

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**RAFAEL FERNANDO DUTRA**

**ANÁLISE DE MELHORIAS EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MUNICIPAL  
VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**CAXIAS DO SUL**

**2013**

**RAFAEL FERNANDO DUTRA**

**ANÁLISE DE MELHORIAS EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MUNICIPAL  
VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Estágio II – MEC 0258 do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

**CAXIAS DO SUL**

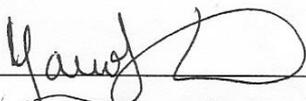
**2013**

**RAFAEL FERNANDO DUTRA**

**ANÁLISE DE MELHORIAS EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MUNICIPAL  
VISANDO À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Caxias do Sul, 19 de novembro de 2013.**



---

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano

Universidade de Caxias do Sul – Coordenador de Estágio

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

Universidade de Caxias do Sul – Supervisor de Estágio



---

Prof. Ms. Sérgio da Silva Kucera

Universidade de Caxias do Sul – Professor Avaliador



---

Prof. Ms. Sérgio Machado de Godoy

Universidade de Caxias do Sul – Professor Avaliador

## RESUMO

Com o rápido e desordenado crescimento ocorrido na cidade de Caxias do Sul-RS nas últimas duas décadas, tem-se verificado muitos problemas de abastecimento de água em determinadas regiões, principalmente em horários e dias de pico de consumo. Com o objetivo de solucionar o problema citado e tendo como foco a eficiência energética, neste trabalho foram propostas duas melhorias no sistema de bombeamento Santa Fé, o qual é responsável pelo abastecimento de parte da região norte de Caxias do Sul. As melhorias citadas envolveram troca de conjuntos de bombeamento e utilização de inversor de frequência para controle de velocidade de rotação do sistema. A partir das medições efetuadas em campo e das simulações realizadas em planilhas de cálculo e no *software* Epanet, constatou-se que as duas melhorias são viáveis técnica e economicamente, proporcionando uma economia mensal estimada de 37,7%.

**Palavras chave:** Eficiência energética. Bombas centrífugas. Abastecimento público. Epanet 2.0.

**Áreas de conhecimento:** Engenharia Mecânica. Mecânica dos Fluidos. Máquinas de Fluxo. Bombas centrífugas.

## ABSTRACT

With the rapid and disorderly growth that occurred in the city of Caxias do Sul - RS in the last two decades, many problems of water supply are observed in specific areas, especially in peak times and days of consumption. In order to solve the cited problem and focusing on energy efficiency, this study proposed two improvements in the pumping system of Santa Fe, which is responsible for supplying the northern part of Caxias do Sul. The improvements mentioned dealt with the exchange of the pumping system and the use of a frequency converter to control its speed. From the measurements made and simulations in spreadsheets and software Epanet, it was found that the two improvements are technically and economically viable, providing an estimated monthly savings of 37,7%.

**Keywords:** Energy efficiency. Centrifugal pumps. Water public supply. Epanet 2.0.

**Areas of expertise:** Mechanical Engineering. Fluid Mechanics. Flow Machines. Centrifugal pumps.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva característica de uma instalação de bombeamento .....	21
Figura 2 – Exemplos de principais componentes de bombas centrífugas .....	24
Figura 3 – Curva de carga versus vazão da bomba ITAP 100-200 .....	26
Figura 4 – Curva de rendimento versus vazão da bomba ITAP 100-200 .....	26
Figura 5 – Curva de potência versus vazão da bomba ITAP 100-200.....	27
Figura 6 – Curva de NPSH versus vazão da bomba ITAP 100-200 .....	27
Figura 7 – Exemplo da variação da curva de carga hidráulica com a variação da rotação da bomba centrífuga.....	28
Figura 8 – Exemplo da variação de potência mecânica com a variação da rotação da bomba centrífuga.....	29
Figura 9 – Exemplo da variação da curva de rendimento com a variação da rotação da bomba centrífuga.....	29
Figura 10 – Pontos de operação com uma, duas e três bombas idênticas em paralelo .....	31
Figura 11 – Principais componentes do EPANET 2.0 .....	32
Figura 12 – Gráfico de medição de pressão efetuado no dia 06/04/2013 (Sábado) na Rua dos Funileiros, Lot. Belo Horizonte, Bairro Santa Fé, Caxias do Sul RS .....	36
Figura 13 – Esquema de funcionamento da EBAT Santa Fé .....	37
Figura 14 – De cima para baixo: GMB 02, GMB 03 e GMB 01 da EBAT Santa Fé .....	38
Figura 15 – Manômetro de 0 a 100 mca da marca Gulton, modelo Gulpress 1000.....	39
Figura 16 – Registrador de pressão da marca Compuway, modelo MaxxiLogger.....	40
Figura 17 – Medidor de vazão eletromagnético da marca Conaut-Krohne instalado na tubulação de recalque da EBAT Santa Fé.....	41
Figura 18 – Conversor de sinais do medidor de vazão eletromagnético .....	41
Figura 19 – Analisador de energia da marca Instrutherm, modelo AE 100.....	42
Figura 20 – Área exemplificando modelo hidráulico gerado no Epanet para o Sistema Santa Fé.....	46
Figura 21 – Comparativo de pressão da saída do bombeamento da EBAT Santa Fé demonstrando o valor real (pontos em verde) e o valor gerado pelo Epanet (curva em vermelho).....	46
Figura 22 – Comparativo entre as curvas de pressão versus vazão .....	47
Figura 23 – Comparativo entre as curvas de potência versus vazão .....	48
Figura 24 – Comparativo entre as curvas de rendimento versus vazão .....	48
Figura 25 – Valores médios de pressão e vazão registrados durante o período de 22/07/2013 a 28/07/2013.....	50

Figura 26 – Custo de energia para cada cinco minutos de funcionamento da bomba.....	52
Figura 27 – Custo por volume de água bombeada .....	53
Figura 28 – Comparação dos valores de NPSH requeridos por cada bomba .....	54
Figura 29 – Simulação do sistema Santa Fé no horário de maior consumo (13 horas): (a) no sistema atual e (b) utilizando a bomba INI 150-400 .....	55
Figura 30 – Simulação do sistema Santa Fé no horário de menor consumo (madrugada): (a) no sistema atual e (b) utilizando a bomba INI150-400 .....	55
Figura 31 – Curvas de carga da bomba INI 150-400 conforme a variação da frequência ....	57
Figura 32 – Custo de energia para cada cinco minutos de funcionamento da bomba, com e sem controle de pressão .....	58
Figura 33 – Custo por volume de água bombeada, com e sem controle de pressão .....	58
Figura 34 – Utilização da bomba INI 150-400 no horário de maior consumo (13 horas): (a) sem controle de pressão e (b) com controle de pressão.....	60
Figura 35 – Utilização da bomba INI 150-400 no horário de menor consumo (madrugada): (a) sem controle de pressão e (b) com controle de pressão .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fórmulas para cálculo de perda de carga distribuída .....	19
Tabela 2 – Velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento em função do diâmetro da canalização.....	22
Tabela 3 – Principais dados dos equipamentos instalados na EBAT Santa Fé.....	38
Tabela 4 – Fluxo de caixa do projeto .....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ações de engenharia para diminuição de perdas de energia .....	35
Quadro 2 – Comparativo entre a bomba atual e as duas propostas de substituição .....	54
Quadro 3 – Comparativo da bomba INI 150-400 com e sem controle de pressão .....	59
Quadro 4 – Lista de equipamentos e materiais para a implementação do projeto .....	61
Quadro 5 – Redução de consumo de energia elétrica e demanda de energia .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMT	Altura Manométrica Total
BH	Bomba Hidráulica
BHP	<i>Brake Horse Power</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
DN	Diâmetro Nominal
EBAT	Estação de Bombeamento de Água Tratada
ELETROBRAS	Centrais Elétricas Brasileiras S/A
ETA	Estação de Tratamento de Água
GMB	Grupo Motobomba
GME	Gerência de Manutenção Eletromecânica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
NPSH	<i>Net Positive Suction Head</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROCEL-SANEAR	Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental
RGE	Rio Grande Energia
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RNV	Reservatório de Nível Variado
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SEA	Seção de Eletrônica e Automação
SME	Seção de Manutenção Elétrica
SMM	Seção de Manutenção Mecânica
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TRC	Tempo de Retorno do Capital
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VPL	Valor Presente Líquido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	AMBIENTE DE ESTÁGIO .....	15
1.2	JUSTIFICATIVA .....	16
1.3	OBJETIVOS .....	16
1.3.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
1.3.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	PROJETO E MODELAGEM HIDRÁULICA DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO.....	18
2.1.1	<b>Determinação do Diâmetro Ótimo da Tubulação .....</b>	<b>18</b>
2.1.2	<b>Cálculo das perdas de carga.....</b>	<b>19</b>
2.1.2.1	Perdas de carga distribuídas.....	19
2.1.2.2	Perdas de carga localizadas .....	20
2.1.3	<b>Curva Característica da Instalação.....</b>	<b>20</b>
2.1.4	<b>Pressões máximas e mínimas na rede.....</b>	<b>21</b>
2.2	BOMBAS HIDRÁULICAS .....	22
2.3	BOMBAS CENTRIFUGAS .....	23
2.3.1	<b>Grandezas fundamentais para o estudo de bombas centrifugas.....</b>	<b>24</b>
2.3.2	<b>Curvas características de bombas centrifugas.....</b>	<b>26</b>
2.3.3	<b>Variação das Curvas Características da Bomba.....</b>	<b>27</b>
2.3.4	<b>Associação de bombas centrifugas .....</b>	<b>30</b>
2.3.4.1	Associação de bombas em série.....	30
2.3.4.2	Associação de bombas em paralelo.....	30
2.4	SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET 2.0.....	31
2.5	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SANEAMENTO .....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	36
3.2	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	37
3.3	DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	39

3.3.1	Manômetro digital.....	39
3.3.2	Registrador de pressão ( <i>data loggers</i> ).....	39
3.3.3	Medidor de vazão eletromagnético.....	40
3.3.4	Analisador de energia.....	42
3.4	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO .....	42
3.4.1	Troca do sistema de bombeamento .....	43
3.4.2	Utilização do inversor de frequência para variação da velocidade de rotação do sistema de bombeamento.....	44
3.4.3	Análise de viabilidade econômica das melhorias propostas.....	44
3.4.4	Modelo hidráulico para o sistema Santa Fé.....	45
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>47</b>
4.1	TROCA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO .....	47
4.1.1	Curvas características reais das bombas centrífugas .....	47
4.1.2	Medição dos pontos de trabalhos do sistema de bombeamento Santa Fé.....	49
4.1.3	Planilha de análise hidráulica e elétrica.....	51
4.1.4	Análise comparativa para troca do sistema de bombeamento.....	52
4.1.5	Simulação da bomba INI 150-400 no <i>software</i> Epanet.....	55
4.2	UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DOS VALORES DE PRESSÃO .....	56
4.2.1	Curvas de similaridade da bomba INI 150-400 variando a velocidade de rotação.....	56
4.2.2	Análise comparativa entre o sistema de bombeamento com e sem o controle de rotação .....	57
4.2.3	Simulação da bomba INI 150-400 no <i>software</i> Epanet efetuando o controle de pressão através da velocidade rotação .....	59
4.3	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO.....	61
4.3.1	Materiais e equipamentos a serem adquiridos.....	61
4.3.2	Redução de custos mensais obtida com o projeto.....	62
4.3.3	Análise econômica do projeto.....	62
4.3.4	Considerações finais.....	63

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – PLANILHA DE ANÁLISE HIDRÁULICA E ELÉTRICA DA BOMBA IMBIL – MODELO: ITAP 100-200.....</b>		<b>70</b>
<b>APÊNDICE B – PLANILHA DE ANÁLISE HIDRÁULICA E ELÉTRICA DA BOMBA IMBIL – MODELO: INI 150-400.....</b>		<b>75</b>
<b>APÊNDICE C – PLANILHA DE ANÁLISE HIDRÁULICA E ELÉTRICA DA BOMBA IMBIL – MODELO: INI 80-200.....</b>		<b>80</b>
<b>APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A TROCA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....</b>		<b>85</b>
<b>APÊNDICE E – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DOS VALORES DE PRESSÃO.....</b>		<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Devido à crise no sistema energético com a qual o Brasil conviveu no ano de 2001, somado ao fato de se estar atingindo recordes de consumo de energia elétrica no estado do Rio Grande do Sul (Correio do Povo, 2012), tornam-se necessárias buscas por soluções que atendam à demanda crescente de energia elétrica no país. Agindo nesse sentido e objetivando a modernização do sistema elétrico brasileiro, deve-se implantar novas fontes de geração, bem como ampliar e adequar os sistemas de transmissão e distribuição existentes. No entanto, complementarmente, uma solução mais econômica e de resultados mais imediatos está na eliminação do desperdício de energia elétrica, ou seja, na eficiência energética.

Para qualquer sistema, o termo “eficiência energética” pode ser definido como a utilização da menor quantidade possível de energia para realizar um trabalho sem que haja perda de qualidade e segurança na sua realização (GUIMARÃES, 2008). Desta forma, pode-se gerar e utilizar a energia elétrica com menores custos, de forma mais limpa e mais rápida, dado ser uma alternativa de curto prazo de implantação. Sabendo disto, o Governo do Brasil vem, desde 1985 com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), agindo no sentido de reduzir o consumo e a demanda de energia elétrica no país (SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006).

Desde 2003, dentro do PROCEL, foi instituído o PROCEL SANEAR – Programa de Eficiência Energética em Saneamento Ambiental, o qual, dentre outras atribuições, atua na eliminação do desperdício de energia elétrica em prestadores de serviço de saneamento (Eletrobras, 2006). Neste setor, as despesas com energia elétrica acentuaram-se significativamente nas últimas duas décadas<sup>1</sup> e já se constituem como o segundo item nas despesas operacionais (GOMES, 2005).

Dentro destas empresas, as estações elevatórias são, majoritariamente, os grandes consumidores de energia elétrica e, com isso, devem trabalhar com a maior eficiência possível. Existem diversas alternativas para se atingir este objetivo e, neste trabalho, foram analisadas algumas delas utilizando-se como ferramenta de

---

<sup>1</sup> Com o advento do Plano Real e a privatização de diversas empresas concessionárias de energia elétrica, houve uma diminuição significativa nos subsídios aplicados aos preços das tarifas de energia elétrica para as empresas de saneamento. Por exemplo, no estado de São Paulo, os subsídios caíram de 80%, em 1970, para 15% nos dias de hoje (GOMES, 2005).

estudo um modelo computacional de um sistema de bombeamento do município de Caxias do Sul – RS.

## 1.1 AMBIENTE DE ESTÁGIO

Criado pela lei municipal nº 1474, de 05 de Janeiro de 1966, em substituição ao Departamento Municipal de Abastecimento Público, o Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) é a autarquia municipal responsável pelo abastecimento de água e tratamento de esgoto da cidade de Caxias do Sul.

Com relação ao abastecimento de água, o SAMAE é responsável pela captação, tratamento e distribuição de água, possuindo em operação cinco sistemas: a) Sistema Faxinal, com vazão aproximada de 1050 L/s; b) Sistema Maestra, com vazão aproximada de 300 L/s; c) Sistema Dal Bó, com vazão aproximada de 90 L/s; d) Sistema Samuara, com vazão aproximada de 30 L/s; e e) Sistema Galópolis, com vazão aproximada de 15 L/s.

Além dos sistemas citados, existem cerca de dezessete poços artesianos instalados em diversas comunidades rurais e o Sistema Marrecas, o qual ainda está em fase de conclusão.

A Gerência de Manutenção Eletromecânica (GME), setor no qual foi realizado o presente trabalho, está lotada na Divisão de Água do SAMAE e localiza-se na rua Nestor Moreira, 719, bairro Nossa Senhora de Lourdes, cidade de Caxias do Sul – RS. Esta gerência, a qual divide-se nas Seções de Manutenção Mecânica (SMM), Manutenção Elétrica (SME) e Eletrônica e Automação (SEA), é responsável pela manutenção de todos os equipamentos eletromecânicos utilizados no SAMAE. Dentre as suas principais atribuições pode-se citar: a) manutenção de bombas (centrifugas, dosadoras e helicoidais), motores elétricos e válvulas (de gaveta, borboleta, de retenção e comportas); b) projeto, instalação e manutenção de instalações elétricas e de automação; e c) serviços de usinagem e soldagem de manutenção.

Além dos trabalhos citados, este setor também é responsável por projetos, dimensionamentos e instalação de sistemas de bombeamento, bem como pelo projeto de eficiência energética existente entre o SAMAE e a concessionária de energia elétrica Rio Grande Energia (RGE).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A Estação de Bombeamento de Água Tratada – EBAT Santa Fé, localizada na Estação de Tratamento de Água – ETA Celeste Gobbato, possui vazão aproximada de 100 L/s e é responsável pelo abastecimento de diversos bairros da zona norte de Caxias do Sul. Dentre os bairros abastecidos por este bombeamento, que está inserido no Sistema Maestra, pode-se citar: Santa Fé, Belo Horizonte, Canyon, Brandalise, Centenário, Parque Oásis, Altos da Maestra, dentre outros.

Devido ao acentuado crescimento populacional ocorrido nesta região nos últimos anos, e ao sistema de bombeamento atual trabalhar com a mesma capacidade há mais de quinze anos, têm-se registrados diversos problemas de abastecimento na referida região, principalmente em horários e dias de pico de consumo.

Com isso, tornou-se necessário efetuar um estudo de melhorias neste sistema de bombeamento visando solucionar os problemas de abastecimento desta região e melhorar a sua eficiência energética.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um método de análise de melhorias tendo como suporte a simulação computacional visando à eficiência energética, o qual possa ser aplicado a qualquer sistema de bombeamento com características semelhantes ao estudado.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos a serem atendidos nesse trabalho de conclusão de curso são identificados a seguir:

- a) estudo dos principais métodos e inovações na área de eficiência energética em sistemas de bombeamento;
- b) descrição geral e diagnóstico energético do sistema de bombeamento utilizado atualmente;

- c) análise da região abastecida, através do modelo hidráulico gerado no *software* Epanet; e
- d) análise da viabilidade técnica e econômica das seguintes melhorias: 1) troca do sistema de bombeamento; 2) variação de velocidade de rotação do sistema de bombeamento visando manter a pressão do sistema constante.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 PROJETO E MODELAGEM HIDRÁULICA DE UM SISTEMA DE ABASTECIMENTO

#### 2.1.1 Determinação do Diâmetro Ótimo da Tubulação

Para o dimensionamento da adutora para bombeamento, Tsutiya (2006) afirma que geralmente são conhecidos: a) vazão de adução,  $Q$ ; b) comprimento da adutora,  $L$ ; c) desnível a ser vencido,  $H_g$ ; e d) material da adutora.

Segundo Tsutiya (2006), Schmidlin Júnior (2006) e Porto (2006), a determinação do diâmetro da adutora é feita levando-se em conta aspectos quase que estritamente econômico-financeiros, por isso sendo escolhido o diâmetro que conduz ao mínimo custo de implantação, de operação e manutenção do sistema elevatório. Portanto, a escolha final do diâmetro da adutora é feita considerando-se os custos de: a) aquisição e assentamento dos tubos, peças e aparelhos; b) aquisição do conjunto motor-bomba adequado a cada valor de diâmetro; c) operação, manutenção e consumo de energia elétrica; e d) amortização e juros.

Para a determinação do diâmetro ótimo da tubulação de recalque ( $d_R$ ) recorre-se à fórmula empírica de Bresse, apresentada na equação (1).

$$d_R = K \times \sqrt{Q_d} \quad (1)$$

onde  $d_R$  é dado em metros,  $Q_d$  é a vazão em  $m^3/s$  e  $K$  é o coeficiente de Bresse, o qual é função da velocidade econômica de escoamento da adutora ( $V$ ) e pode ser determinado pela equação (2).

$$K = \sqrt{\frac{4}{\pi \times V}} \quad (2)$$

Como resultado do valor de  $d_R$ , é tomado o diâmetro comercial imediatamente superior ao obtido pela equação (1). Por sua vez, para o diâmetro da tubulação de

sucção ( $d_s$ ) adota-se o diâmetro comercial imediatamente superior a  $d_R$  (SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006; PORTO, 2006).

## 2.1.2 Cálculo das perdas de carga

Conforme Schmidlin Júnior (2006), as perdas de carga existentes no deslocamento de um fluido no interior de uma tubulação apresentam-se de duas formas distintas: perdas de carga nas tubulações retas (chamadas de perdas de carga distribuídas) e perdas nas peças especiais (chamadas de perdas de carga localizadas).

### 2.1.2.1 Perdas de carga distribuídas

Para o cálculo das perdas de carga em tubulação reta, usualmente são utilizadas as equações da fórmula Universal (Darcy e Weisbach) e de Hazen-Williams (TSUTIYA, 2006).

Conforme Barroso (2005), ambas as fórmulas citadas acima se baseiam na equação (3) para calcular a perda de carga contínua entre o nó inicial e final da tubulação:

$$J_{inst} = A \times Q^B \quad (3)$$

onde  $J_{inst}$  é a perda de carga, em metros;  $Q$  é a vazão, em  $m^3/s$ ;  $A$  é o termo de perda de carga; e  $B$  é o expoente da vazão.

A Tabela 1 apresenta para cada fórmula a expressão do termo de perda de carga ( $A$ ) e o valor para o expoente da vazão ( $B$ ). Cada fórmula utiliza um coeficiente diferente, os quais são determinados empiricamente.

Tabela 1 – Fórmulas para cálculo de perda de carga distribuída

Fórmula	A	B
Hazen-Williams	$10,674.C^{-1,852}.D^{-4,871}.L$	1,852
Darcy-Weisbach	$0,0827.f.D^{-5}.L$	2

Fonte: Barroso, 2005.

Onde:  $D$  = diâmetro (m);  $L$  = comprimento (m);  $C$  = coeficiente de rugosidade e  $f$  = fator de atrito, o qual é determinado pelo número de Reynolds e rugosidade da tubulação.

### 2.1.2.2 Perdas de carga localizadas

Além da perda de carga que ocorre ao longo dos encanamentos, nos acessórios de tubulação (conexões, válvulas, curvas, dentre outros) há uma perda adicional, causada pela turbulência, alteração da velocidade, mudança na direção, aumento do atrito e choques das partículas do fluido ocorridos nestes acessórios (SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006).

Dentre os métodos disponíveis para calcular essas perdas faz-se o uso, geralmente, do método dos comprimentos equivalentes. Por este método, para o cálculo da perda de carga total ocorrida nas tubulações ( $J_{inst}$ ), são somados ao termo  $L$  da equação (3) os comprimentos equivalentes em metros de tubulação reta e de igual diâmetro de todos os acessórios existentes no sistema, resultando então no comprimento total equivalente ( $L_{eq}$ ).

