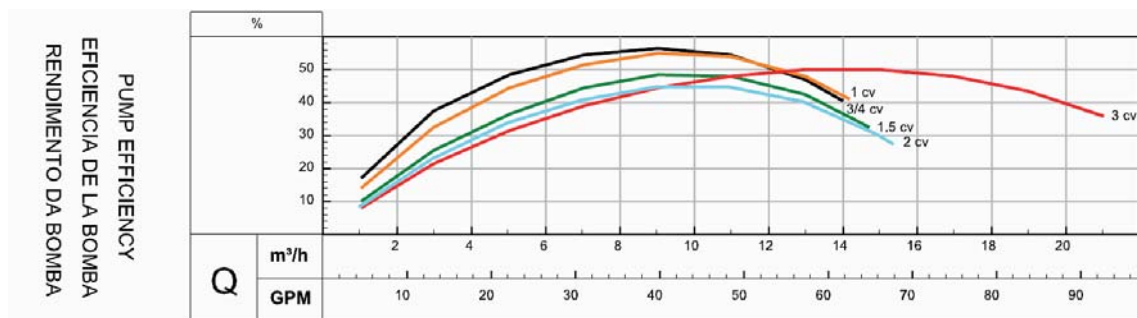
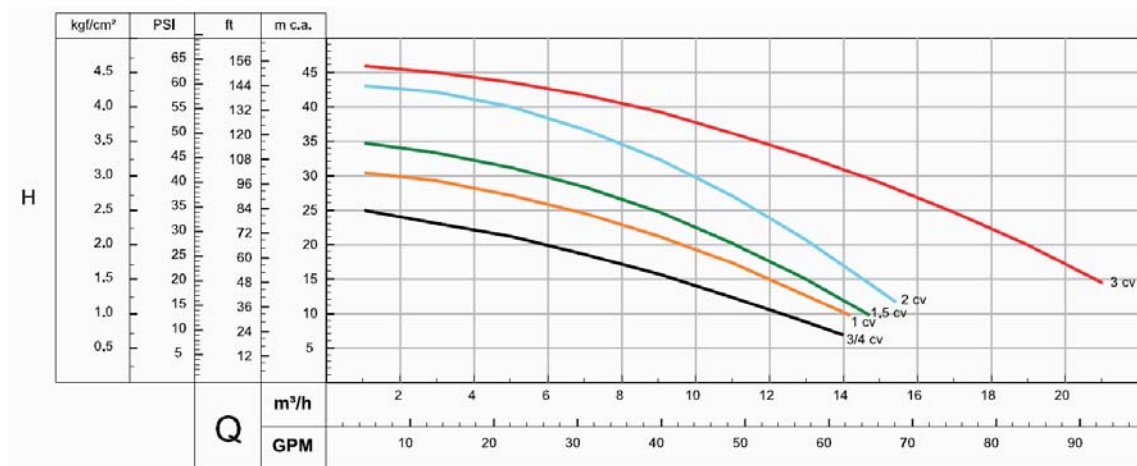
KSB MEGANORM/MEGABLOC 32-160.1 3500RPM



KSB MEGANORM/MEGABLOC 32-160 3500RPM



SCHNEIDER BC-92 1C



ANEXO 2 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES ESQUEMÁTICAS

| INVERSOR DE FREQUÊNCIA | | | | | | | |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| População abastecida (hab.): | 250 | 500 | 1000 | 1650 | 2000 | 2500 | 3330 |
| Vazão de projeto (m³/h): | 2,81 | 5,63 | 11,25 | 18,56 | 22,50 | 28,13 | 37,46 |
| Vazão na simulação (m³/h): | 1,89 | 3,76 | 7,52 | 12,43 | 15,04 | 18,83 | 25,08 |
| Altura manométrica (m): | 31,15 | 33,34 | 32,35 | 31,89 | 32,60 | 33,50 | 30,73 |
| Potência requerida (kW): | 1,06 | 1,29 | 2,16 | 2,66 | 2,60 | 3,06 | 3,85 |
| Eficiência média da bomba (%): | 15,15 | 25,93 | 29,92 | 39,69 | 50,08 | 55,08 | 52,87 |
| Volume bombeado no período simulado (m³): | 227,67 | 453,25 | 906,51 | 1.495,52 | 1.813,01 | 2.266,26 | 3.018,20 |
| Média de energia utilizada (kWh/ML): | 554,13 | 340,95 | 286,43 | 214,21 | 172,22 | 162,49 | 152,89 |
| Energia consumida no período simulado (kWh): | 126,10 | 154,50 | 259,60 | 320,30 | 312,20 | 368,20 | 461,40 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 9.205,30 | 11.278,50 | 18.950,80 | 23.381,90 | 22.790,60 | 26.878,60 | 33.682,20 |
| Custo diário de energia (R\$): | 7,42 | 9,14 | 15,34 | 18,98 | 18,46 | 21,81 | 27,25 |
| Custo com energia no período simulado (R\$): | 37,12 | 45,68 | 76,70 | 94,88 | 92,31 | 109,05 | 136,26 |
| Custo anual de energia (R\$): | 2.708,30 | 3.336,10 | 5.599,10 | 6.927,70 | 6.737,90 | 7.960,65 | 9.946,25 |
| Custo unitário de energia médio (R\$/ML): | 163,07 | 100,79 | 84,62 | 63,45 | 50,92 | 48,12 | 45,15 |