### 2.1.3 Curva Característica da Instalação

A altura total de elevação ( $H_{inst}$ ) pode ser entendida como a energia exigida para o transporte do fluido no interior da tubulação, sendo matematicamente obtida (em metros) pela equação (4).

$$H_{inst} = H_g + \frac{p_{RR} - p_{RS}}{\gamma} + \frac{v_{RR}^2 - v_{RS}^2}{2g} + J_{inst} \quad (4)$$

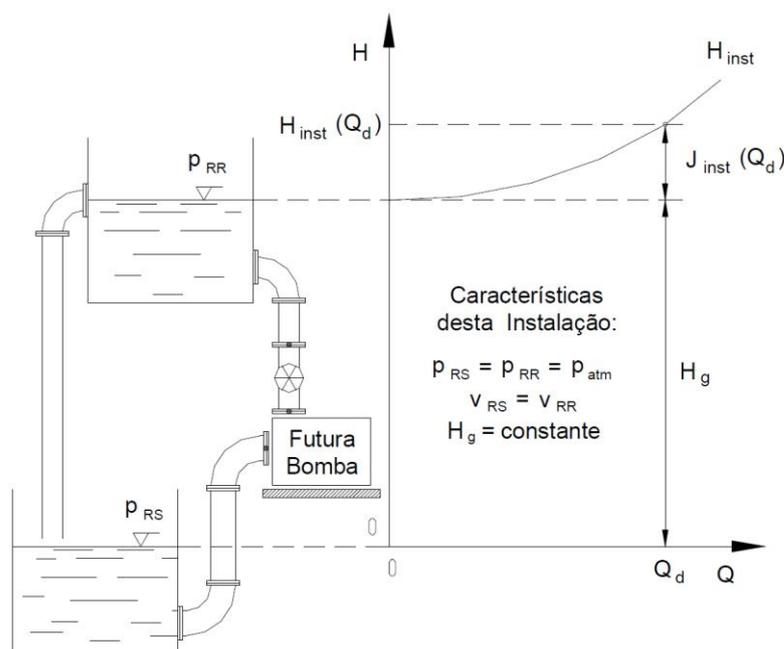
onde  $H_g$ , normalmente chamada de altura geométrica, é a diferença entre as cotas dos reservatórios de recalque e sucção (em metros);  $p_{RR}$  e  $p_{RS}$  são as pressões manométricas no nível do líquido nos reservatórios de sucção e recalque (em Pascal);  $\gamma$  é o peso específico do fluido bombeado (em  $N/m^3$ ); e  $v_{RR}$  e  $v_{RS}$  são as velocidades do líquido no nível dos reservatórios de sucção e recalque (em m/s).

Estando os reservatórios de sucção e recalque submetidos à mesma pressão ( $p_{RR} = p_{RS} =$  pressão atmosférica) e sendo mantido constante o nível de cada reservatório ( $v_{RR} = v_{RS} = 0$ ), conseqüentemente,  $H_g$  é constante e a equação (4) torna-se a equação (5).

$$H_{inst} = H_g + J_{inst} \quad (5)$$

Assim, visando retratar a carga requerida para o transporte do fluido em função da vazão de bombeamento, é traçada a curva de carga da instalação (curva característica da instalação), mostrada na Figura 1. Dado que  $H_g$  é considerado constante e a perda de carga é função quadrática da vazão, como mostrado na Tabela 1, tem-se que a curva de carga da instalação é representada por uma equação do segundo grau.

Figura 1 – Curva característica de uma instalação de bombeamento



Fonte: Schmidlin Júnior (2006)

#### 2.1.4 Pressões máximas e mínimas na rede

O controle das pressões hidráulicas efetivas que vão atuar em uma rede de distribuição de água é um fator fundamental, pois interfere diretamente na qualidade do serviço, nas perdas reais de água e no custo de implantação e operação do sistema (SALVINO, 2009). Estabelecem-se pressões mínimas para que a água alcance os reservatórios domiciliares e pressões máximas em função da resistência das tubulações e controle de perdas de água (TSUTIYA, 2006).

Conforme a norma NBR 12218:1994, a pressão estática máxima na rede de distribuição deve ser de 50 mca, e a pressão dinâmica mínima, de 10 mca. Tsutiya (2006) afirma que, em cidades com topografia acidentada, as redes devem ser divididas por zonas de pressão, de forma a atender aos limites de carga

estabelecidos. O limite de pressão superior nas redes deve ser imposto pelos seguintes aspectos (SALVINO, 2009): a) quanto maiores forem as pressões requeridas, maior será o custo energético de bombeamento, pois este custo é diretamente proporcional à altura manométrica de elevação; b) para maiores pressões na rede, as tubulações instaladas deverão possuir pressões nominais maiores, sendo estas de maior custo; c) as possibilidades de rompimento das tubulações aumentam com o aumento das pressões dinâmicas e estáticas da rede; d) as perdas físicas de água crescem com o aumento das pressões de serviço, pois a vazão nas fissuras ou juntas dos tubos aumenta com o acréscimo da pressão; e e) as vazões nos pontos de consumo crescem com o aumento das pressões disponíveis.

Os limites de velocidades máxima e mínima admissíveis nas tubulações sob pressão em redes de distribuição de água também são determinados pela norma NBR 12218:1994, a qual estabelece que a velocidade máxima nas tubulações deva ser de 3,5 m/s, e a mínima de 0,6 m/s. A máxima visa manter a perda de carga em valores aceitáveis, e a mínima, uma permanente circulação de água na rede, como forma de não prejudicar a qualidade da água tratada.

No entanto, Barroso (2005) afirma que é usual a utilização da equação (6) ou da Tabela 2 no cálculo da velocidade máxima admissível ( $V_{m\acute{a}x}$ ).

$$V_{m\acute{a}x} = 0,6 + 1,5 \cdot D \quad (6)$$

onde  $D$  é dado em metros.

Tabela 2 – Velocidades e vazões máximas em redes de abastecimento em função do diâmetro da canalização

D (mm)	50	75	100	150	200	250	300	350
$V_{m\acute{a}x}$ (m/s)	0,68	0,71	0,75	0,83	0,90	0,98	1,05	1,13
$Q_{m\acute{a}x}$ (L/s)	1,34	3,14	5,89	14,67	28,27	47,86	74,22	108,72

Fonte: Barroso, 2005.

## 2.2 BOMBAS HIDRÁULICAS

Bombas hidráulicas são máquinas operatrizes que recebem trabalho mecânico (geralmente fornecido por um motor elétrico ou a combustão) e o

transforma em energia hidráulica, transmitindo ao líquido um acréscimo de energia sob as formas de pressão e velocidade (MACINTYRE, 1997).

As bombas hidráulicas ou máquinas de fluido são normalmente subdivididas em dois tipos principais: as máquinas de deslocamento positivo e as de fluxo. Nas primeiras, uma quantidade de fluido encontra-se confinado durante sua passagem através da máquina e o seu aumento de pressão ocorre em razão da variação no volume da câmara em que se encontra. Já no segundo equipamento, também conhecido como máquina hidrodinâmica, o fluido não se encontra confinado em nenhum momento e sim em um fluxo contínuo através da máquina, sendo submetido a uma troca de energia devido a efeitos dinâmicos (HENN, 2006). Como o equipamento utilizado neste estudo é uma bomba centrífuga, a qual é um tipo de máquina de fluxo, será dado um enfoque mais detalhado tanto na sua definição quanto em suas características principais.

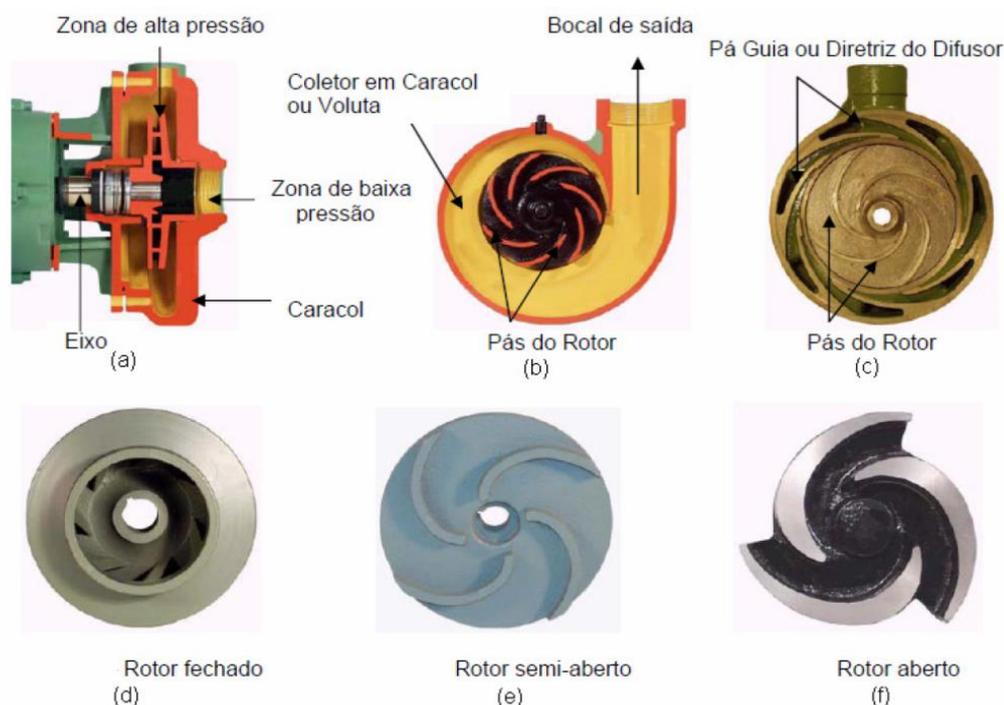
### 2.3 BOMBAS CENTRIFUGAS

Conforme Tsutiya (2006), as bombas centrífugas aceleram a massa líquida através da força centrífuga fornecida pelo giro do rotor, cedendo energia cinética à massa em movimento e transformando a energia cinética internamente em energia potencial de pressão.

Dentre os componentes da bomba centrífuga, Henn (2006) cita o rotor e o sistema diretor (“caracol”) como sendo os elementos construtivos fundamentais, pois são eles os responsáveis pelos fenômenos fluidodinâmicos essenciais. O rotor, o qual é constituído por um número de pás giratórias, é a peça responsável por transformar a energia mecânica em energia de fluido. Já o sistema diretor tem como finalidade coletar o fluido e dirigi-lo para um caminho determinado, transformando parte da energia de velocidade do líquido que é expelido pelo rotor em energia de pressão (HENN, 2006; TSUTIYA, 2006).

A Figura 2 ilustra alguns exemplos de sistemas diretores, além de rotores dos tipos fechado (para uso com líquidos sem substâncias em suspensão), aberto e semiaberto (utilizados com líquidos contendo partículas como pastas, lamas, areia e efluentes).

Figura 2 – Exemplos de principais componentes de bombas centrífugas



Fonte: Schneider Motobombas

### 2.3.1 Grandezas fundamentais para o estudo de bombas centrífugas

Como o enfoque deste estudo será a eficiência energética, serão abordadas apenas as grandezas hidráulicas das bombas centrífugas que estão relacionadas ao objeto deste trabalho e que são apresentadas abaixo.

a) Energia ou carga hidráulica ( $H$ ) - conforme Guimarães (2008), a carga de uma bomba pode ser definida como energia por unidade de massa ou energia por unidade de peso que a bomba pode impor ao líquido na vazão desejada. Na prática, Henn (2006) afirma que é comum associar a energia recebida pelo fluido ao passar pela bomba centrífuga a uma altura de coluna de fluido ( $H$ ). Para este estudo, por se tratarem de bombas centrífugas para abastecimento público, a unidade de carga hidráulica a ser adotada será altura de coluna de água (metros de coluna d'água - mca).

b) Vazão ( $Q$ ) - para o caso de bombas centrífugas que trabalham com fluidos incompressíveis (com massa específica constante), ao invés de fluxo mássico, torna-se mais frequente o uso da vazão volumétrica, a qual é definida pelo fluxo ou deslocamento de um volume em um determinado tempo (HENN, 2006).

c) Potência Hidráulica ( $P$ ) - segundo Schmidlin Júnior (2006) para que haja geração de carga por parte da bomba, é necessária a inserção de potência mecânica no seu eixo, comumente denominada de BHP (do inglês, "*Brake Horse Power*"). Henn (2006) afirma que, no Sistema Internacional de Unidades, o cálculo de potência útil cedida ao fluido pode ser pela equação (7).

$$P_{\text{útil}} = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (7)$$

onde  $P$  é a potência hidráulica, em watts;  $\gamma$  é o peso específico do fluido, em  $\text{N/m}^3$ ;  $Q$  é a vazão, em  $\text{m}^3/\text{s}$ ; e  $H$  é a altura de coluna fluida, em m.

d) Rendimento - por definição, rendimento é a razão entre a potência útil cedida ao fluido e a potência absorvida pela bomba (SCHMIDLIN JÚNIOR, 2006). Segundo catálogos de fabricantes de bombas centrifugas, o rendimento normalmente varia de 0,45 a 0,85.

e) NPSH (*Net Positive Suction Head*) - segundo Henn (2006) e De La Torre (2008), no bombeamento de líquidos, com o objetivo de evitar o fenômeno da cavitação<sup>2</sup>, a pressão, em qualquer ponto da linha de sucção, nunca deve ser reduzida à pressão de vapor do líquido. A energia disponível para conduzir o líquido através da canalização de sucção e no seu percurso pelo interior do rotor, sem risco de vaporização, pode ser definida como a energia total na sucção menos a energia correspondente à pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento. A esta energia disponível dá-se o nome de NPSH (do inglês, *Net Positive Suction Head*), a qual é dada em mca.

Cada bomba centrifuga possui, para cada ponto de operação, um valor de NPSH mínimo que deve estar disponível no sistema para que não ocorra o fenômeno da cavitação (DE LA TORRE, 2008).

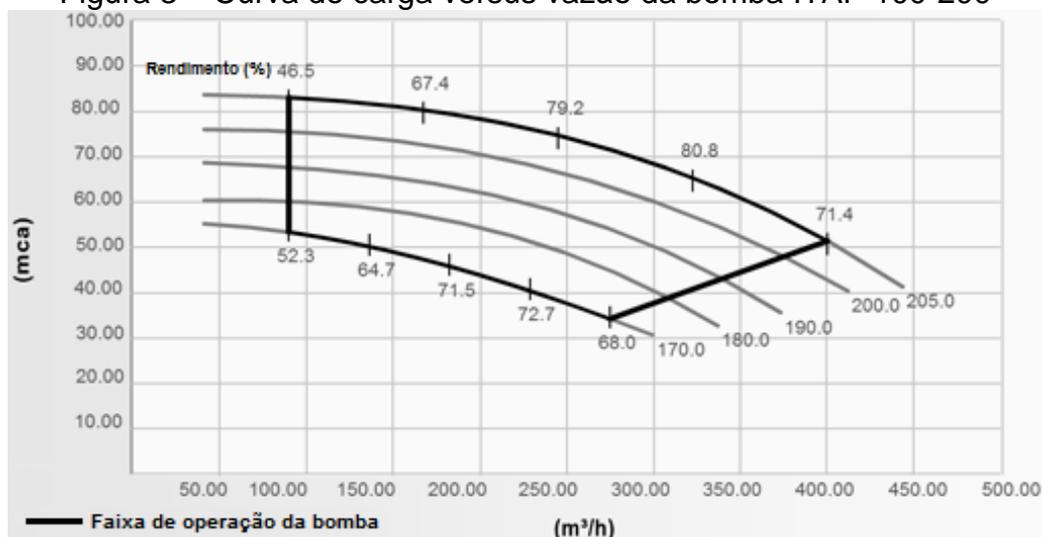
---

<sup>2</sup> Segundo Henn (2006) e De La Torre (2008), o fenômeno da cavitação consiste na formação e subsequente colapso, no seio de um líquido em movimento, de bolhas ou cavidades preenchidas, em grande parte, por vapor de líquido. Estas bolhas, ao encontrarem uma região com maior pressão, se condensam e, com isso, pela diferença de volume específico do vapor para o líquido, há um fluxo do fluido nos arredores da bolha para preencher a diferença de volume, implicando em um pico de pressão, que se propaga à frequência de colapso das bolhas causando danos irreversíveis às peças da bomba.

### 2.3.2 Curvas características de bombas centrífugas

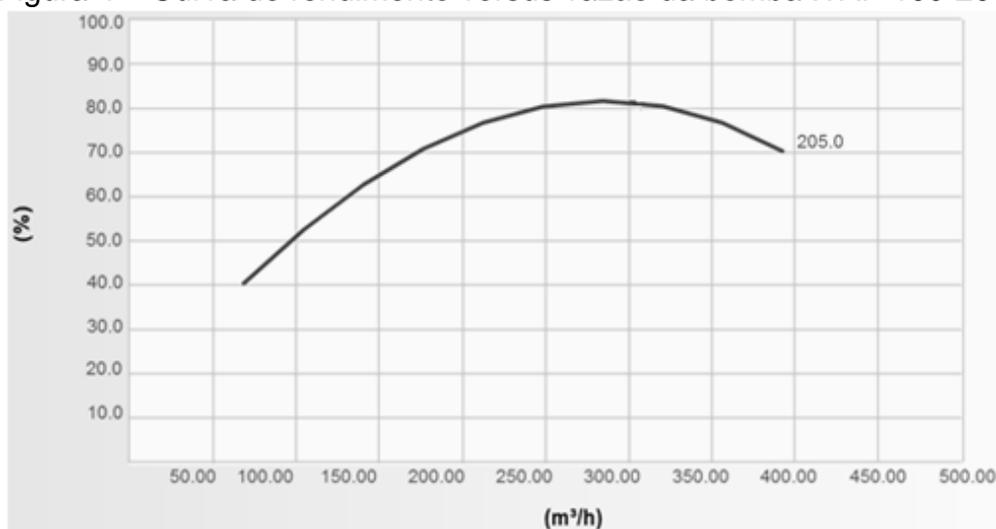
O desempenho esperado de bombas centrífugas é representado através de curvas características fornecidas pelos fabricantes do equipamento. Essas curvas são levantadas em laboratório e disponibilizadas em catálogos técnicos. Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 são apresentadas as quatro curvas principais, fornecidas pelo fabricante Imbil para a bomba de modelo ITAP 100-200, para os diâmetros de rotores 170 a 205 mm.

Figura 3 – Curva de carga versus vazão da bomba ITAP 100-200



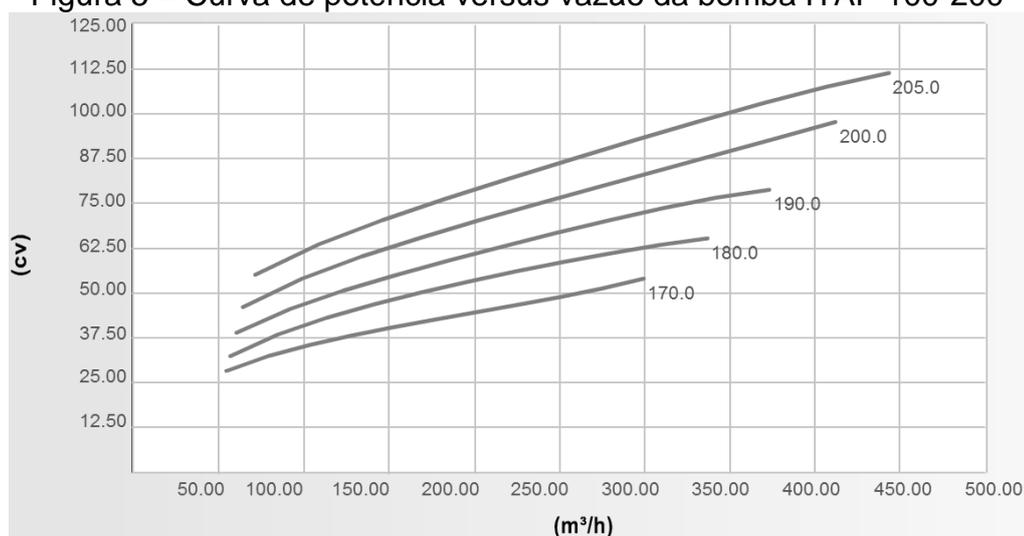
Fonte: Imbil

Figura 4 – Curva de rendimento versus vazão da bomba ITAP 100-200



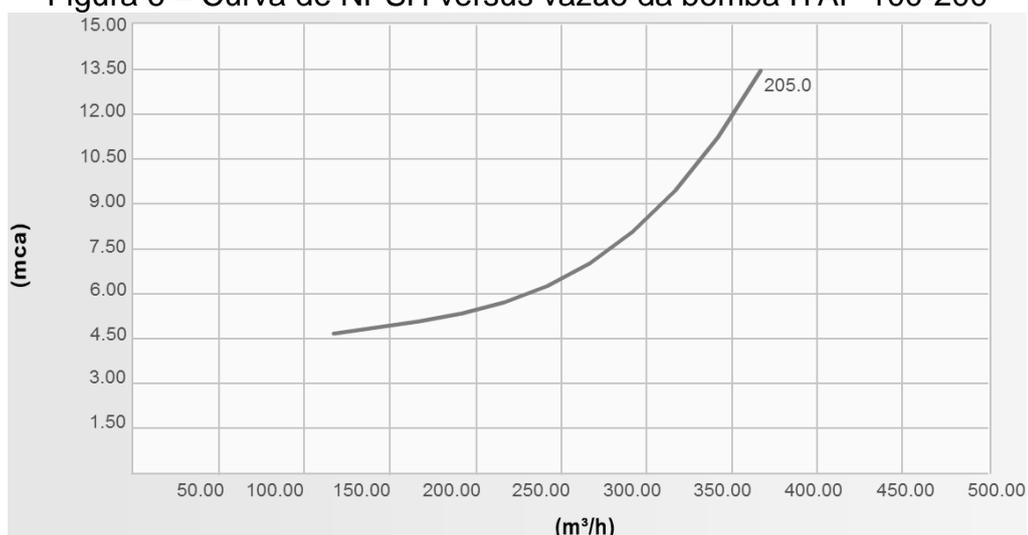
Fonte: Imbil

Figura 5 – Curva de potência versus vazão da bomba ITAP 100-200



Fonte: Imbil

Figura 6 – Curva de NPSH versus vazão da bomba ITAP 100-200



Fonte: Imbil

### 2.3.3 Variação das Curvas Características da Bomba

Dentre as formas de se modificar as curvas características de uma bomba centrífuga, Schmidlin Júnior (2006) cita a variação do diâmetro do rotor e a variação de rotação como sendo as mais utilizadas.

A primeira apresenta o inconveniente de não poder ser realizada com o sistema em operação, visto que é necessária efetuar a troca do rotor, além de permitir que somente algumas curvas de carga sejam alcançadas, por limitações

físicas da carcaça da bomba (SAVAR, 2009). Por sua vez, a segunda forma, além de não requisitar a parada do sistema, permite que a curva da bomba seja alterada a uma maior faixa de valores.

Como forma de se estimar os resultados das variações dos parâmetros característicos das bombas centrífugas radiais, a partir da variação da rotação, é comum utilizarem-se as chamadas relações de Rateaux ou leis de similaridade, que são dadas para bombas centrífugas com o diâmetro do rotor fixo pelas equações (8), (9) e (10) a seguir, onde os subíndices 1 e 2 indicam diferentes pontos de funcionamento.

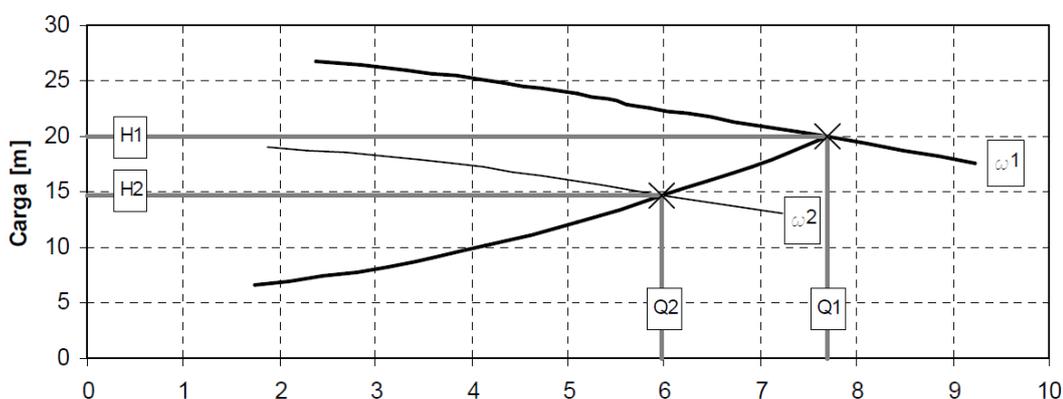
$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (8)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \quad (10)$$

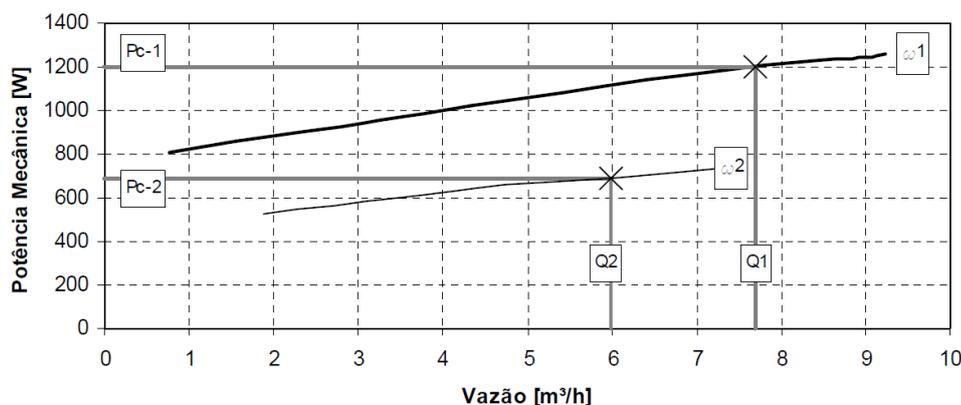
Aplicando-se as equações (8), (9) e (10) a cada ponto da curva de carga, potência e rendimento da bomba na rotação  $\omega_1$  são obtidas as curvas para a velocidade  $\omega_2$ , a qual é menor que  $\omega_1$ . As Figuras 7, 8 e 9 mostram como a variação da velocidade altera o ponto de operação da bomba centrífuga.

Figura 7 – Exemplo da variação da curva de carga hidráulica com a variação da rotação da bomba centrífuga



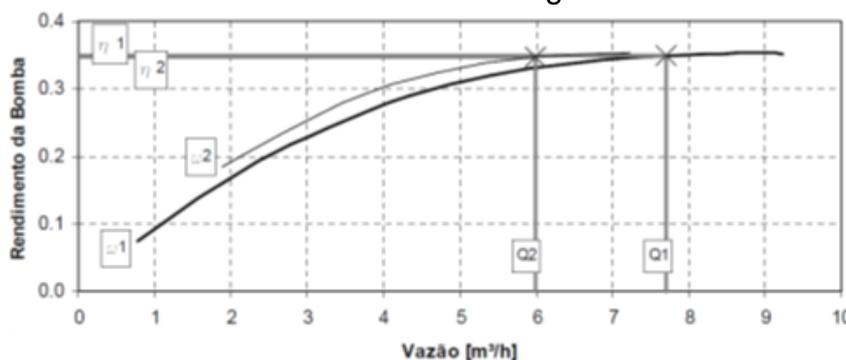
Fonte: Schmidlin Júnior (2006)

Figura 8 – Exemplo da variação de potência mecânica com a variação da rotação da bomba centrífuga



Fonte: Schmidlin Júnior (2006)

Figura 9 – Exemplo da variação da curva de rendimento com a variação da rotação da bomba centrífuga



Fonte: Schmidlin Júnior (2006)

Para que a relação de potência, indicada na equação (10) seja válida, supõe-se que o rendimento da máquina permanecesse constante. Entretanto, Macintyre (1997) afirma que ensaios revelam que o rendimento diminuirá modificando-se a rotação da bomba para um valor diferente de funcionamento do que o previsto em projeto. A equação (11) assume um valor de rendimento  $\eta_2$  para o novo estado de funcionamento.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^3 \times \frac{\eta_1}{\eta_2} \quad (11)$$

Sendo:

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \times \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^{0,1} \quad (12)$$

As equações (8), (9), (10), (11) e (12) permitem que se possa traçar com certa aproximação as curvas características das bombas centrífugas em função do número de rotação. No entanto, na prática, estas bombas são ensaiadas em laboratório para um traçado mais exato dessas curvas.

### **2.3.4 Associação de bombas centrífugas**

Em diversas aplicações, o campo de variação da vazão ou altura manométrica pode ser excessivamente amplo para ser abrangido por uma única bomba, mesmo variando a sua velocidade (MACINTYRE, 1997). Por este motivo, recorre-se à associação de bombas em série ou em paralelo, visando à redução de custos do projeto, ao aumento de segurança de operação ou à flexibilidade do processo de manutenção.

#### *2.3.4.1 Associação de bombas em série*

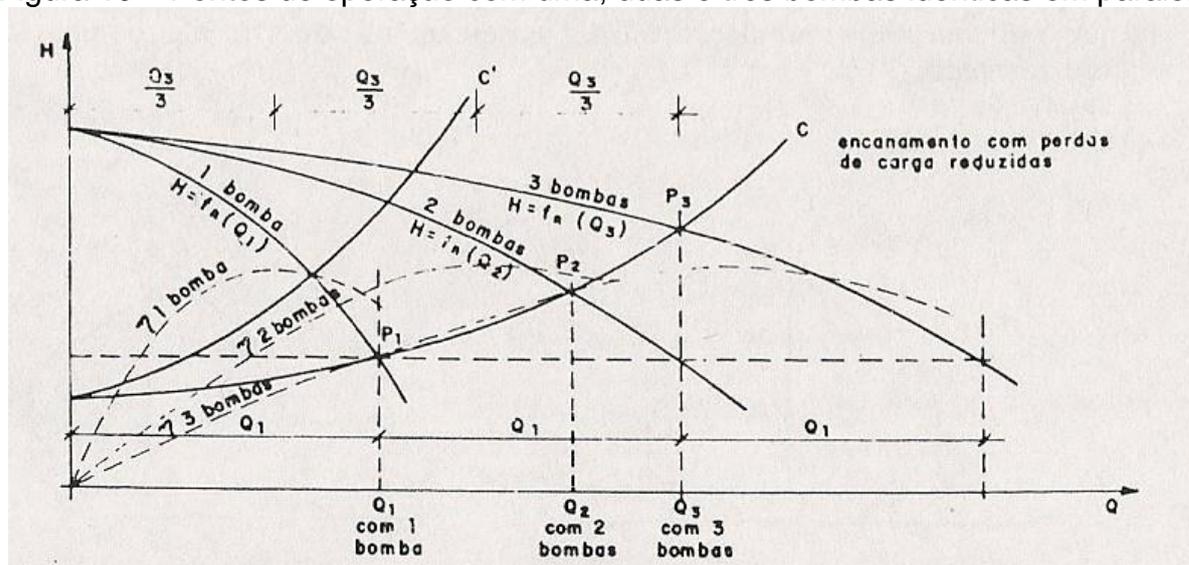
Segundo Henn (2006), por meio de bombas ligadas em série, têm-se a mesma vazão, enquanto se proporciona uma altura manométrica total representada pela soma das alturas manométricas individuais das bombas. Este tipo de sistema é empregado em bombas de múltiplos rotores, bombas submersas de poços artesianos ou ainda em processos em que haja condições de pressão bastante diversas ao longo do tempo. Por não se tratar do objeto de estudo desse trabalho, não será dado maior enfoque neste tipo de associação e para um maior aprofundamento sobre o assunto, deve-se consultar a literatura corrente (Henn, 2006 e Macintyre, 1997).

#### *2.3.4.2 Associação de bombas em paralelo*

Consiste na ligação em paralelo das tubulações de recalque de modo tal que pela mesma tubulação escoam as descargas de duas ou mais bombas funcionando simultaneamente (MACINTYRE, 1997; PORTO, 2006). Neste sistema, conforme Henn (2006), os valores de altura manométrica permanecerão iguais enquanto o valor de vazão total do sistema corresponderá à soma das vazões individuais de cada uma das bombas.

Além disso, Macintyre (1997) e Porto (2006) afirmam que, se não houvesse perdas de carga no sistema, a vazão do sistema com duas bombas seria o dobro da vazão com uma única bomba. No entanto, em situações reais, conforme mostra a Figura 10 onde é traçada uma curva de perda de carga do sistema, o valor de vazão com duas bombas é menor que o dobro da fornecida por uma só bomba, e a resultante do funcionamento de três bombas tem um valor ainda mais baixo que o triplo do correspondente a uma bomba.

Figura 10 – Pontos de operação com uma, duas e três bombas idênticas em paralelo



Fonte: Macintyre (1997)

Pela Figura 10, pode-se perceber que quanto maior for a perda de carga do sistema, menor será o aumento da descarga (vazão de bombeamento) causado pela associação em paralelo. Por essa razão, deve-se estudar com atenção um sistema com bombas trabalhando em paralelo, para se evitar que elas trabalhem com valores de descargas muito abaixo de seu valor nominal, o que causará cavitação, aquecimento excessivo e baixa eficiência (MACINTYRE, 1997).

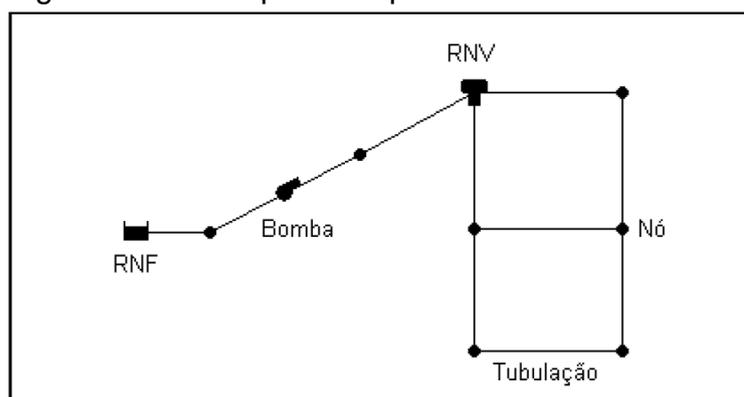
## 2.4 SIMULADOR HIDRÁULICO EPANET 2.0

Simuladores hidráulicos são ferramentas computacionais capazes de gerar modelos de sistemas de qualidade, transporte e distribuição de água. Estes *softwares* estão sendo cada vez mais utilizados pelas empresas de saneamento para fins de planejamento, projeto e diagnóstico do funcionamento dos sistemas.

Atualmente, existem diversos simuladores no mercado, dentre eles pode-se citar WaterCAD, Mike Net, Finesse e o Epanet. Este último, desenvolvido por Lewis A. Rossman da *U. S. Environmental Protection Agency* (US EPA), dos Estados Unidos, é um dos simuladores mais utilizados no mundo por entidades gestoras, investigadores e acadêmicos. Esse programa foi traduzido recentemente para o português pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS), da Universidade Federal da Paraíba – Brasil (GOMES e SALVINO, 2007).

O Epanet 2.0 é um *software* livre, que permite a simulação do comportamento hidráulico e da qualidade da água de sistemas de distribuição. Com uso deste programa, é possível obter os valores de parâmetros importantes, tais como: vazões, pressões, nível da água nos reservatórios, concentração de elementos químicos, dentre outros. O Epanet 2.0 também é capaz de calcular as perdas de carga por atrito através das fórmulas de Hazen-Williams e Darcy-Weisbach; perdas de cargas localizadas; simulação de bombas, com velocidade de rotação fixa ou variável; e a energia de bombeamento e o seu respectivo custo. Além disso, o *software* modela os principais tipos de válvulas, reservatórios de nível fixo ou variável; possibilita a simulação com diversas regras de operação do sistema, dentre outras funções (BARROSO, 2005; GIROL, 2008; SALVINO, 2009). A Figura 11 ilustra os principais componentes físicos do EPANET.

Figura 11 – Principais componentes do EPANET 2.0



Fonte: Girol (2008)

Conforme Gomes e Salvino (2007), os termos da Figura 11 podem ser definidos conforme segue: a) Reservatório de Nível Fixo (RNF): são nós especiais que representam um volume de armazenamento de água, de capacidade ilimitada. São utilizados para simular locais de captação de água; b) Reservatório de Nível

Variado (RNV): são também nós especiais da rede, possuindo uma capacidade de armazenamento limitada, podendo variar o volume de água armazenada ao longo da simulação; c) Bomba: são dispositivos que recalcam água de um ponto com cota menor para outro de cota maior; d) Nós: são os pontos da rede onde os trechos se ligam entre si e onde a água entra e sai da rede. É nos nós que se representa o consumo de uma determinada área de influência dentro da rede; e) Tubulação: são trechos que carregam água sob pressão durante a simulação.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo hidráulico já existente para o sistema de abastecimento da região Santa Fé / Caxias do Sul, o qual foi gerado no *software* Epanet 2.0. O referido modelo serviu de base para as análises de melhorias visando à eficiência energética.

## 2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SANEAMENTO

Em todo o mundo, no setor de saneamento básico, principalmente nos segmentos de sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, ocorrem perdas significativas de energia e água (GOMES, 2005). De acordo com a Eletrobrás (2006), mais de dois por cento do consumo total de energia elétrica do Brasil, o equivalente a sete bilhões de kWh/ano, são consumidos por prestadores de serviços de água e esgotamento sanitário. Este consumo refere-se aos diversos usos nos processos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, com destaque para os equipamentos utilizados em estações elevatórias (motores elétricos e bombas centrifugas), que são, normalmente, responsáveis por 90% do consumo destas instalações.

Nos últimos dez anos, principalmente devido à criação do PROCEL-SANEAR, tem-se desenvolvido diversos trabalhos na área de eficiência energética voltados ao setor de saneamento. Dentre eles, pode-se citar os trabalhos de:

- Arenhardt (2008), Lorenzi (2009) e DeBenedictis (2013), nos quais foram analisadas as reduções do consumo de energia elétrica em estações elevatórias de água através do uso de variadores de frequência.
- Eleotero (2008), que efetuou um estudo objetivando a diminuição dos custos de energia elétrica, em sistemas de bombeamento a partir do

desligamento de estações elevatórias no horário de ponta estabelecido pela concessionária, favorecendo-se assim das tarifas horo-sazonais.

- Guimarães (2008), Schmidlin Júnior (2006), Souza (2008) e Polezi (2010), cujos trabalhos compararam o desempenho elétrico, mecânico e hidráulico, sob o enfoque da eficiência energética, de sistemas de bombeamento controlados por válvulas de estrangulamento ou por inversores de frequência.
- Machado (2007), que realizou análises de viabilidade técnico-econômica para implementação de medidas de eficiência do uso de energia elétrica as quais incluíam: substituição dos motores tipo standard por motores de alto rendimento; readequação das potências dos motores elétricos e uso de inversores de frequência no controle de vazão através de controle de velocidade.

Além disso, segundo Gomes (2005), normalmente, os desperdícios de energia elétrica nos sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário são decorrentes de fatores como: a) formas contratuais indevidas; b) procedimentos operacionais inadequados; c) desperdícios de água; d) mau dimensionamento de sistemas; e) idade avançada dos equipamentos; f) tecnologias mal utilizadas; g) erros de concepção dos projetos; e h) manutenções precárias.

Gomes (2005) e Tsutiya (2004) afirmam que as medidas de eficiência energética em sistemas de saneamento podem ser divididas em ações administrativas e operacionais. As administrativas compreendem a primeira fase de medidas a serem tomadas e praticamente não envolvem custos para serem implantadas. São ações relativas aos contratos existentes com as concessionárias de energia elétrica e podem ser resumidas em: a) correção da classe de faturamento; b) regularização da demanda contratada; c) alteração da estrutura tarifária; d) desativação das instalações sem utilização; e) conferência de leitura da conta de energia elétrica; e f) entendimentos com as companhias energéticas para redução de tarifas.

Já as medidas operacionais, que correspondem a uma segunda fase do programa de eficiência energética, dizem respeito a ações de engenharia, conforme mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Ações de engenharia para diminuição de perdas de energia

<b>Melhorias</b>	<b>Intervenções</b>
Ajuste dos equipamentos	Correção do fator de potência
	Alteração da tensão de alimentação
Diminuição da potência dos equipamentos	Melhoria no rendimento dos conjuntos de bombeamento
	Redução das perdas de carga nas tubulações
	Melhoria do fator de carga nas instalações
	Redução do índice de perdas de água
Controle operacional e automação do sistema de abastecimento de água	Uso racional da água
	Alteração no sistema de bombeamento e reservação
	Utilização de inversor de frequência
Alternativas para geração de energia elétrica	Alteração nos procedimentos operacionais de ETAs
	Aproveitamento de potenciais energéticos
Redução da altura manométrica	Uso de geradores no horário de ponta
	Redução da altura geométrica
Redução no volume de água distribuído	Redução das perdas de carga nas tubulações
	Controle de perdas de água
	Uso racional da água

Fonte: Gomes (2005)

Diversas ações propostas no quadro 1 referem-se ao combate das perdas físicas de água, as quais ocorrem em todo o sistema de abastecimento e podem ser divididas em perdas decorrentes de vazamentos, provocados por deficiência nos equipamentos, envelhecimento de tubulações, etc., ou perdas aparentes ou comerciais, que decorrem de falhas nos equipamentos de medição (macro e micromedidores), erros no cadastro do sistema e fraudes nas ligações.

Por não se tratar diretamente do objeto de estudo desse trabalho e por se tratar de uma área que exigiria uma análise bastante aprofundada, não foi dado maior enfoque neste tipo de melhorias. Para mais detalhes, ver Barroso (2005) e Girol (2008).

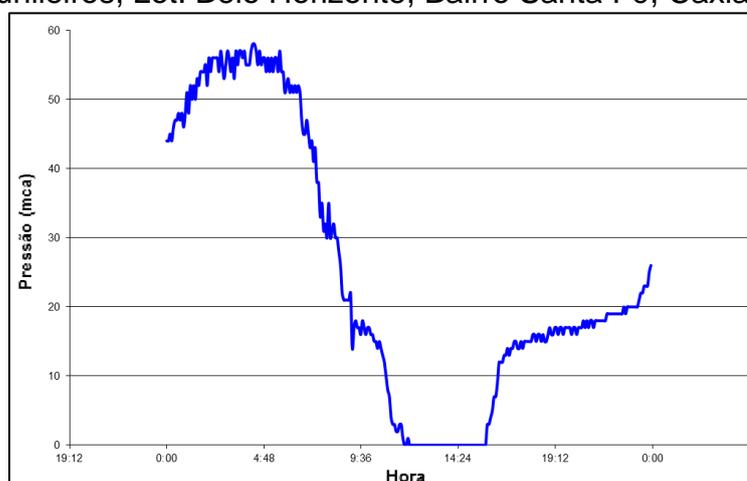
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Nas últimas duas décadas, conforme dados dos Censos de 1991, 2000 e 2010 do IBGE, Caxias do Sul teve um crescimento populacional médio de 7514 habitantes por ano, o que remete a mais 626 habitantes por mês. Complementarmente, segundo dados do SAMAE, são efetuadas mensalmente cerca de 320 novas ligações de água na cidade Caxias do Sul. Estimando-se um consumo *per capita* de 200 L/hab.dia (TSUTYIA, 2004), o consumo de água na cidade de Caxias do Sul cresce cerca de 3756 m<sup>3</sup>/mês. Devido a este rápido e desordenado crescimento, tem-se verificado problemas de abastecimento de água em algumas regiões, principalmente em horários e dias de pico de consumo. Uma dessas regiões, a qual foi objeto de estudo desse trabalho, é a zona norte de Caxias do Sul – RS que compreende os bairros/loteamentos Santa Fé, Belo Horizonte, Canyon, Brandalise, Centenário, Parque Oásis, Altos da Maestra, dentre outros.

A Figura 12 apresenta um gráfico de medição de pressão efetuado no dia 06/04/2013 (Sábado) na Rua dos Funileiros, Loteamento Belo Horizonte, Bairro Santa Fé. Pode-se perceber nesta figura que, durante o período das 11h00 às 16h00 deste dia, a pressão chegou a valores muito próximos a zero, demonstrando que esta região do bairro não estava sendo abastecida. Além disso, pode-se observar que no período da madrugada (das 01h00 às 05h00) há valores de pressão acima do limite de 50 mca, que é estabelecido pela norma NBR 12218:1994.