| RESERV. DE MONTANTE | | | | | | | |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| População abastecida (hab.): | 250 | 500 | 1000 | 1650 | 2000 | 2500 | 3330 |
| Vazão de projeto (m³/h): | 2,81 | 5,63 | 11,25 | 18,56 | 22,50 | 28,13 | 37,46 |
| Vazão na simulação (m³/h): | 3,00 | 5,40 | 11,30 | 19,00 | 22,55 | 28,10 | 38,10 |
| Altura manométrica (m): | 37,91 | 44,66 | 44,15 | 47,70 | 48,24 | 51,93 | 45,21 |
| Potência requerida (kW): | 1,40 | 2,10 | 3,50 | 4,60 | 4,90 | 6,20 | 7,40 |
| Eficiência média da bomba (%): | 22,50 | 30,50 | 38,80 | 51,90 | 59,65 | 62,60 | 63,00 |
| Volume bombeado no período simulado (m³): | 224,54 | 435,79 | 897,96 | 1.511,40 | 1.819,34 | 2.272,57 | 3.045,33 |
| Média de energia utilizada (kWh/ML): | 456,52 | 392,39 | 307,02 | 244,53 | 217,78 | 221,71 | 194,37 |
| Energia consumida no período simulado (kWh): | 102,50 | 171,00 | 275,70 | 369,50 | 396,20 | 503,80 | 591,90 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 7.482,50 | 12.483,00 | 20.126,10 | 26.973,50 | 28.922,60 | 36.777,40 | 43.208,70 |
| Custo diário de energia (R\$): | 6,09 | 10,34 | 16,21 | 21,34 | 23,01 | 29,18 | 34,10 |
| Custo com energia no período simulado (R\$): | 30,05 | 49,72 | 80,31 | 107,83 | 115,43 | 146,28 | 172,03 |
| Custo anual de energia (R\$): | 2.222,85 | 3.774,10 | 5.916,65 | 7.789,10 | 8.398,65 | 10.650,70 | 12.446,50 |
| Custo unitário de energia médio (R\$/ML): | 135,71 | 118,67 | 90,29 | 70,60 | 63,23 | 64,20 | 55,99 |

| RESERV. DE JUSANTE | | | | | | | |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| População abastecida (hab.): | 250 | 500 | 1000 | 1650 | 2000 | 2500 | 3330 |
| Vazão de projeto (m³/h): | 2,81 | 5,63 | 11,25 | 18,56 | 22,50 | 28,13 | 37,46 |
| Vazão na simulação (m³/h): | 3,47 | 6,16 | 14,94 | 20,46 | 25,52 | 31,96 | 43,25 |
| Altura manométrica (m): | 37,56 | 42,67 | 42,04 | 46,24 | 47,08 | 49,70 | 44,89 |
| Potência requerida (kW): | 1,44 | 2,20 | 3,98 | 4,77 | 5,28 | 6,80 | 7,92 |
| Eficiência média da bomba (%): | 24,39 | 31,88 | 41,96 | 52,47 | 61,12 | 62,47 | 66,32 |
| Volume bombeado no período simulado (m³): | 223,61 | 448,31 | 926,31 | 1.526,94 | 1.858,33 | 2.333,30 | 3.101,02 |
| Média de energia utilizada (kWh/ML): | 415,54 | 356,28 | 267,41 | 233,90 | 206,66 | 212,41 | 183,02 |
| Energia consumida no período simulado (kWh): | 92,90 | 159,70 | 247,70 | 357,10 | 384,00 | 495,60 | 567,50 |
| Energia utilizada anualmente (kWh) | 6.781,70 | 11.658,10 | 18.082,10 | 26.068,30 | 28.032,00 | 36.178,80 | 41.427,50 |
| Custo diário de energia (R\$): | 5,54 | 9,51 | 14,25 | 20,63 | 21,71 | 28,36 | 32,54 |
| Custo com energia no período simulado (R\$): | 27,21 | 47,03 | 72,82 | 105,33 | 111,28 | 145,98 | 167,14 |
| Custo anual de energia (R\$): | 2.022,10 | 3.471,15 | 5.201,25 | 7.529,95 | 7.924,15 | 10.351,40 | 11.877,10 |
| Custo unitário de energia médio (R\$/ML): | 123,93 | 106,08 | 76,94 | 67,57 | 58,43 | 60,77 | 52,46 |