Figura 12 – Gráfico de medição de pressão efetuado no dia 06/04/2013 (Sábado) na Rua dos Funileiros, Lot. Belo Horizonte, Bairro Santa Fé, Caxias do Sul RS



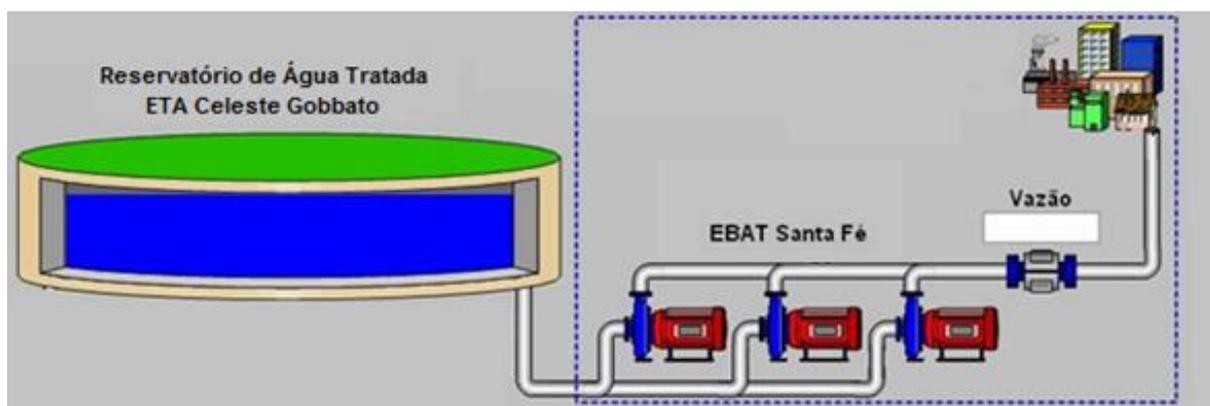
Fonte: o autor.

A elevada variação de pressão ocorrida neste ponto do sistema, onde durante o horário de maior consumo a região não está sendo abastecida e durante a madrugada há excesso de pressão, também pode ser observada em outros pontos da zona norte de Caxias do Sul. Tal situação demonstra o mau dimensionamento do sistema de bombeamento desta região, pois este não consegue suprir os picos de consumo e durante a noite há um elevado desperdício de energia.

### 3.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Responsável pelo abastecimento de água de grande parte da zona norte de Caxias do Sul, a Estação de Bombeamento de Água Tratada - EBAT Santa Fé, localizada na ETA Celeste Gobbato, foi a estação elevatória objeto de estudo deste trabalho. A Figura 13 apresenta um esquema de funcionamento desta estação.

Figura 13 – Esquema de funcionamento da EBAT Santa Fé



Fonte: o autor.

Como se pode perceber na Figura 13, este sistema possuía três grupos motobombas (GMB) operando em paralelo, 24 horas por dia e sem nenhum tipo de controle, o que faz com que a bomba opere em diversos pontos de sua curva de desempenho, visto que o consumo de água é variável conforme o período do dia. Neste sistema, as bombas encontram-se trabalhando “afogadas” e succionam água de um reservatório à montante (localizado dentro da própria ETA).

No Tabela 3 são apresentados os principais dados dos três conjuntos instalados na EBAT Santa Fé. Nesta tabela pode-se perceber que, mesmo sendo bombas idênticas, o método de acionamento difere uma da outra. Tal situação ocorre devido à necessidade atual de se utilizar todos os conjuntos funcionando em

paralelo. Anteriormente, eram utilizados apenas os GMB 01 e 02, onde o primeiro, com inversor, trabalhava ininterruptamente modulando a pressão do sistema, e o segundo, com *soft starter*, trabalhava durante algumas horas do dia. O GMB 03 era utilizado apenas em paradas de manutenção de um dos dois primeiros conjuntos.

Tabela 3 – Principais dados dos equipamentos instalados na EBAT Santa Fé

<b>GMB</b>	<b>Marca/Modelo Bomba</b>	<b>Marca/Carcaça Motor</b>	<b>Potência de Acionamento</b>	<b>Método de Acionamento</b>
01	Imbil / ITAP 100-200	WEG / 225S/M	60 CV	Inversor de frequência
02	Imbil / ITAP 100-200	WEG / 225S/M	60 CV	<i>Soft Starter</i>
03	Imbil / ITAP 100-200	Arno / 200L	60 CV	Partida Direta

Fonte: o autor.

Na Figura 14 são mostrados os equipamentos citados no Tabela 3.

Figura 14 – De cima para baixo: GMB 02, GMB 03 e GMB 01 da EBAT Santa Fé



Fonte: o autor.

Complementarmente, encontram-se em funcionamento, dentro da região abastecida pelo sistema Santa Fé, cinco bombas do tipo *booster*<sup>3</sup>, as quais tem a função de abastecer alguns pontos críticos da referida região. São elas: EBAT Belo

<sup>3</sup> Estação pressurizadora ou *booster*, segundo Tsutiya (2006), são bombas centrifugas instaladas em uma tubulação com o objetivo de aumentar a pressão à jusante, auxiliando o escoamento e procurando manter a pressão constante em toda a rede de distribuição de água, independentemente das variações de consumo ocorridas ao longo do dia.

Horizonte, EBAT Parque Oásis, EBAT Av. Santa Fé, EBAT Centenário e EBAT Brandalise. Estas estações não entraram no escopo de estudo de melhorias deste trabalho, servindo, portanto, apenas como suporte para eventuais medições em campo.

### 3.3 DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Para a execução das medições em campo foram utilizados os instrumentos descritos abaixo.

#### 3.3.1 Manômetro digital

Para a medição da carga transferida da bomba ao fluido, fez-se uso de dois manômetros digitais, ambos fabricados pela empresa Gulton, modelo GULpress 1000, faixa de medição 0 a 100 mca, sendo um montado na tubulação de recalque e outro na de sucção da bomba. Estes instrumentos foram utilizados no ensaio de desempenho de cada um dos GMB, com o objetivo de se obter as suas curvas características. A Figura 15 ilustra uma foto dos manômetros utilizados.

Figura 15 – Manômetro de 0 a 100 mca da marca Gulton, modelo Gulpress 1000



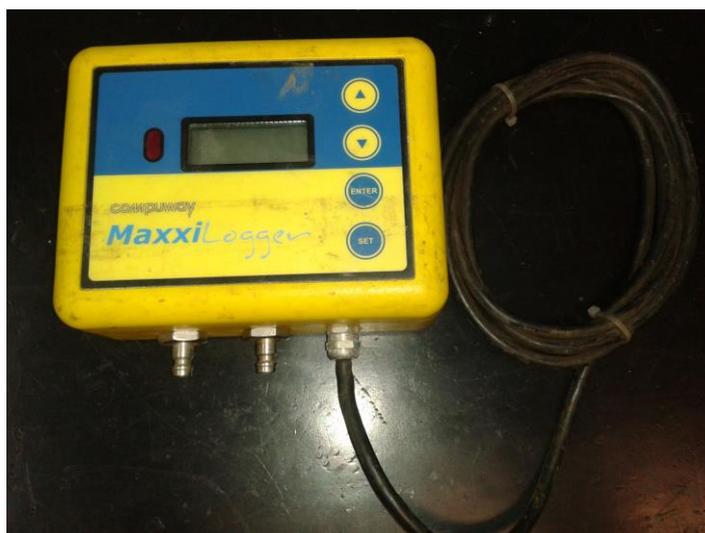
Fonte: o autor.

#### 3.3.2 Registrador de pressão (*data loggers*)

Com o objetivo de registrar ao longo do tempo os valores de pressão de sucção e recalque do sistema de bombeamento, fez-se uso de registradores de pressão que, conforme um intervalo de tempo pré-estabelecido, armazenam em sua

memória os valores lidos. O registrador de pressão utilizado neste trabalho foi o equipamento da marca Compuway, modelo MaxxiLogger, o qual possui as seguintes características: faixa de medição de 0-200 mca, exatidão de 0,25%, memória para 600 mil dados e dois pontos para medição simultânea de pressão. A Figura 16 mostra uma foto do registrador empregado.

Figura 16 – Registrador de pressão da marca Compuway, modelo MaxxiLogger



Fonte: o autor

### 3.3.3 Medidor de vazão eletromagnético

Para a medição de vazão de saída do bombeamento encontra-se instalado, na tubulação de recalque, um medidor de vazão eletromagnético da marca Conaut-Krohne, modelo Optiflux KC2000F-6. Este medidor possui um diâmetro nominal (DN) de 300 mm, faixa de medição de 0,3 a 12 m/s e exatidão de 0,5%, devendo ser instalado em um trecho reto de no mínimo 5 vezes o DN à montante e 2 vezes o DN à jusante.

O princípio de funcionamento deste tipo de medidor baseia-se na lei de Faraday, onde uma tensão induzida é gerada por um condutor (neste caso a água) em movimento em um campo magnético. Este tipo de sensor possui um par de bobinas magnéticas situadas em volta do tubo, onde um ou mais pares de eletrodos encontram-se em contato com o fluido. Sendo conhecidas a densidade do fluido e a distância entre os eletrodos, a tensão que se forma entre os mesmos é diretamente proporcional à velocidade do fluido (GOMES, 2007).

As Figuras 17 e 18 apresentam, respectivamente, o medidor de vazão instalado na tubulação de recalque da EBAT Santa Fé e o conversor de sinais que efetua a leitura dos valores de vazão do referido medidor.

Figura 17 – Medidor de vazão eletromagnético da marca Conaut-Krohne instalado na tubulação de recalque da EBAT Santa Fé



Fonte: o autor.

Figura 18 – Conversor de sinais do medidor de vazão eletromagnético



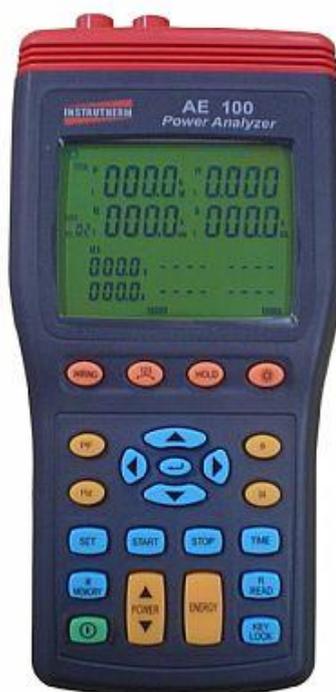
Fonte: o autor.

### 3.3.4 Analisador de energia

Com o intuito de efetuar medições das principais grandezas elétricas de um sistema de bombeamento (tensão, corrente, potência e fator de potência), foi utilizado neste trabalho um analisador de energia digital portátil da marca Instrutherm, modelo AE-100, apresentado na Figura 19. Este instrumento de medição possui quatro sensores de corrente e quatro de tensão (ambos para medição das três fases e do neutro); exatidão de  $\pm 0,3\%$  para leitura de tensão e  $\pm 0,5\%$  para a de corrente.

Além da medição instantânea das grandezas citadas, este equipamento também é um registrador de dados, armazenando em sua memória os valores lidos ao longo do tempo.

Figura 19 – Analisador de energia da marca Instrutherm, modelo AE 100



Fonte: Instrutherm (2013)

## 3.4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Neste trabalho, devido à defasagem tecnológica dos conjuntos motobombas instalados na EBAT Santa Fé, que estão operando nas mesmas condições há mais de quinze anos, e aos problemas de abastecimento ocorridos em determinados dias

e horários de alto consumo, foram avaliadas duas melhorias: 1) troca do sistema de bombeamento; 2) variação de velocidade de rotação do sistema de bombeamento visando manter a pressão do sistema constante. É importante ressaltar que outras melhorias poderiam ser propostas, no entanto, as mesmas tornariam o trabalho bastante extenso.

### 3.4.1 Troca do sistema de bombeamento

Inicialmente, foram feitas medições das condições atuais de trabalho dos conjuntos motobombas, onde foram monitoradas as principais variáveis do processo: pressões de recalque e sucção, vazão de saída do bombeamento, potência consumida, rendimento e corrente do motor. Para obtenção dos valores de rendimento fez-se uso da equação (13), a qual é a razão entre a potência útil dada pela equação (7) e potência de eixo fornecida pelo motor.

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{eixo}}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P_{\text{eixo}}} \quad (13)$$

Onde  $\eta$  é o rendimento da bomba;  $P$  é a potência hidráulica, em watts;  $P_{\text{eixo}}$  é a potência de eixo fornecida pelo motor, em watts;  $\gamma$  é o peso específico do fluido, em N/m<sup>3</sup>;  $Q$  é a vazão, em m<sup>3</sup>/s; e  $H$  é a altura de coluna fluida, em m.

Todas as medições que foram efetuadas serviram de base para analisar uma possível troca do sistema de bombeamento. Nesta possível troca, foram utilizados como fator de decisão os seguintes aspectos:

- a) pontos de trabalho da bomba ao longo do dia;
- b) projeção de crescimento do consumo de água deste sistema para os próximos dez anos;
- c) escolha da bomba com melhores valores de rendimento para os pontos de trabalho do sistema e que se adeque aos valores de NPSH disponíveis no sistema;
- d) verificação da melhor condição de funcionamento do sistema: com somente uma bomba ou duas em paralelo;
- e) comparação das curvas de trabalho dos modelos de bombas atual e a serem analisados.

Com o propósito de simular os resultados obtidos, inseriu-se a nova bomba escolhida no modelo hidráulico elaborado no *software* Epanet, onde se pode observar o comportamento hidráulico do sistema Santa Fé, estimando as melhorias no abastecimento ocasionadas por este novo equipamento.

### **3.4.2 Utilização do inversor de frequência para variação da velocidade de rotação do sistema de bombeamento**

Por se tratar de um sistema de pressurização que trabalha sem reservatório à jusante, a variação do ponto de trabalho do conjunto de bombeamento Santa Fé ocorre conforme o consumo de água; ou seja, em horários de maior ou menor consumo do dia a bomba trabalhará em um ponto ou outro de sua curva. Esta variação de pontos de trabalho faz com que ocorra uma variação na pressão de saída do bombeamento e, conseqüentemente, uma variação na pressão de todo sistema. Esta variação de pressão ocorrida ao longo do dia, além dos possíveis danos que pode causar à tubulação, acarretará um elevado desperdício de energia em horários de menor consumo, conforme visto na Figura 12.

Por este motivo, foram avaliados os ganhos que o inversor de frequência trará para o sistema de bombeamento, visto que, com o uso deste equipamento será possível efetuar o controle da velocidade de rotação do sistema de bombeamento através da leitura dos valores de pressão. Com isso, foi analisado através de simulação computacional (Epanet) o comportamento do sistema controlando a pressão de saída do bombeamento.

### **3.4.3 Análise de viabilidade econômica das melhorias propostas**

Conforme Gomes (2005), os bancos e entidades de fomento que financiam projetos em eficiência energética e hidráulica normalmente estabelecem critérios ou parâmetros econômicos que deverão ser empregados na elaboração das propostas de financiamento. Para este trabalho, utilizando os critérios do PROCEL Sanear, foram adotados os seguintes indicadores de viabilidade:

- Taxa Mínima de Atratividade (TMA): 15 % aa; e Vida útil do projeto: 10 anos
- Valor Presente Líquido (VPL): neste indicador, todos os custos e benefícios envolvidos no projeto, ao longo de seu alcance são transformados em valores presentes (instante zero). Segundo Gomes (2005), o VPL é dado pela equação (14),

considerando  $B'_j$  os benefícios líquidos (benefícios menos custos) ao longo de “n” períodos de tempo e a uma taxa de juros “i”. Sendo o VPL maior que zero, o projeto é considerado atrativo.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{B'_j}{(1+i)^j} \quad (14)$$

- Taxa Interna de Retorno (TIR): é a taxa de juros que zera o VPL do empreendimento, ou seja, é a taxa de desconto que zera o valor presente das receitas (benefícios) aos valores presentes dos custos de investimento e operação do projeto. Para calcular a TIR, também se utiliza a equação (14), onde o valor de VPL é igualado a zero e encontra-se a taxa de juros “i” que torna verdadeira esta igualdade. Caso o valor da TIR seja superior à TMA aplicada no projeto, considera-se o investimento atrativo.

- Tempo de Retorno do Capital – Descontado (TRC/Payback Descontado): é o número de períodos que zera o VPL do projeto, levando-se em consideração a taxa de juros e as parcelas incidentes no fluxo de caixa. A análise do TRC descontado está diretamente relacionada, também, com a duração da vida útil do projeto. Se o tempo de retorno do capital é superior ao período de vida útil do projeto, o investimento correspondente não será atrativo.

#### 3.4.4 Modelo hidráulico para o sistema Santa Fé

Devido à dificuldade com relação a prazos de implementação, não foram executadas fisicamente as melhorias avaliadas neste trabalho. Para fins de análise e validação, foi desenvolvido um modelo hidráulico do sistema de abastecimento Santa Fé no *software* Epanet 2.0. Este modelo foi concebido através de diversas informações do sistema, dentre as quais se pode citar: a) dados e traçado das redes de abastecimento (diâmetro, material, comprimento, cota geométrica, etc.); b) dados de consumo de cada quadra obtidos através do sistema comercial do SAMAE; e c) curvas de trabalho das bombas.

Com o objetivo de calibrar o modelo hidráulico para verificação de sua representação do sistema real, foram feitas medições simultâneas de pressão em nove pontos chave do sistema. Após alguns ajustes, o modelo gerado para o

o sistema Santa Fé foi considerado calibrado, ou seja, pode ser utilizado para análise das mudanças que foram propostas neste trabalho.

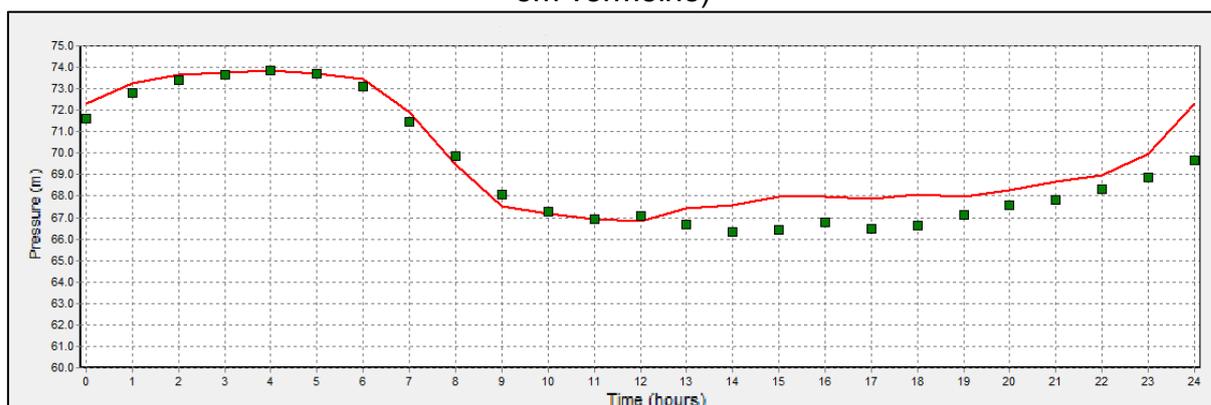
As Figuras 20 e 21 mostram, respectivamente, uma área do modelo hidráulico do sistema Santa Fé, onde as linhas pretas representam, no referido modelo, a área plotada do mapa de redes (quadras 5500, 5501 e 5502 do bairro Brandalise), e um gráfico de pressão da saída do bombeamento da EBAT Santa Fé demonstrando a aproximação do modelo com o sistema real.

Figura 20 – Área exemplificando modelo hidráulico gerado no Epanet para o Sistema Santa Fé



Fonte: o autor.

Figura 21 – Comparativo de pressão da saída do bombeamento da EBAT Santa Fé demonstrando o valor real (pontos em verde) e o valor gerado pelo Epanet (curva em vermelho)



Fonte: o autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

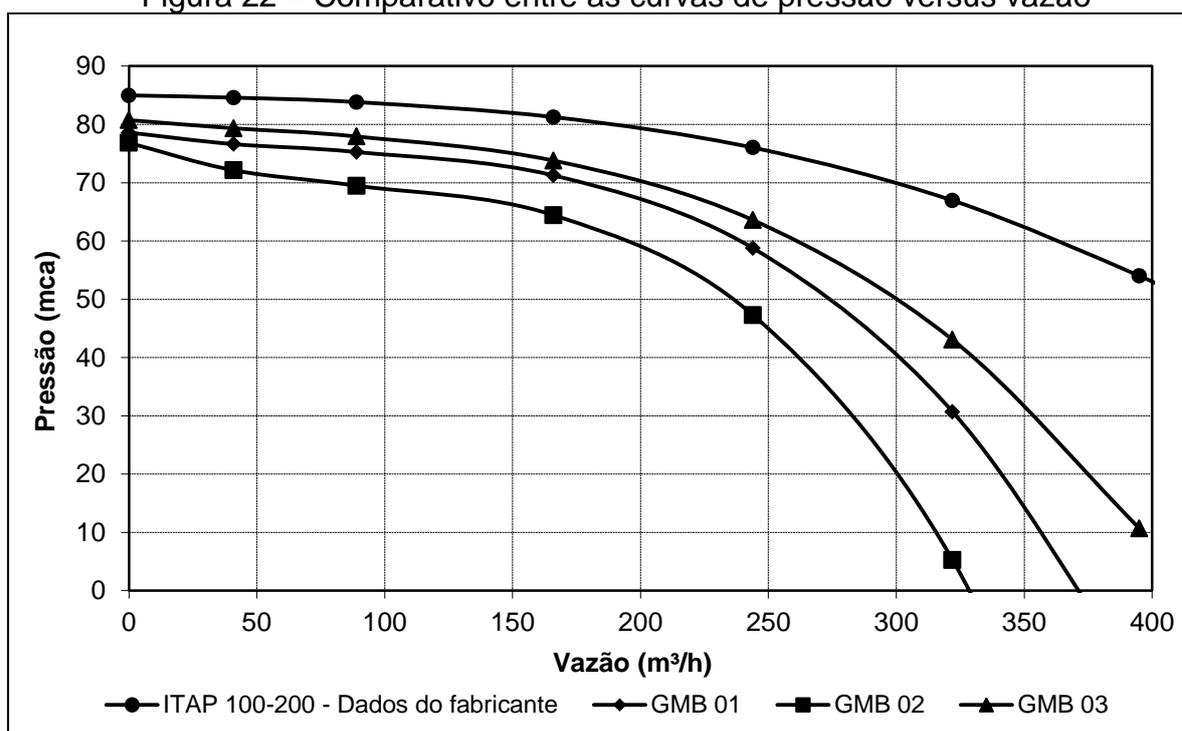
### 4.1 TROCA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO

#### 4.1.1 Curvas características reais das bombas centrífugas

No dia 05 de Setembro de 2013, foram efetuados seis ensaios de desempenho (dois ensaios por GMB) com objetivo de obter as curvas características individuais de cada bomba centrífuga. Nestas medições foram utilizados os instrumentos descritos no capítulo 3, onde se iniciou cada ensaio com a válvula de gaveta do recalque do GMB escolhido totalmente fechada, sendo então gradativamente aberta até 100%.

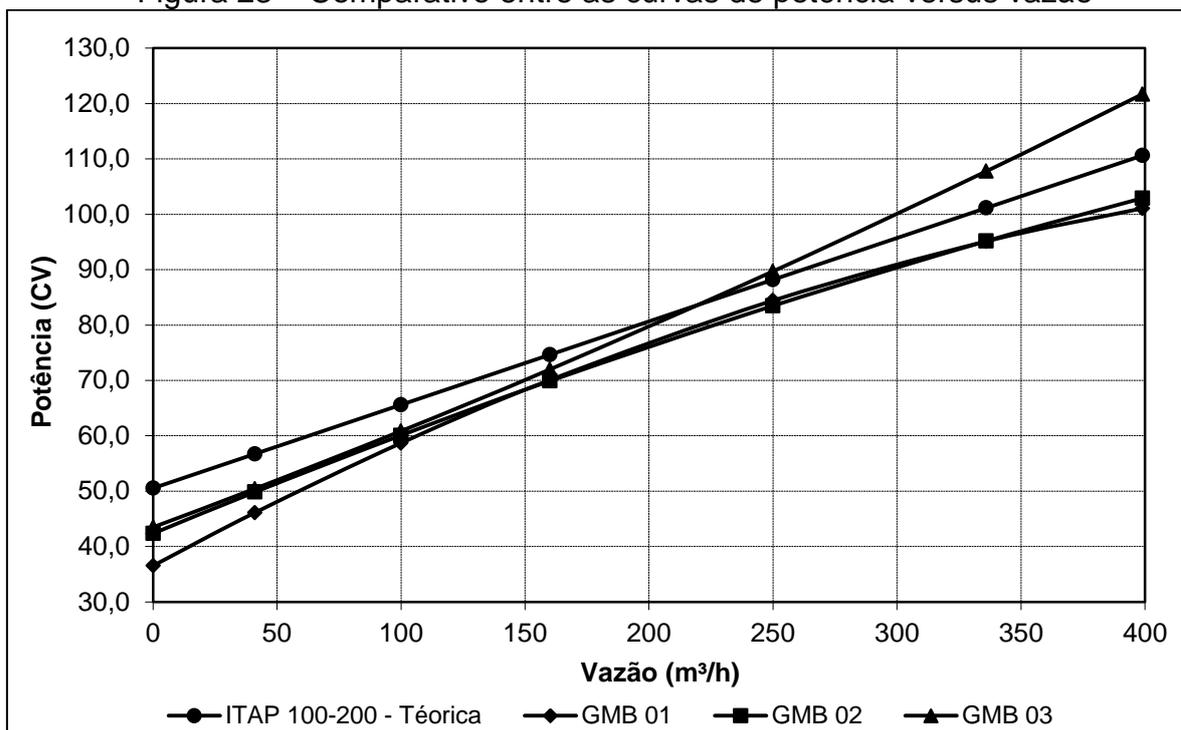
Para cada ponto de abertura da válvula de gaveta foram registrados os valores de vazão, pressões de recalque e de sucção, corrente do motor, tensão e potência consumida. Os resultados dos valores médios obtidos para cada bomba são mostrados nas Figuras 22, 23 e 24, onde também já são identificadas as curvas da bomba nova (dados do fabricante). Cabe ressaltar ainda que, para obtenção das curvas de rendimento, fez-se uso da equação (13).

Figura 22 – Comparativo entre as curvas de pressão versus vazão



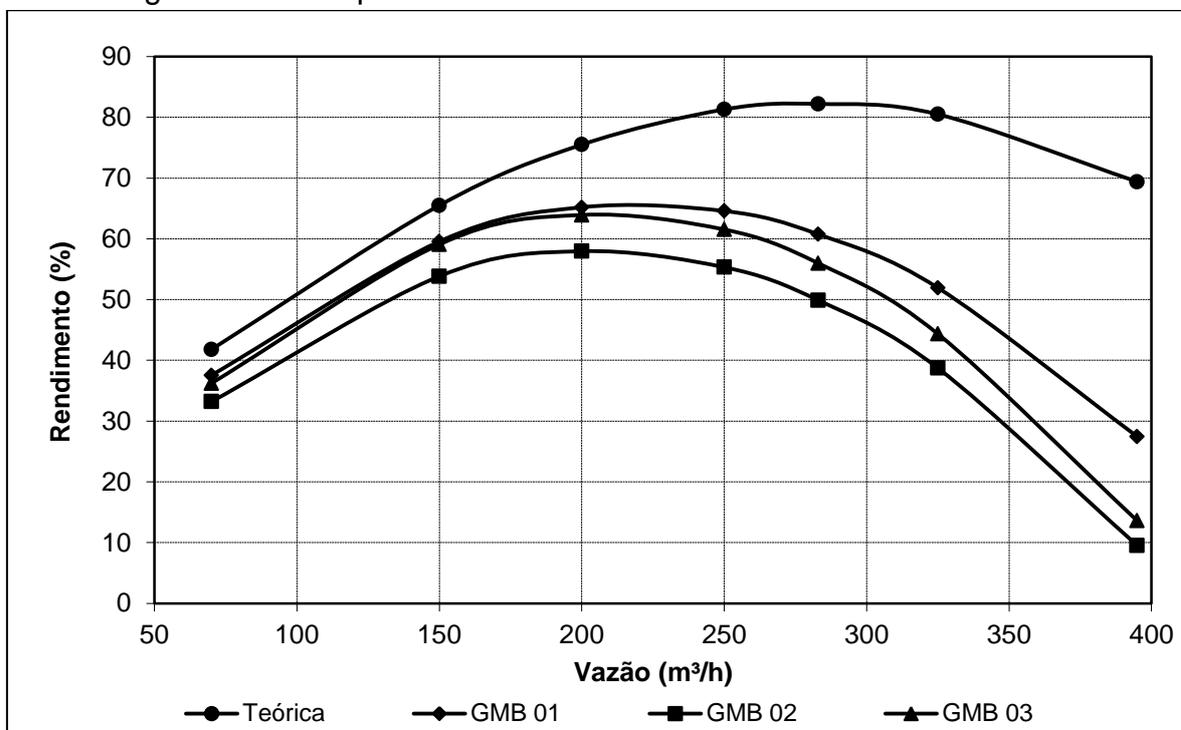
Fonte: o autor

Figura 23 – Comparativo entre as curvas de potência versus vazão



Fonte: o autor

Figura 24 – Comparativo entre as curvas de rendimento versus vazão



Fonte: o autor

Analisando os resultados apresentados nas Figuras 22, 23 e 24, comprova-se o acentuado grau de desgaste dos GMB instalados na EBAT Santa Fé e pode-se efetuar as seguintes considerações:

- Comparando-se as curvas dos três GMB instalados na EBAT Santa Fé com a curva da bomba nova fornecida pelo fabricante, verifica-se uma relevante diferença tanto em valores de carga (pressão) quanto de rendimento. Esta defasagem ocorre devido ao “envelhecimento” dos equipamentos, que é ocasionado pelo desgaste tanto do seu rotor quanto de seu sistema diretor (“caracol”). Para mais detalhes, ver Macintyre (1997) – p. 164 e 165;
- Efetuando uma comparação entre os resultados reais obtidos para os três GMB percebe-se que entre eles também há uma diferença de valores, a qual é explicada pelo tempo da última manutenção que cada equipamento recebeu. Segundo dados de controle do SAMAE, a BH 119 e BH 192 receberam manutenção nos últimos seis meses. Já a BH 190 recebeu manutenção há mais de dois anos e meio. Este fato demonstra que este último GMB está mais deteriorado que os outros, o que ocasiona esta maior diferença de curvas.

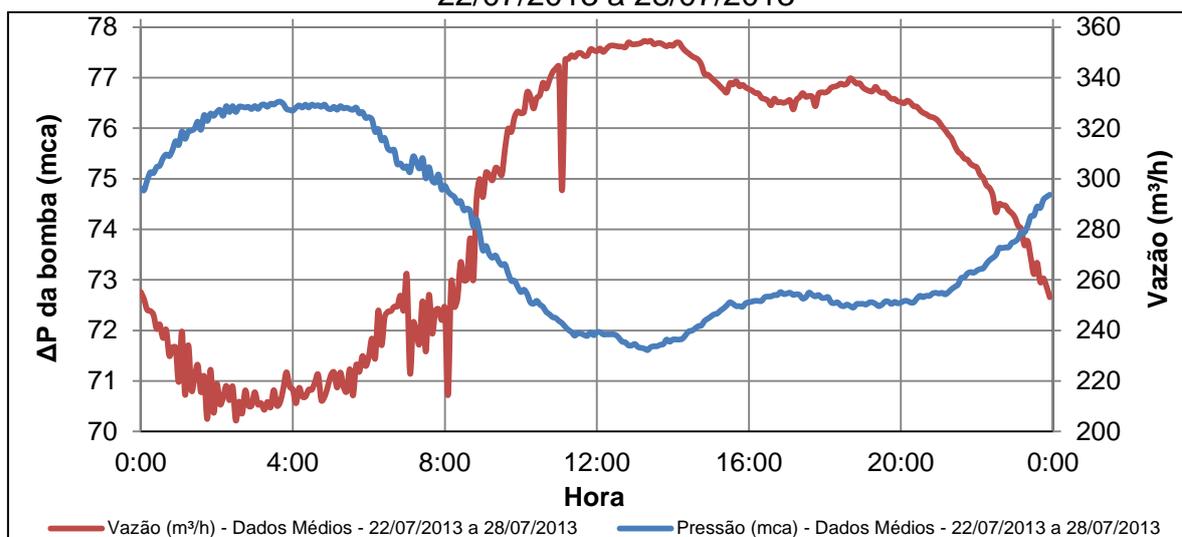
Devido à idade avançada dos equipamentos analisados, que é comprovada pela diferença entre as curvas reais e teóricas, se tornaria necessária a troca do rotor e do sistema diretor (“caracol”) de todos os três conjuntos de bombeamento. Esta intervenção, no entanto, não será considerada, pois, conforme será analisado a seguir, os valores de NPSH deste modelo de bomba são bastante elevados, o que certamente ocasionaria o fenômeno da cavitação nesta instalação.

#### **4.1.2 Medição dos pontos de trabalhos do sistema de bombeamento Santa Fé**

Com o objetivo de verificar quais os pontos de trabalho do bombeamento Santa Fé, utilizou-se o medidor de vazão eletromagnético e o registrador de pressão, descritos no capítulo anterior, para monitorar durante uma semana os valores de vazão, pressão de recalque e pressão de sucção deste sistema. O período escolhido para esta medição foi a semana entre os dias 22 e 28 de Julho de 2013, onde foram registrados valores a cada cinco minutos de medição. De posse

destes dados foram geradas as curvas apresentadas na Figura 25, onde as mesmas representam os valores médios registrados durante a semana para cada período do dia. Cabe ressaltar também que a curva de pressão representa o “acréscimo” de pressão fornecido pela bomba ao sistema, ou seja, a diferença entre a pressão de recalque e a pressão de sucção.

Figura 25 – Valores médios de pressão e vazão registrados durante o período de 22/07/2013 a 28/07/2013



Fonte: o autor

Analisando a Figura 25, verifica-se que o sistema de bombeamento Santa Fé opera entre os seguintes pontos de sua curva:

- Ponto mínimo de consumo (ocorrido durante a madrugada): Vazão: 204,3 m³/h – Pressão: 76,4 mca;
- Ponto máximo de consumo (ocorrido entre as 13h00min e 14h00min): Vazão: 354,6 m³/h – Pressão: 71,6 mca.

Além disso, percebe-se intermitências nos valores de vazão durante as 00h00min e as 08h00min. Este fato é explicado devido aos constantes desligamentos ocorridos durante a madrugada na bomba da EBAT Parque Oásis, que está localizada dentro do sistema Santa Fé e é controlada pelo nível de um reservatório, que quando atinge o nível máximo a bomba se desliga e quando atinge o nível mínimo a bomba liga-se novamente. Portanto, este funcionamento intermitente dessa EBAT causa uma operação oscilatória das três bombas da EBAT Santa Fé.

### 4.1.3 Planilha de análise hidráulica e elétrica

A fim de estimar os custos mensais com energia elétrica para o sistema de bombeamento Santa Fé bem como determinar o diagnóstico energético desta estação, foi desenvolvida uma planilha de cálculo que utilizou os dados abaixo.

- Medições de vazão, pressão de recalque e pressão de sucção, efetuadas entre os dias 22/07/2013 e 28/07/2013;
- Curvas características reais do bombeamento Santa Fé, onde foi utilizado o valor médio obtido entre as três bombas BH 119, BH 192 e BH 190;
- Curvas teóricas de NPSH requerido da bomba ITAP 100-200;
- Curvas teóricas de rendimento e fator de potência do motor elétrico utilizado;
- Dados teóricos de peso específico da água, pressão de vaporização da água e pressão atmosférica de modo a obter a altura máxima de sucção desta bomba sem que ocorra o fenômeno da cavitação;
- Tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária de energia elétrica.

Com base nestes dados, foram obtidos, para cada ponto de medição, o custo de energia elétrica teórico, o custo específico por volume de água bombeado e o fator de carga da instalação.

Para fins de validação da referida planilha, foi feita uma simulação do custo mensal teórico com energia elétrica gerado por ela comparando-se este valor com o valor real da conta de energia elétrica do período de 25 de Julho de 2013 a 27 de Agosto de 2013, que engloba parcialmente os dias das medições efetuadas. Os resultados obtidos foram os seguintes:

- valor real cobrado pela concessionária de energia elétrica: R\$ 15.263,30;
- valor teórico simulado pela planilha: R\$ 16.044,96;
- diferença: +5,12%.

Como os valores de custo mensal gerados pela planilha foram estimados com base em uma semana de medição, a diferença percentual entre os valores reais e os valores simulados foi considerada satisfatória. Para mais detalhes a respeito dos resultados da planilha de análise elétrica e hidráulica utilizada neste trabalho, ver Apêndice A.

#### 4.1.4 Análise comparativa para troca do sistema de bombeamento

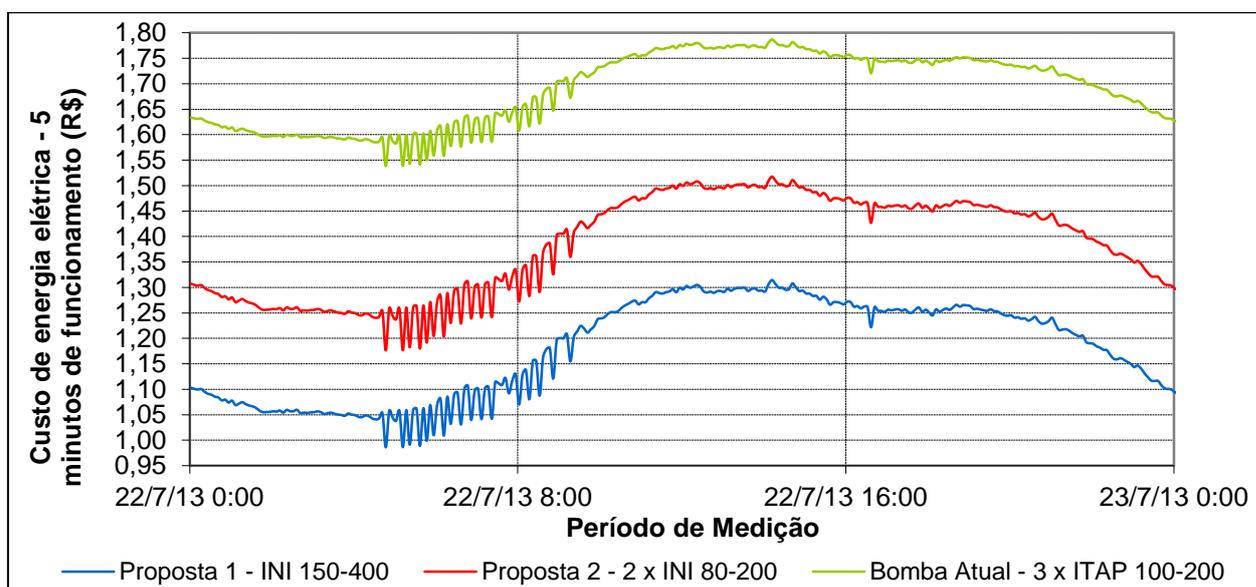
Utilizando como critérios de seleção os valores de rendimento apresentados pelos fabricantes, os pontos de trabalho mínimo e máximos atuais do sistema Santa Fé e também já estimando um aumento de 30% no consumo de água nesta região, de forma a compensar os problemas de abastecimento atuais bem como prever um aumento populacional para os próximos dez anos, foram escolhidas as duas opções de bombeamento abaixo:

- Proposta 1: Imbil – INI 150-400: utilizando apenas um sistema de bombeamento com um motor de potência nominal de 175 CV;
- Proposta 2: Imbil – INI 80-200: utilizando dois sistemas de bombeamento trabalhando em paralelo, com um motor de potência nominal de 100 CV para cada conjunto.

De forma análoga ao que foi feito com o conjunto atual de bombeamento do Santa Fé, também foram inseridos na planilha de análise hidráulica e elétrica todos os dados fornecidos pelo fabricante dos dois modelos de bomba citados acima.

Para a correta escolha do melhor sistema de bombeamento, foram comparados os resultados obtidos entre as duas opções citadas acima e o sistema atual. Os resultados econômicos são mostrados nas Figuras 26 e 27 e os demais resultados (tais como comparação de AMT, rendimento, potência de eixo, fator de carga, etc.) estão incluídos nos Apêndices B, C e D deste trabalho.

Figura 26 – Custo de energia para cada cinco minutos de funcionamento da bomba



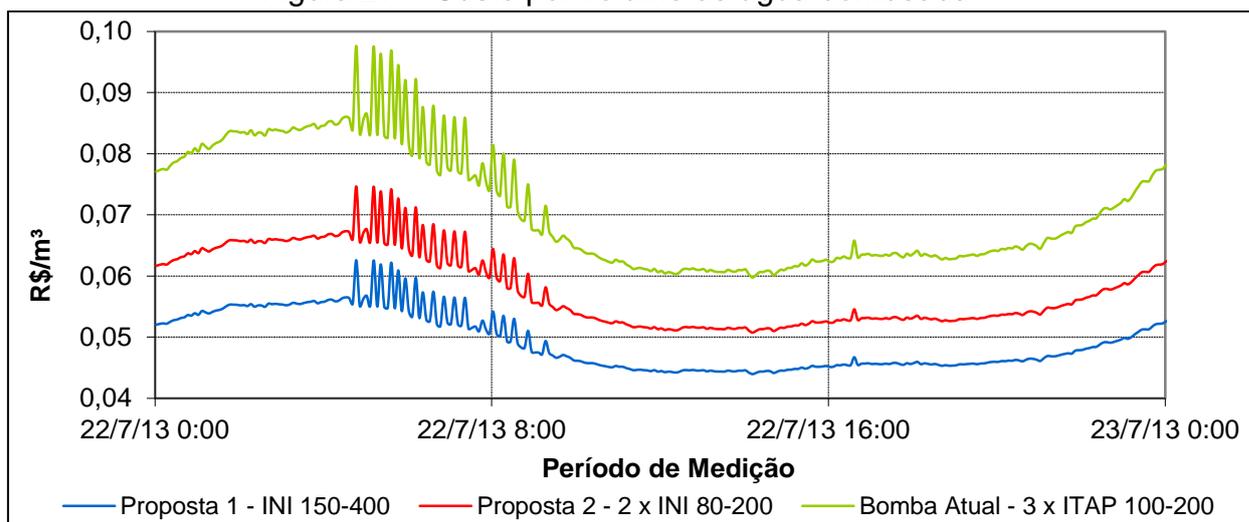
Fonte: o autor

Na Figura 26, foi selecionado o dia de medição 22/07/2013 e analisado o custo de energia elétrica para cada cinco minutos de funcionamento dos equipamentos. Este período de tempo foi escolhido por ser o mesmo valor que o intervalo das medições de vazão que foram registradas.

Nesta figura pode-se perceber que o equipamento com menor custo de funcionamento foi o da proposta 1, ou seja, a bomba INI 150-400, que apresentou um custo para cinco minutos de funcionamento entre R\$ 0,98 a R\$ 1,32. Já o sistema atual, apresentou um custo entre R\$ 1,55 a R\$ 1,78, ou seja, uma diferença média de 30% acima do valor da proposta 1.

De forma análoga à Figura 26, na Figura 27 foi analisado o custo por m<sup>3</sup> de água bombeada, onde também foi escolhido o dia 22/07/2013.

Figura 27 – Custo por volume de água bombeada



Fonte: o autor

Nesta figura também se verifica que a bomba mais eficiente, ou seja, a bomba que apresentou menor custo por volume de água bombeado foi a bomba INI 150-400, com um custo por m<sup>3</sup> variando ao longo do dia entre R\$ 0,044 e R\$ 0,063. Já o sistema atual teve um custo entre R\$ 0,060 e R\$ 0,098.

Por fim, foram inseridos os dados das duas propostas de bomba para simulação do custo mensal com energia elétrica e comparação com o valor fornecido para o sistema de bombeamento atual. Todos os resultados obtidos são mostrados no Quadro 2 que é apresentado a seguir.

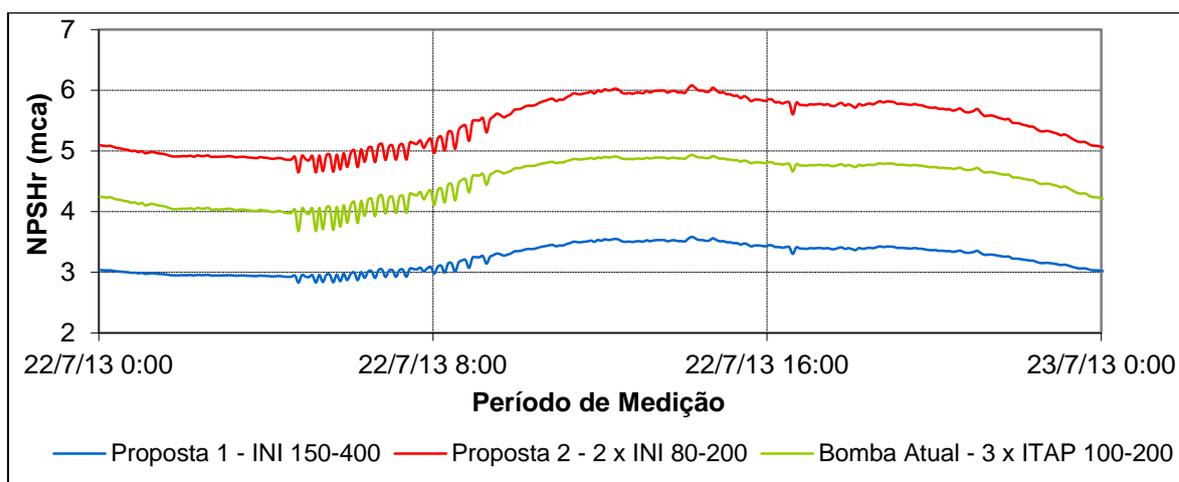
Quadro 2 – Comparativo entre a bomba atual e as duas propostas de substituição

	<b>Sistema Atual ITAP 100-200</b>	<b>Proposta 1 INI 150-400</b>	<b>Proposta 2 INI 80-200</b>
<b>Número de bombas operando em paralelo</b>	Três	Um	Duas
<b>Custo médio de energia para 5 minutos de funcionamento (R\$)</b>	1,688	1,180	1,382
<b>Custo médio por volume de água bombeado (R\$/m<sup>3</sup>)</b>	0,072	0,050	0,058
<b>Custo estimado mensal com energia elétrica</b>	R\$ 16.044,96	<b>R\$ 11.211,90</b>	R\$ 13.135,57

Fonte: o autor

Além dos resultados econômicos apresentados no Quadro 2, também foram considerados como fatores de escolha os valores de NPSH requeridos por cada modelo de bomba, os quais são comparados na Figura 28. Este parâmetro hidráulico é um fator determinante devido à baixa altura de sucção existente entre o reservatório a montante e a linha do eixo da bomba, que fica em torno de 2 a 2,5 metros abaixo do nível da água.

Figura 28 – Comparação dos valores de NPSH requeridos por cada bomba



Fonte: o autor.

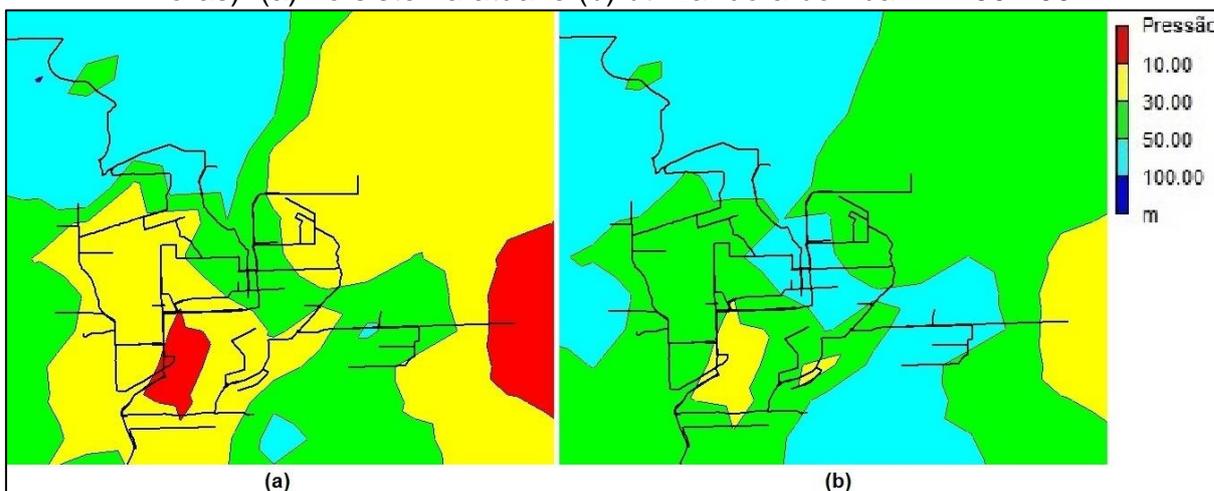
Analisando a Figura 28 verifica-se que a bomba INI 150-400 (Proposta 1), que já havia demonstrado os melhores resultados econômicos, também apresentou os valores mais baixos de NPSH, sendo o sistema de bombeamento escolhido para ser

simulado no *software* Epanet, onde serão verificadas as melhorias no abastecimento ocasionadas por este novo equipamento. Os resultados desta simulação são apresentados a seguir.

#### 4.1.5 Simulação da bomba INI 150-400 no *software* Epanet

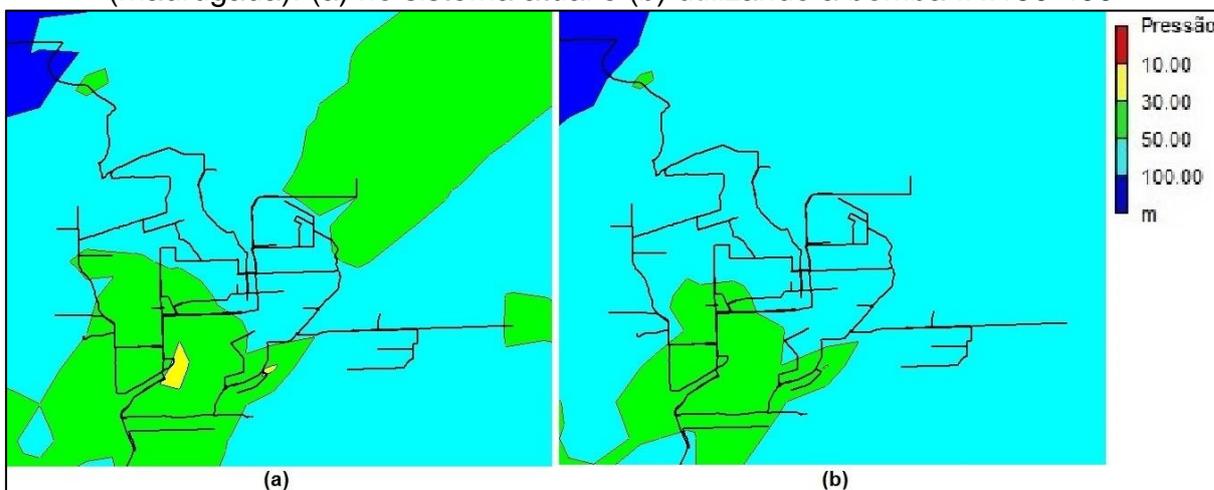
Nas Figuras 29 e 30 são apresentados os resultados das simulações efetuadas no Epanet no horário de maior e menor consumo, respectivamente.

Figura 29 – Simulação do sistema Santa Fé no horário de maior consumo (13 horas): (a) no sistema atual e (b) utilizando a bomba INI 150-400



Fonte: o autor

Figura 30 – Simulação do sistema Santa Fé no horário de menor consumo (madrugada): (a) no sistema atual e (b) utilizando a bomba INI150-400



Fonte: o autor

Nestas figuras foi comparada a situação geral do abastecimento do sistema Santa Fé, onde foram analisados valores de pressão de toda a malha de tubulações.

Nota-se que, no sistema atual, existem diversas regiões com problemas de abastecimento (regiões em vermelho), onde as pressões ficam abaixo do valor de 10 mca no horário de maior consumo. Já com a utilização da bomba INI 150-400, verifica-se uma melhora significativa nos valores de pressão e, conseqüentemente, são sanados os problemas de abastecimento.

## 4.2 UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DOS VALORES DE PRESSÃO

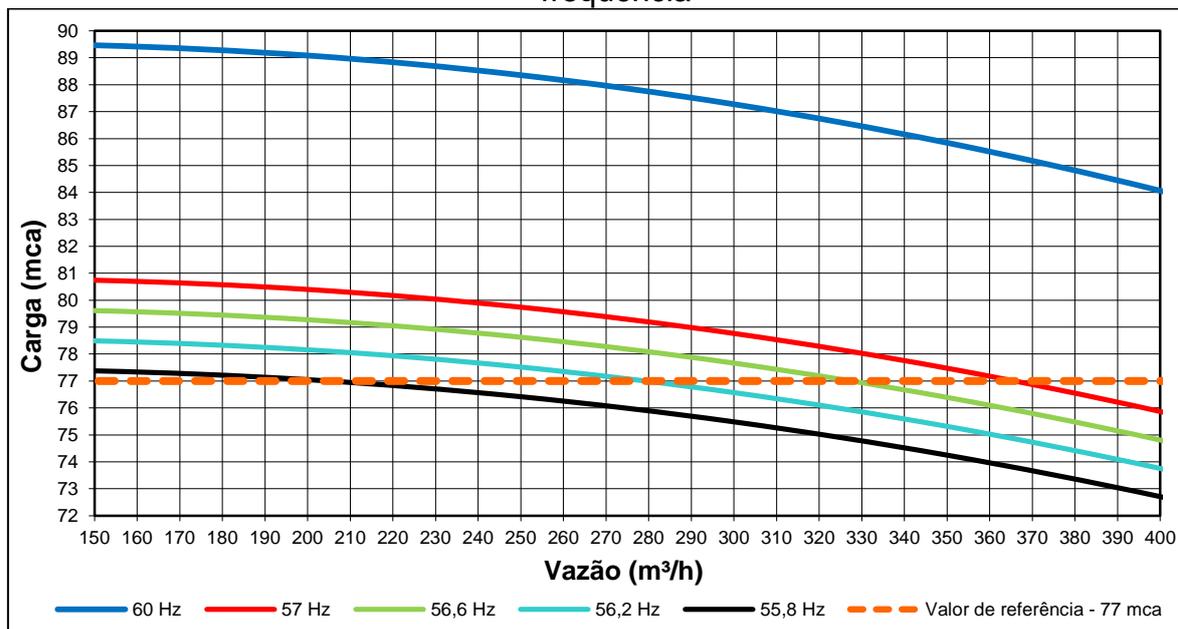
Na simulação do funcionamento da bomba INI 150-400 efetuada no Epanet, verificou-se uma melhoria significativa no abastecimento da região Santa Fé nos horários de pico de consumo. Por outro lado, durante os horários de baixo consumo (períodos da madrugada), houve um aumento substancial nos valores de pressão, proporcionando um desperdício de energia e aumentando a probabilidade de rompimento das tubulações.

Estes valores podem ser controlados através do uso do inversor de frequência, o qual, através de uma lógica de controle procura manter a pressão de saída do bombeamento constante. Os resultados obtidos com a utilização do inversor de frequência são apresentados a seguir.

### 4.2.1 Curvas de similaridade da bomba INI 150-400 variando a velocidade de rotação

Utilizando as leis de similaridade demonstradas pelas equações (8), (9), (10), (11) e (12), foram geradas as curvas de trabalho da bomba INI 150-400 variando-se a velocidade de rotação com o uso do inversor de frequência. As curvas de carga deste bombeamento são ilustradas na Figura 31.

Figura 31 – Curvas de carga da bomba INI 150-400 conforme a variação da frequência



Fonte: o autor

Para os pontos de trabalho atuais deste sistema de bombeamento, verificou-se que as frequências de trabalho deste conjunto variam na faixa de 55,8 Hz (1660 RPM, já considerando o escorregamento do motor) a 57 Hz (1695,75 RPM, já considerando o escorregamento do motor), objetivando manter constante o diferencial de pressão no valor de 77 mca. Este valor foi escolhido por ser o maior valor atingido pelo sistema atual no horário de menor consumo (ver Figura 25), o que garantirá o abastecimento da região.

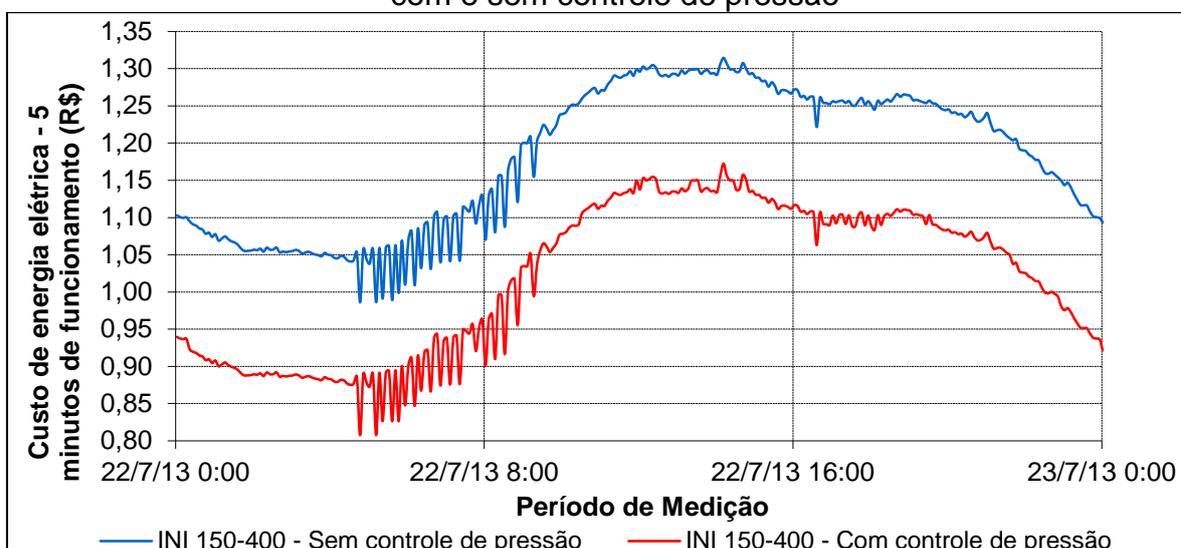
É importante ressaltar que, para determinar com maior exatidão o valor de pressão a ser mantido constante, deve ser feito um estudo hidráulico bastante aprofundado de todo o sistema. Como o foco deste trabalho é demonstrar os ganhos que o uso do inversor de frequência pode trazer, foram utilizados os valores obtidos mantendo o valor de 77 mca constante, o qual poderá ser alterado mediante o referido estudo.

#### 4.2.2 Análise comparativa entre o sistema de bombeamento com e sem o controle de rotação

Para analisar os ganhos que a utilização do inversor de frequência trouxe ao sistema de bombeamento, também se utilizou a planilha de análise hidráulica e

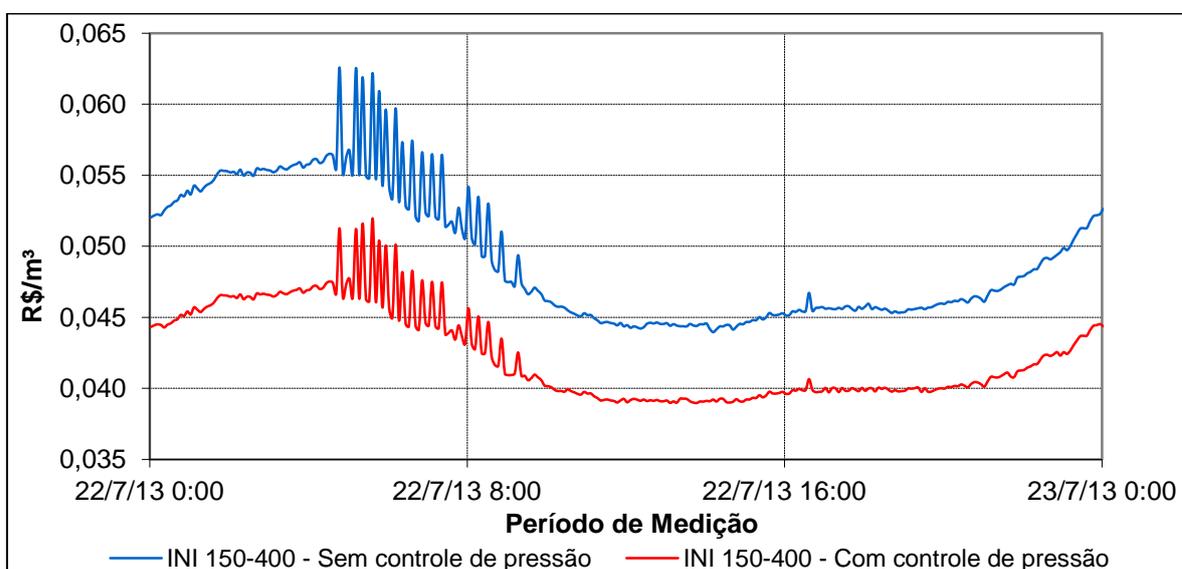
elétrica já descrita no subitem 4.1.3 deste trabalho. Os resultados obtidos com esta planilha são apresentados nas Figuras 32 e 33. Nestas duas figuras comparou-se o custo com energia elétrica e o custo específico por volume bombeado com o sistema trabalhando a 60 Hz (sem controle de pressão) e variando a frequência para efetuar o controle de pressão (77 mca). Para análise dos demais resultados (tais como comparação de AMT, rendimento, potência de eixo, fator de carga, etc.), ver Apêndice E deste trabalho.

Figura 32 – Custo de energia para cada cinco minutos de funcionamento da bomba, com e sem controle de pressão



Fonte: o autor

Figura 33 – Custo por volume de água bombeada, com e sem controle de pressão



Fonte: o autor

Nestas figuras pode-se perceber a maior eficiência energética causada pelo uso do inversor de frequência, já que efetuando o controle de pressão através da variação da rotação, a faixa de custo de energia elétrica que era de R\$ 0,98 a R\$ 1,32 (sem controle de pressão) reduziu para a R\$ 0,81 a R\$ 1,17 (com controle de pressão). Conseqüentemente, a faixa de custo por volume de água bombeado que era de R\$ 0,044 a R\$ 0,063 reduziu para R\$ 0,039 a R\$ 0,052.

Por fim, foi comparado o custo mensal com energia elétrica com a utilização da bomba INI 150-400 com e sem o controle de pressão através do inversor de frequência. Todos os resultados obtidos são mostrados no Quadro 3.

Quadro 3 – Comparativo da bomba INI 150-400 com e sem controle de pressão

	<b>INI 150-400 Sem controle de pressão</b>	<b>INI 150-400 Com controle de pressão</b>
<b>Frequência de trabalho (Hz)</b>	60	55,8 a 57
<b>Custo médio de energia para 5 minutos de funcionamento</b>	1,180	1,019
<b>Custo médio por volume de água bombeado (R\$/m<sup>3</sup>)</b>	0,050	0,043
<b>Custo estimado mensal com energia elétrica</b>	R\$ 11.211,90	<b>R\$ 9.685,79</b>

Fonte: o autor

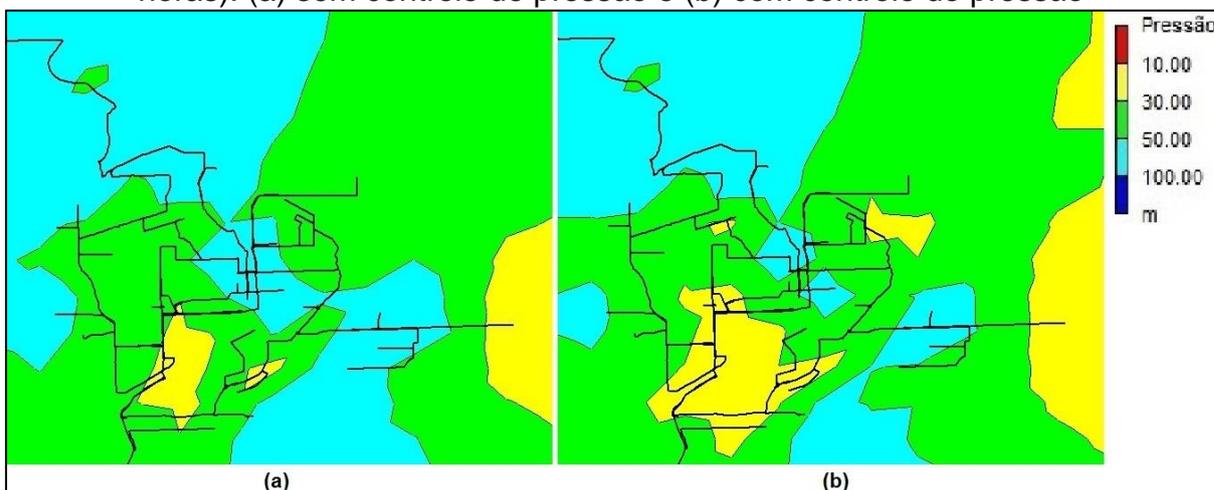
Analisando os resultados mostrados no Quadro 3 verifica-se que controle de pressão efetuado através do uso inversor de frequência trará para o sistema de bombeamento uma economia mensal estimada de R\$ 1.526,11. A fim de verificar as melhorias no abastecimento ocasionadas pelo controle da velocidade de rotação, foi feita uma nova simulação no Epanet. Os resultados desta simulação são apresentados a seguir.

#### **4.2.3 Simulação da bomba INI 150-400 no software Epanet efetuando o controle de pressão através da velocidade rotação**

Nas Figuras 34 e 35, são mostrados os resultados das simulações do Epanet utilizando a bomba INI 150-400 sem e com controle da velocidade de rotação. Do

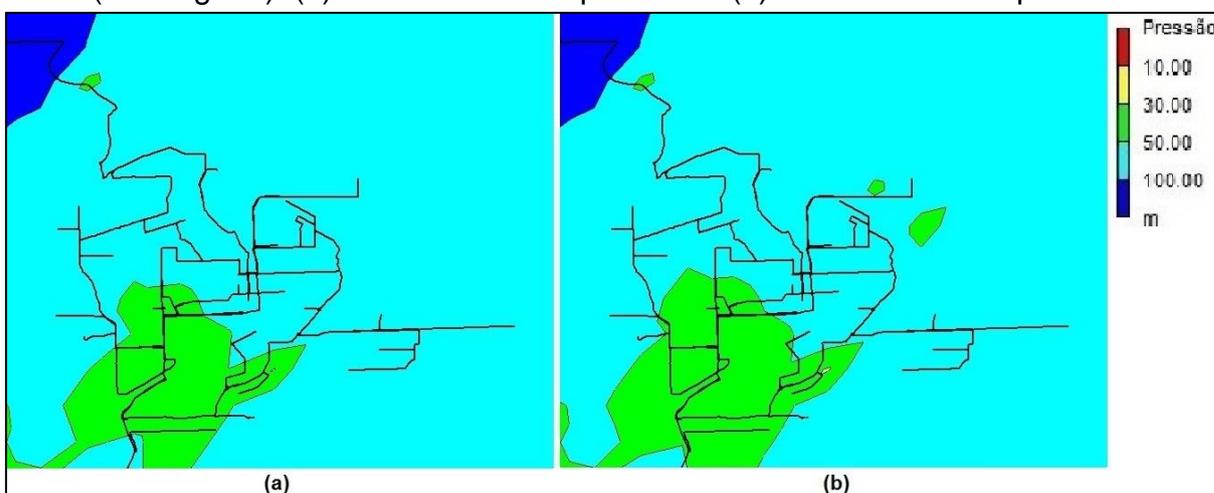
mesmo modo que no subitem 4.1.5, nestas figuras, é comparada a situação geral dos valores de pressão da malha de tubulações nos horários de maior e menor consumo.

Figura 34 – Utilização da bomba INI 150-400 no horário de maior consumo (13 horas): (a) sem controle de pressão e (b) com controle de pressão



Fonte: o autor

Figura 35 – Utilização da bomba INI 150-400 no horário de menor consumo (madrugada): (a) sem controle de pressão e (b) com controle de pressão



Fonte: o autor

Pode-se perceber, analisando a situação geral do abastecimento no horário de menor consumo, que não houve uma redução considerável nos valores de pressão, pois praticamente todo o sistema, durante a madrugada, apresentou valores acima de 50 mca.

Portanto, verifica-se com este fato que o valor de frequência mínima calculado para este sistema (55,8 Hz) ainda mantém grande parte do mesmo com pressões

bastante elevadas. Por isso, conforme já foi citado anteriormente, a realização de um estudo hidráulico mais aprofundado nesta região pode proporcionar ganhos com eficiência energética ainda maiores.

### 4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO

Conforme análise técnica efetuada nos itens 4.1 e 4.2 deste trabalho, foi feita a escolha pelo sistema de bombeamento utilizando a bomba modelo INI 150-400 e efetuando controle de pressão através do uso de inversor de frequência. Neste item, é apresentada a análise econômica deste projeto, pois são necessários alguns investimentos para a sua implantação.

#### 4.3.1 Materiais e equipamentos a serem adquiridos

No Quadro 4 são apresentados todos os materiais e equipamentos necessários para a implementação do projeto de eficiência energética na EBAT Santa Fé. É importante ressaltar que, para fins de manutenção, serão adquiridos dois sistemas de bombeamento, um para ser “reserva” do outro.

Quadro 4 – Lista de equipamentos e materiais para a implementação do projeto

Item	Material ou equipamento	Valor total (R\$)*
1	Sistema de bombeamento composto por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Duas bombas centrifugas INI 150-400;</li> <li>• Dois motores elétricos de 175 CV de potência nominal;</li> <li>• Duas bases estruturais.</li> </ul>	R\$ 157.723,80
2	Sistema de acionamento composto por: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dois inversores de frequência de 175 CV de potência nominal;</li> <li>• CLP;</li> <li>• Sensores de pressão;</li> <li>• Quadro elétrico e demais componentes tais como: contadores, CLP, cabos, etc.</li> </ul>	R\$ 108.626,05
3	Materiais hidráulicos para adequação da tubulação de sucção e recalque: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Válvulas borboleta;</li> <li>• Conexões de ferro fundido.</li> </ul>	R\$ 74.116,68
4	Mão de obra para instalação	R\$ 15.600,00
<b>VALOR TOTAL DO INVESTIMENTO:</b>		<b>R\$ 356.066,53</b>

\*Como a aquisição será feita via licitação, foram apresentados os valores médios para cada item orçados com três fornecedores.

Fonte: o autor

### 4.3.2 Redução de custos mensais obtida com o projeto

Além dos ganhos mensais obtidos com a redução do consumo de energia elétrica através da implementação do projeto de eficiência energética, também será reduzida a demanda de energia que é contratada junto à concessionária de energia elétrica. O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos com a redução de consumo de energia elétrica e demanda de energia.

Quadro 5 – Redução de consumo de energia elétrica e demanda de energia

Item	Reduções de custo	Valor total (R\$)
1	Redução mensal no consumo de energia elétrica obtido através da troca da bomba ITAP 100-200 pela bomba INI 150-400.	<b>R\$ 4.833,06</b>
2	Redução mensal no consumo de energia elétrica obtido através do uso do inversor de frequência para controle da velocidade de rotação da bomba INI 150-400.	<b>R\$ 1.526,11</b>
3	Redução mensal da demanda contratada de energia elétrica: Demanda com a ITAP 100-200: 142 kW Demanda com a INI 150-400: 103 kW	<b>R\$ 809,19</b>
<b>REDUÇÃO DE CUSTOS - MENSAL:</b>		<b>R\$ 7.168,36</b>
<b>REDUÇÃO NA FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA:</b>		<b>37,7%</b>

Fonte: o autor.

### 4.3.3 Análise econômica do projeto

Utilizando como critério de análise a TMA de 15% aa e a vida útil do projeto em dez anos, foi determinado o fluxo de caixa para o investimento necessário para a troca do sistema de bombeamento da EBAT Santa Fé e utilização de inversor de frequência para controle da velocidade rotação. A Tabela 4 apresenta este fluxo de caixa.

Tabela 4 – Fluxo de caixa do projeto

Ano	Investimento	Retorno	Fluxo de Caixa Não Descontado	Fluxo de Caixa Descontado	Saldo Não Descontado	Saldo Descontado
0	-R\$ 356.066,53		<b>-R\$ 356.066,53</b>	<b>-R\$ 356.066,53</b>	<b>-R\$ 356.066,53</b>	<b>-R\$ 356.066,53</b>
1		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 74.800,28	<b>-R\$ 270.046,21</b>	<b>-R\$ 281.266,25</b>
2		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 65.043,72	<b>-R\$ 184.025,89</b>	<b>-R\$ 216.222,53</b>
3		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 56.559,76	<b>-R\$ 98.005,57</b>	<b>-R\$ 159.662,77</b>
4		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 49.182,40	<b>-R\$ 11.985,25</b>	<b>-R\$ 110.480,38</b>
5		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 42.767,30	R\$ 74.035,07	<b>-R\$ 67.713,08</b>
6		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 37.188,96	R\$ 160.055,39	<b>-R\$ 30.524,12</b>
7		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 32.338,22	R\$ 246.075,71	<b>R\$ 1.814,11</b>
8		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 28.120,20	R\$ 332.096,03	<b>R\$ 29.934,30</b>
9		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 24.452,34	R\$ 418.116,35	<b>R\$ 54.386,65</b>
10		R\$ 86.020,32	R\$ 86.020,32	R\$ 21.262,91	R\$ 504.136,67	<b>R\$ 75.649,55</b>

Fonte: o autor

Na Tabela 4 foram inseridos os valores de investimento (calculados no Quadro 4), retorno (calculados no Quadro 5) e os fluxos de caixa descontado e não descontado. Os valores do fluxo de caixa descontado utilizam a taxa de juros do projeto de modo a considerar os aumentos das grandezas monetárias durante a análise do projeto. Já o não descontado, não leva em consideração as taxas de juros e o aumento das parcelas incidentes no fluxo de caixa, fornecendo um valor menos preciso para o cálculo do tempo de retorno do capital.

Abaixo são apresentados os resultados dos indicadores econômicos obtidos com a análise do fluxo de caixa mostrado na Tabela 4:

- TMA (aa): 15 %
- VPL: R\$ 75.649,55
- TIR: 20,38 %
- TRC Descontado: 6,94 anos

#### 4.3.4 Considerações finais

Visando complementar a interpretação dos resultados acima, é importante efetuar as considerações abaixo:

- De forma a aumentar a confiabilidade do sistema de abastecimento, foi considerada a aquisição de dois conjuntos de bombeamento, um para ser reserva do outro. Este fato fez com que duplicasse o valor do investimento, não produzindo nenhum benefício econômico. Por isso,

caso não fosse considerado o equipamento reserva, os indicadores econômicos seriam ainda mais atraentes;

- Não foram considerados os aumentos anuais no custo da energia elétrica que ocorrerão nos próximos dez anos. Este fato também tornaria o investimento mais atraente, pois o retorno seria ainda maior;
- Por se tratarem de valores bastante irrisórios se comparados ao retorno financeiro, não foram considerados os custos de manutenção deste sistema.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram propostas duas melhorias no sistema de bombeamento municipal Santa Fé, as quais objetivavam solucionar o problema de abastecimento da referida região e tornar este sistema de bombeamento mais eficiente em termos de consumo de energia elétrica.

A partir das medições efetuadas em campo e das simulações realizadas em planilhas de cálculo e no *software* Epanet, verificou-se que a possível troca das três bombas atuais modelo ITAP 100-200 por apenas uma bomba modelo INI 150-400, além de solucionar o problema de abastecimento do sistema Santa Fé em horários de pico de consumo, reduzirá os custos mensais com consumo de energia elétrica e demanda contratada em aproximadamente R\$ 5.642,25. Do mesmo modo, o uso do inversor de frequência para controlar a velocidade de rotação deste sistema, e desta forma controlar o valor de pressão da saída do bombeamento, trará uma economia mensal estimada em R\$ 1.526,11. Somado ao aspecto econômico, esta segunda melhoria reduzirá os valores elevados de pressão ocorridos em alguns pontos do sistema durante o período da madrugada, tornando o sistema de bombeamento mais eficiente e diminuindo a possibilidade de rompimento de tubulações.

Além de ser viável tecnicamente, proporcionando uma economia mensal de 37,7% na fatura de energia elétrica, verificou-se que o projeto a ser implantado na EBAT Santa Fé também é viável economicamente, pois em dez anos de vida útil, o seu VPL ficou positivo (R\$ 75.649,55), a sua TIR (20,38%) foi superior a TMA proposta pelo PROCEL Sanear e o Tempo de Retorno de Capital Descontado (*Pay back* descontado) é inferior a sete anos.

Por fim, pode-se constatar que a utilização do *software* Epanet, somada ao uso das planilhas geradas neste trabalho, se configurou como importante ferramenta de análise de projeto em sistemas de bombeamento, a qual pode ser aplicada em outros sistemas com características semelhantes ao estudado.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como tópicos para estudos futuros, sugere-se as alternativas abaixo:

- Análise de melhorias hidráulicas no sistema de bombeamento Santa Fé, onde a troca de tubulações e utilização de Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) pode aumentar ainda mais a sua eficiência energética;

- Estudo sobre os ganhos obtidos com o ajuste da velocidade de rotação do sistema de bombeamento, objetivando manter constante o valor de pressão do ponto crítico do sistema de bombeamento.
- Estudo sobre os ganhos obtidos com o ajuste da velocidade de rotação do sistema de bombeamento, objetivando manter constante o valor de vazão da saída do bombeamento;
- Análise do “envelhecimento” das bombas centrífugas ao longo do tempo e da sua influência nas curvas características dos equipamentos.

## 6 REFERÊNCIAS

ARENHARDT, Celso. **Definição da velocidade ótima para bombas de fluxo em sistemas de abastecimento**. São Leopoldo, 2008, 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12218**: Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 1994.

BARROSO, Lidiane Bittencourt. **Estudo da minimização das perdas físicas em sistema de distribuição de água utilizando o modelo EPANET**. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, 2005.

Correio do Povo. CEEE confirma novo recorde de consumo de energia no RS. **Correio do Povo**, Porto Alegre, 23 jan. 2012. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/noticias/?Noticia=384600>>. Acesso em: 22 mar. 2013.

DE LA TORRE, Antonio. Efficiency optimization in SWRO plant: high efficiency and low maintenance pumps. **Desalination**. Madri, v. 221, p. 151-157, 2008.

DeBENEDICTIS, A.; et al. Operational energy-efficiency improvement of municipal water pumping in California. **Energy**. San Francisco, v. 53, p. 237-243, 2013.

ELEOTERO, Bruno Comunello. **Redução de custos com energia elétrica em sistemas de bombeamento**: estudo de caso sistema de abastecimento de água de Capinzal/Ouro - SC. Florianópolis, 2008, 94 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Eletrobras. Apresentação PROCEL Sanear. **Eletrobras**, Brasília, 2006. Disponível em: < <http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?TeamID={17B0348E-BC5F-44B2-8FB4-6A9BEEF33020}> >. Acesso em: 26 mar. 2013.

GIROL, Guilherme Violato. **Análise de perdas reais em um setor do sistema de abastecimento de água no município de Capinzal – SC**. Florianópolis, 2008, 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GOMES, Airton Sampaio. **Guias práticos**: técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água. Brasília: Ministério das Cidades, 2007. 5v.

GOMES, Heber Pimentel. **Eficiência hidráulica e energética em saneamento: análise econômica de projetos**. Rio de Janeiro: ABES, 2005. 114 p.

GOMES, Heber Pimentel; SALVINO, Moisés Menezes. **Epanet 2.0 Brasil: Manual do Usuário**. Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2007.

GUIMARÃES, Ronaldo. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética**. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2008.

IBGE. Dados da cidade de Caxias do Sul. **IBGE**, Brasília, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=430510#>>. Acesso em: 01 jun. 2013.

IMBIL. **Catálogo Eletrônico**. Disponível em: <http://ce.imbil.com.br/>. Acesso em: 06 abr. 2013.

INSTRUTHERM. Analisador de energia AE 100. **Instrutherm**. Disponível em: <[http://www.instrutherm.com.br/instrutherm/product.asp?template\\_id=73&old\\_template\\_id=60&partner\\_id=&tu=b2c&dept%5Fid=2020&pf%5Fid=04001&nome=Analisador+de+Energia+Digital+Port%E1til&dept%5Fname=Analisadores+de+Energia](http://www.instrutherm.com.br/instrutherm/product.asp?template_id=73&old_template_id=60&partner_id=&tu=b2c&dept%5Fid=2020&pf%5Fid=04001&nome=Analisador+de+Energia+Digital+Port%E1til&dept%5Fname=Analisadores+de+Energia)>. Acesso em 29 ago. 2013.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido**. 2.ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM, 2006. 474 p.

LORENZI, Lucas Langon. **Eficientização energética de uma instalação de bombeamento**. Caxias do Sul, 2009, 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.

MACHADO, Flávio Valente Porto. Eficiência energética de conjuntos motobomba. **Anais do II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética**. Vitória, 2007. Art. 019.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 782 p.

POLEZI, Everton Luis. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento: uso do variador de frequência**. Porto Alegre, 2010, 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 4.ed. São Carlos: EESC - USP, 2006. 540 p.

SALVINO, Moisés Menezes. **Método de dimensionamento e controle operacional otimizado para redes de distribuição de água**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2009.

SAVAR, Mário; et. al. Improving centrifugal pump efficiency by impeller trimming. **Desalination**. Zagreb, v. 246, p. 654-659, 2009.

SCHMIDLIN JÚNIOR, Celso Rogério. **Operação do conjunto bomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso da energia elétrica**. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –

Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2006.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. Manual Técnico.

SOUZA, Leonardo Abrahão Fonseca de; et. al. Utilização do inversor de frequência como agente no aumento da eficiência energética em sistemas de bombeamento. **Anais do VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**. Poços de Caldas-MG, 2008.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. 3.ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004. 643 p.

## APÊNDICE A – PLANILHA DE ANÁLISE HIDRÁULICA E ELÉTRICA DA BOMBA IMBIL – MODELO: ITAP 100-200

### DADOS DA ESTAÇÃO

Estação de Bombeamento:	EBAT Santa Fé
Data:	05/09/2013
Marca/Modelo da(s) bomba(s):	Imbil - ITAP 100-200
Marca/Modelo do(s) motor(es):	WEG - 225 S/M
Potência nominal do(s) motor(es) (CV):	60

### CURVAS DO MOTOR

Carga	Rendimento (%)	Carga	Fator de Potência
50%	91,8	50%	0,79
75%	92,9	75%	0,86
100%	93,5	100%	0,89
125%	92,9	125%	0,86

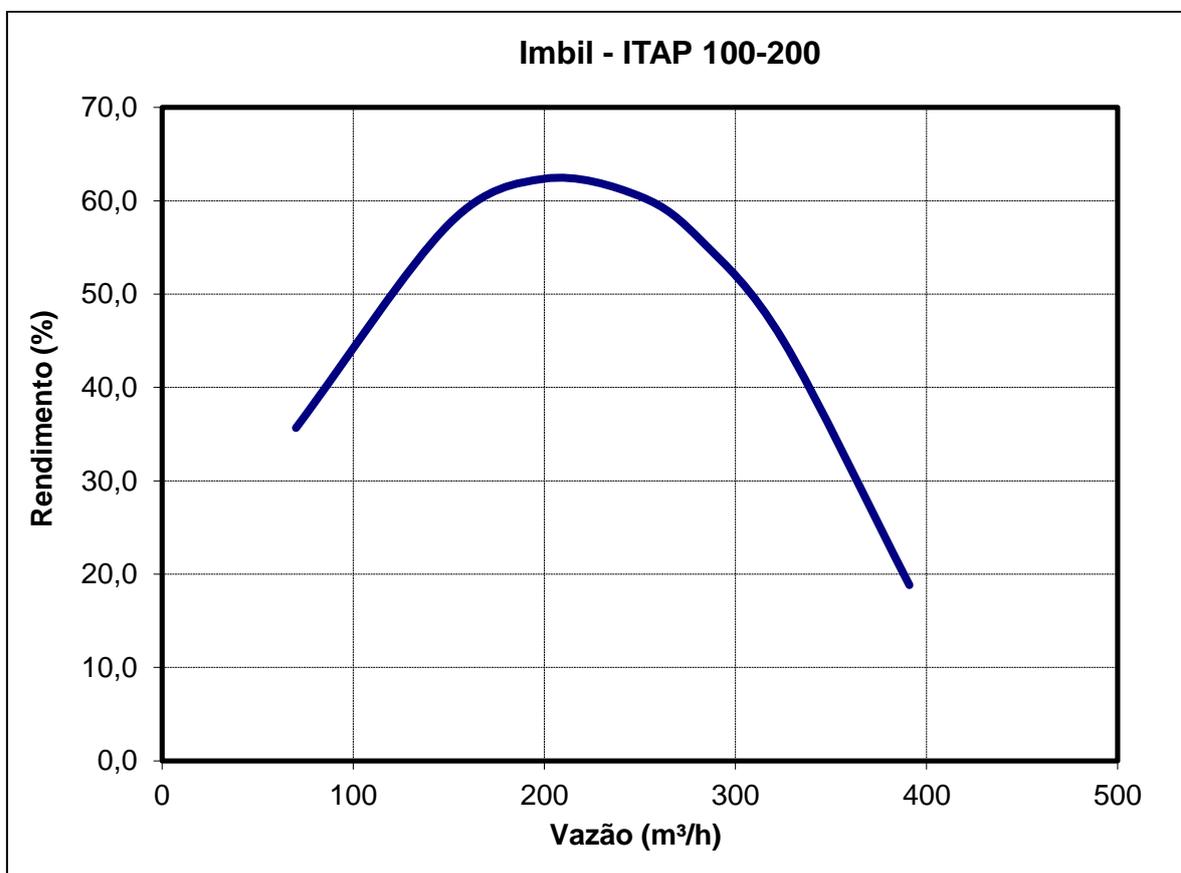
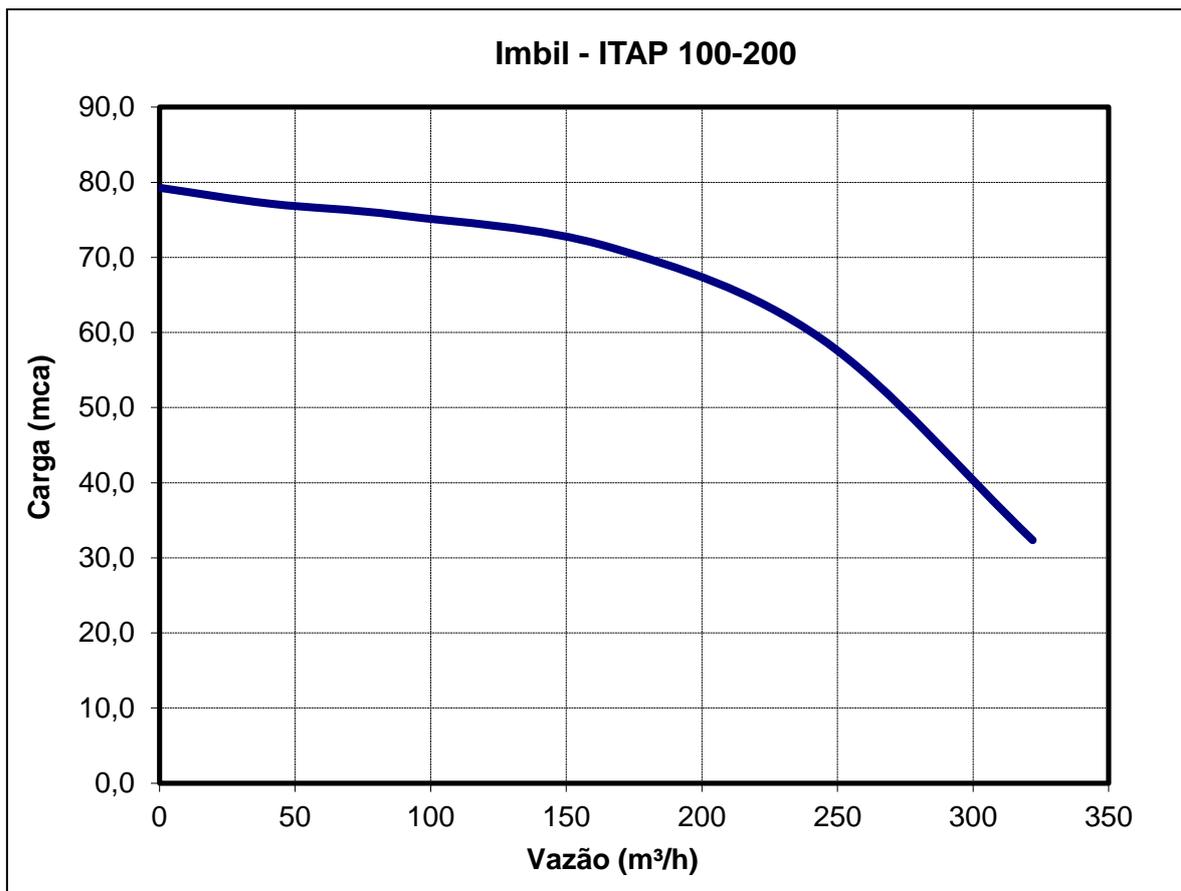
### DADOS HIDRÁULICOS E ELÉTRICOS

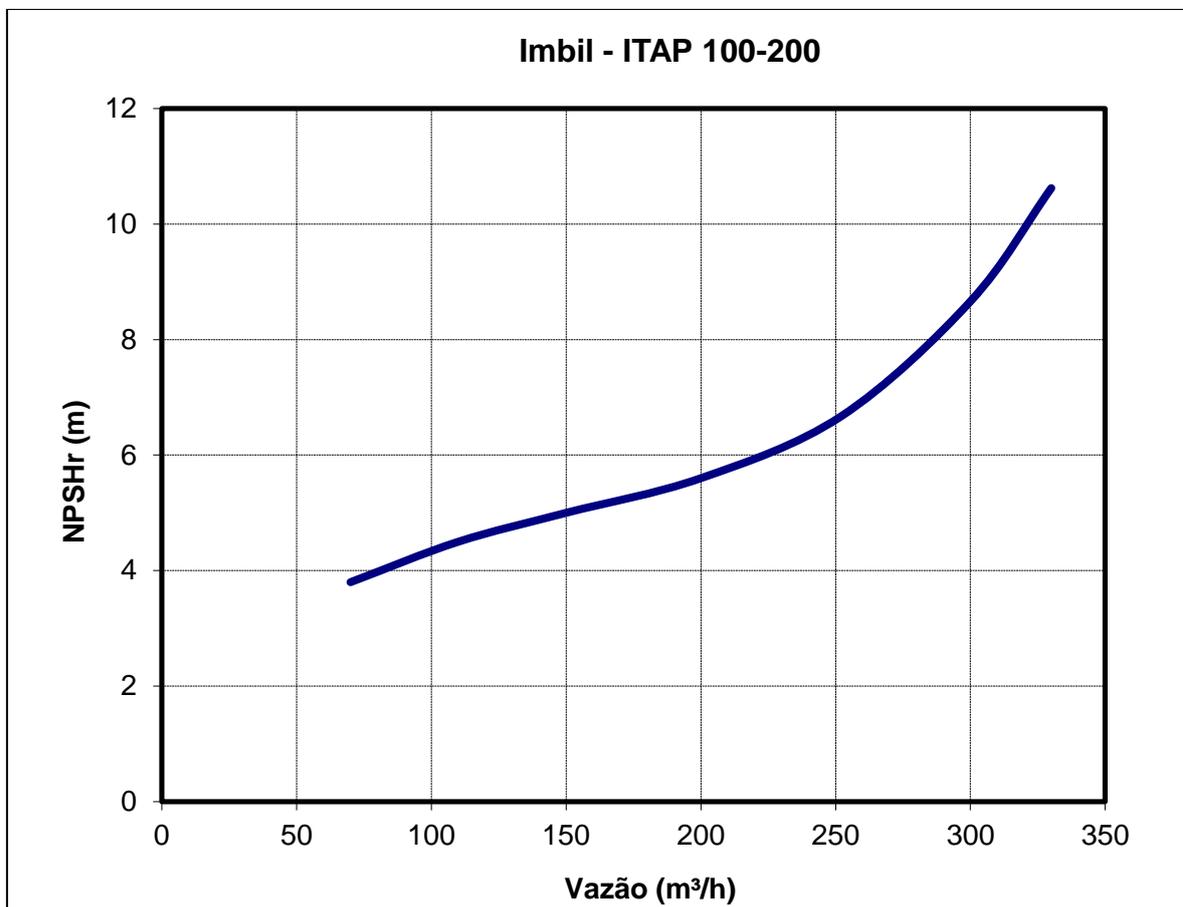
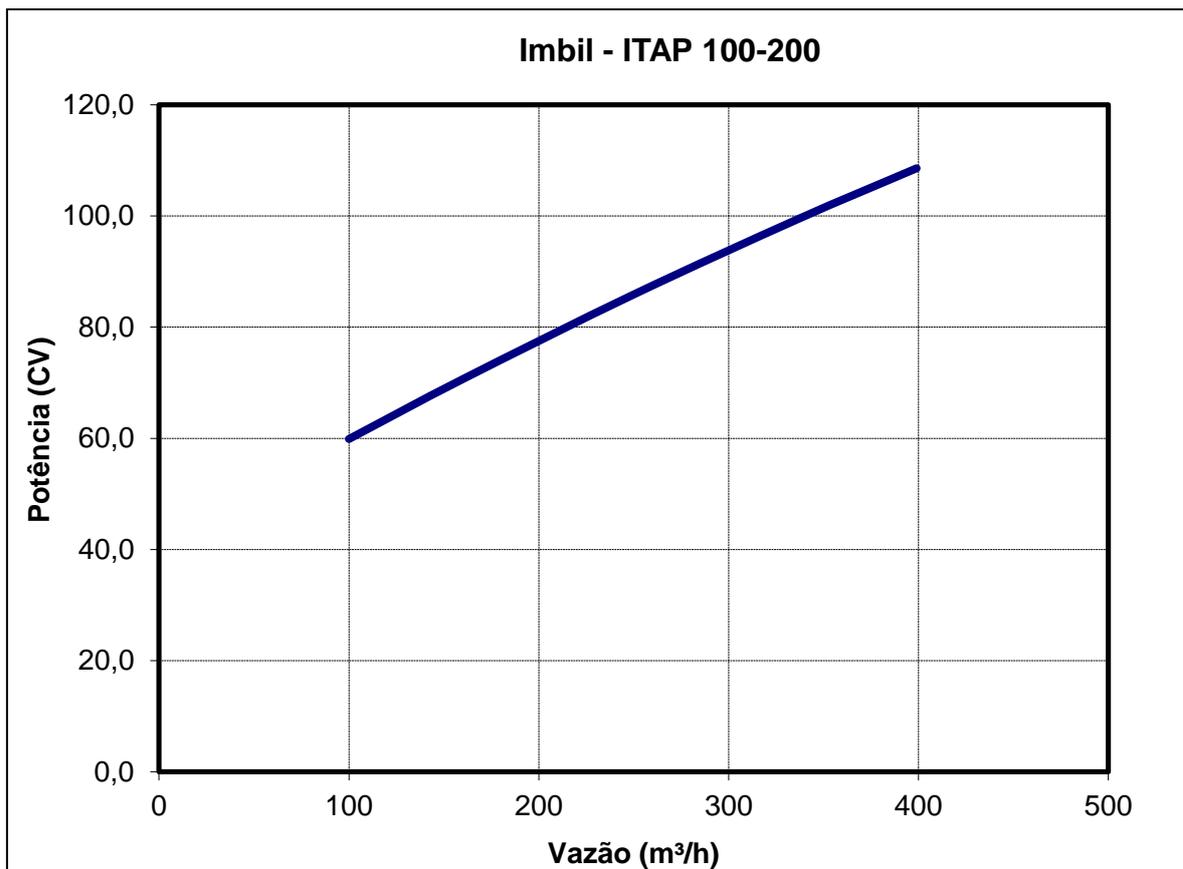
Fator de projeção de crescimento populacional:	1
Número de bombas em paralelo:	3
Altitude da Estação de Bomb.:	800
$\gamma$ (kgf/m <sup>3</sup> ) - Água - 15°C: Henn, 2006 Pág. 139	999
pa/ $\gamma$ - Água - 15°C: Henn, 2006 - Pág. 142	9,4506
pv/ $\gamma$ - Água - 15°C: Henn, 2006 - Pág. 139	0,1742
Perda de carga sucção:	1
Tensão da rede (V):	380
Fator de Potência da Instalação:	0,95
Tarifa (R\$/kWh):	0,144611
Tarifa (R\$/(kWh/12)):	0,012050917

### CURVAS DA BOMBA

Q (m <sup>3</sup> /h)	Carga (mca)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Potência (CV)
0	79,3	100	59,9
41	77,1	160	70,6
89	75,6	250	85,9
166	71,4	336	99,3
244	59,2	399	108,6
322	32,3		

Q (m <sup>3</sup> /h)	Rendimento (%)	Q (m <sup>3</sup> /h)	NPSHr (m)
70	35,7	70	3,8
150	57,5	110	4,5
200	62,4	150	5
250	60,5	200	5,6
283	55,5	252	6,67
325	45,0	300	8,66
391	18,8	330	10,62





**Custo Diário - Energia Elétrica**

22/jul	Segunda	R\$ 486,53
23/jul	Terça	R\$ 482,25
24/jul	Quarta	R\$ 485,67
25/jul	Quinta	R\$ 485,91
26/jul	Sexta	R\$ 485,84
27/jul	Sábado	R\$ 490,33
28/jul	Domingo	R\$ 486,94

**Tarifa de Energia Elétrica**

	<b>Real</b>	<b>Estimada - Planilha</b>
<b>R\$</b>	<b>15.263,30</b>	<b>R\$ 16.044,96</b>

**Diferença**  
**5,12%**

MEDIÇÕES						RESULTADOS															
Ponto	Data/Hora	Vazão Real (m³/h)	Pressão Recalque (mca)	Pressão Sucção (mca)	AMT Real (mca) - (1)	Vazão Projetada (m³/h) - (2)	Vazão Individual (m³/h) - (3)	AMT Teórico (mca) - (4)	NPSHr Teórico (mca) - (5)	Zmáx (m) - (6)	Rendimento (%) - (7)	Potência de Eixo (CV) - (8)	Potência de Eixo (kW) - (9)	Rendimento Motor (%) - (10)	Potência Consumida (kW) - (11)	Fator de Potência - (12)	Corrente (A) - (13)	Custo de Energia Elétrica (R\$) - (14)	m³/kW - (15)	R\$/m³ - (16)	Fator de Carga - (17)
1	22/07/2013 00:01	254,35	74,52	-0,28	74,8	254,35	84,78	75,77	4,25	-4,03	40,64	58,11	42,71	94,52%	45,19	0,874	78,53	R\$ 1,63	0,4691	0,0771	96,85%
2	22/07/2013 00:06	253,18	74,52	-0,18	74,7	253,18	84,39	75,78	4,24	-4,04	40,51	58,05	42,66	94,52%	45,14	0,874	78,45	R\$ 1,63	0,4674	0,0773	96,74%
3	22/07/2013 00:11	252,50	74,63	-0,18	74,81	252,50	84,17	75,79	4,23	-4,04	40,43	58,01	42,64	94,51%	45,11	0,874	78,40	R\$ 1,63	0,4664	0,0775	96,68%
4	22/07/2013 00:16	252,98	75,04	0,03	75,01	252,98	84,33	75,78	4,24	-4,04	40,48	58,04	42,66	94,51%	45,13	0,874	78,44	R\$ 1,63	0,4671	0,0774	96,73%
5	22/07/2013 00:21	250,13	75,14	0,13	75,01	250,13	83,38	75,81	4,21	-4,06	40,17	57,88	42,54	94,50%	45,02	0,874	78,24	R\$ 1,63	0,4630	0,0781	96,47%
6	22/07/2013 00:26	248,07	75,35	0,13	75,22	248,07	82,69	75,83	4,20	-4,08	39,93	57,77	42,46	94,50%	44,93	0,874	78,10	R\$ 1,62	0,4601	0,0786	96,28%
7	22/07/2013 00:31	247,17	75,55	0,23	75,32	247,17	82,39	75,84	4,19	-4,09	39,83	57,72	42,42	94,49%	44,90	0,874	78,03	R\$ 1,62	0,4588	0,0788	96,20%
8	22/07/2013 00:36	245,14	75,65	0,23	75,42	245,14	81,71	75,86	4,17	-4,10	39,60	57,61	42,34	94,49%	44,82	0,874	77,89	R\$ 1,62	0,4558	0,0793	96,02%
9	22/07/2013 00:41	244,29	75,76	0,34	75,42	244,29	81,43	75,86	4,17	-4,11	39,51	57,56	42,31	94,48%	44,78	0,874	77,83	R\$ 1,62	0,4546	0,0795	95,94%
10	22/07/2013 00:46	241,30	75,86	0,34	75,52	241,30	80,43	75,89	4,14	-4,13	39,16	57,40	42,19	94,47%	44,66	0,874	77,63	R\$ 1,61	0,4503	0,0803	95,67%
11	22/07/2013 00:51	242,08	75,96	0,44	75,52	242,08	80,69	75,88	4,15	-4,13	39,25	57,44	42,22	94,47%	44,69	0,874	77,68	R\$ 1,62	0,4514	0,0801	95,74%
12	22/07/2013 00:56	239,04	75,96	0,44	75,52	239,04	79,68	75,91	4,13	-4,15	38,90	57,28	42,10	94,46%	44,57	0,874	77,47	R\$ 1,61	0,4469	0,0809	95,46%
13	22/07/2013 01:01	241,05	76,17	0,54	75,63	241,05	80,35	75,89	4,14	-4,13	39,14	57,39	42,18	94,47%	44,65	0,874	77,61	R\$ 1,61	0,4499	0,0804	95,65%
14	22/07/2013 01:06	236,34	76,27	0,65	75,62	236,34	78,78	75,94	4,10	-4,17	38,59	57,13	41,99	94,45%	44,46	0,874	77,29	R\$ 1,61	0,4430	0,0816	95,22%
15	22/07/2013 01:11	237,83	76,48	0,75	75,73	237,83	79,28	75,92	4,12	-4,16	38,76	57,21	42,05	94,46%	44,52	0,874	77,39	R\$ 1,61	0,4452	0,0812	95,36%
16	22/07/2013 01:16	239,43	76,48	0,85	75,63	239,43	79,81	75,91	4,13	-4,15	38,95	57,30	42,12	94,46%	44,58	0,874	77,50	R\$ 1,61	0,4475	0,0808	95,50%
17	22/07/2013 01:21	237,41	76,58	0,95	75,63	237,41	79,14	75,93	4,11	-4,16	38,71	57,19	42,03	94,46%	44,50	0,874	77,36	R\$ 1,61	0,4446	0,0813	95,32%
18	22/07/2013 01:26	235,87	76,68	0,95	75,73	235,87	78,62	75,94	4,10	-4,18	38,53	57,11	41,97	94,45%	44,44	0,874	77,26	R\$ 1,61	0,4423	0,0817	95,18%
19	22/07/2013 01:31	235,02	76,79	1,06	75,73	235,02	78,34	75,95	4,09	-4,18	38,44	57,06	41,94	94,45%	44,41	0,874	77,20	R\$ 1,61	0,4410	0,0820	95,10%
20	22/07/2013 01:36	233,38	76,89	1,16	75,73	233,38	77,79	75,97	4,08	-4,20	38,24	56,97	41,87	94,44%	44,34	0,874	77,09	R\$ 1,60	0,4386	0,0824	94,95%
21	22/07/2013 01:41	230,57	77,09	1,26	75,83	230,57	76,86	75,99	4,06	-4,22	37,91	56,82	41,76	94,43%	44,23	0,874	76,89	R\$ 1,60	0,4345	0,0832	94,70%
22	22/07/2013 01:46	228,80	77,3	1,26	76,04	228,80	76,27	76,01	4,04	-4,24	37,70	56,72	41,69	94,42%	44,15	0,874	76,77	R\$ 1,60	0,4318	0,0837	94,54%
23	22/07/2013 01:51	228,96	77,3	1,36	75,94	228,96	76,32	76,01	4,04	-4,23	37,72	56,73	41,70	94,42%	44,16	0,874	76,78	R\$ 1,60	0,4321	0,0837	94,55%
24	22/07/2013 01:56	229,08	77,4	1,47	75,93	229,08	76,36	76,00	4,04	-4,23	37,74	56,74	41,70	94,42%	44,17	0,874	76,79	R\$ 1,60	0,4322	0,0836	94,56%
25	22/07/2013 02:01	229,75	77,51	1,47	76,04	229,75	76,58	76,00	4,05	-4,23	37,82	56,77	41,73	94,42%	44,19	0,874	76,84	R\$ 1,60	0,4332	0,0834	94,62%
26	22/07/2013 02:06	229,43	77,61	1,57	76,04	229,43	76,48	76,00	4,05	-4,23	37,78	56,76	41,72	94,42%	44,18	0,874	76,82	R\$ 1,60	0,4328	0,0835	94,59%
27	22/07/2013 02:11	230,51	77,61	1,57	76,04	230,51	76,84	75,99	4,06	-4,22	37,91	56,82	41,76	94,43%	44,22	0,874	76,89	R\$ 1,60	0,4344	0,0832	94,69%
28	22/07/2013 02:16	228,35	77,71	1,67	76,04	228,35	76,12	76,01	4,04	-4,24	37,65	56,70	41,67	94,42%	44,14	0,874	76,74	R\$ 1,60	0,4311	0,0839	94,50%
29	22/07/2013 02:21	231,26	77,71	1,67	76,04	231,26	77,09	75,98	4,06	-4,21	37,99	56,86	41,79	94,43%	44,25	0,874	76,94	R\$ 1,60	0,4355	0,0830	94,76%
30	22/07/2013 02:26	229,77	77,81	1,77	76,04	229,77	76,59	76,00	4,05	-4,23	37,82	56,78	41,73	94,43%	44,19	0,874	76,84	R\$ 1,60	0,4333	0,0834	94,63%
31	22/07/2013 02:31	229,86	77,81	1,77	76,04	229,86	76,62	76,00	4,05	-4,23	37,83	56,78	41,73	94,43%	44,20	0,874	76,85	R\$ 1,60	0,4334	0,0834	94,63%
32	22/07/2013 02:36	231,39	77,92	1,77	76,15	231,39	77,13	75,98	4,06	-4,21	38,01	56,86	41,79	94,43%	44,26	0,874	76,95	R\$ 1,60	0,4357	0,0830	94,77%
33	22/07/2013 02:41	227,77	77,92	1,88	76,04	227,77	75,92	76,02	4,03	-4,24	37,58	56,67	41,65	94,42%	44,11	0,874	76,70	R\$ 1,59	0,4303	0,0840	94,45%
34	22/07/2013 02:46	228,40	78,12	1,98	76,14	228,40	76,13	76,01	4,04	-4,24	37,66	56,70	41,68	94,42%	44,14	0,874	76,75	R\$ 1,60	0,4312	0,0838	94,50%
35	22/07/2013 02:51	227,99	78,12	1,98	76,14	227,99	76,00	76,01	4,03	-4,24	37,61	56,68	41,66	94,42%	44,12	0,874	76,72	R\$ 1,60	0,4306	0,0840	94,46%
36	22/07/2013 02:56	228,53	78,12	2,08	76,04	228,53	76,18	76,01	4,04	-4,24	37,67	56,71	41,68	94,42%	44,14	0,874	76,75	R\$ 1,60	0,4314	0,0838	94,51%
37	22/07/2013 03:01	228,77	78,23	2,08	76,15	228,77	76,26	76,01	4,04	-4,24	37,70	56,72	41,69	94,42%	44,15	0,874	76,77	R\$ 1,60	0,4318	0,0837	94,54%
38	22/07/2013 03:06	229,65	78,23	2,08	76,15	229,65	76,55	76,00	4,05	-4,23	37,80	56,77	41,73	94,42%	44,19	0,874	76,83	R\$ 1,60	0,4331	0,0835	94,62%
39	22/07/2013 03:11	228,79	78,33	2,08	76,25	228,79	76,26	76,01	4,04	-4,24	37,70	56,72	41,69	94,42%	44,15	0,874	76,77	R\$ 1,60	0,4318	0,0837	94,54%
40	22/07/2013 03:16	226,86	78,23	2,18	76,05	226,86	75,62	76,03	4,02	-4,25	37,47	56,62	41,61	94,41%	44,08	0,874	76,64	R\$ 1,59	0,4289	0,0843	94,36%

**Legendas:**

- (1)  $AMT\ Real = Press\ ão\ de\ recalque - Press\ ão\ de\ Suc\ \c{c}\ ão$
- (2)  $Vaz\ \c{c}\ \c{a}o\ Projetada = Vaz\ \c{c}\ \c{a}o\ Real \times Fator\ de\ proje\ \c{c}\ \c{a}o\ de\ crescimento$
- (3)  $Vaz\ \c{c}\ \c{a}o\ Individual = \frac{Vaz\ \c{c}\ \c{a}o\ Real}{N\ \c{u}mero\ de\ bombas\ em\ paralelo}$
- (4)  $AMT\ T\ \c{e}orico\ (m):$  Dado retirado da curva de carga
- (5)  $NPSHr\ T\ \c{e}orico\ (m):$  Dado retirado da curva de NPSHr
- (6)  $Z_{m\acute{a}x}(m) = \pm \left[ NPSHr - \frac{p_a - p_v}{\gamma} + Perda\ de\ Carga\ Suc\ \c{c}\ \c{a}o \right]$
- (7)  $Rendimento\ (\%):$  Dado retirado da curva de rendimento
- (8)  $Pot\ \c{e}ncia\ de\ eixo\ (CV):$  Dado retirado da curva de pot\ \c{e}ncia
- (9)  $Pot\ \c{e}ncia\ de\ eixo\ (kW) = Pot\ \c{e}ncia\ de\ eixo\ (CV) \times 0,735$
- (10)  $Rendimento\ do\ motor\ (\%):$  Dado retirado da curva de rendimento do motor
- (11)  $Pot\ \c{e}ncia\ consumida\ (kW) = \frac{Pot\ \c{e}ncia\ de\ eixo\ (kW)}{Rendimento\ do\ motor}$
- (12)  $Fator\ de\ pot\ \c{e}ncia:$  Dado retirado da curva de fator de pot\ \c{e}ncia do motor
- (13)  $Corrente\ Te\ \c{o}rica\ (A) = \frac{Pot\ \c{e}ncia\ Consumida}{Tens\ \c{a}o \times Fator\ de\ Pot\ \c{e}ncia \times \sqrt{3}}$
- (14)  $Custo\ de\ energia\ el\ \c{e}trica\ (5\ minutos\ de\ funcionamento) = Pot\ \c{e}ncia\ consumida \times Tarifa\ de\ energia\ el\ \c{e}trica \times N\ \c{u}mero\ de\ bombas\ em\ paralelo$
- (15)  $\frac{Volume\ de\ \c{a}gua\ bombeada}{Pot\ \c{e}ncia\ consumida}$
- (16)  $\frac{Custo\ de\ energia\ el\ \c{e}trica}{Volume\ de\ \c{a}gua\ bombeada}$
- (17)  $Fator\ de\ carga = \frac{Pot\ \c{e}ncia\ de\ eixo\ (CV)}{Pot\ \c{e}ncia\ nominal\ do\ motor}$

## APÊNDICE B – PLANILHA DE ANÁLISE HIDRÁULICA E ELÉTRICA DA BOMBA IMBIL – MODELO: INI 150-400

### DADOS DA ESTAÇÃO

Estação de Bombeamento:	EBAT Santa Fé
Data:	05/09/2013
Marca/Modelo da(s) bomba(s):	Imbil - INI 150-400
Marca/Modelo do(s) motor(es):	WEG - 315 S/M
Potência nominal do(s) motor(es) (CV):	175

### CURVAS DO MOTOR

Carga	Rendimento (%)	Carga	Fator de Potência
75%	94,5	75%	0,88
100%	94,8	100%	0,89
125%	94,5	125%	0,88

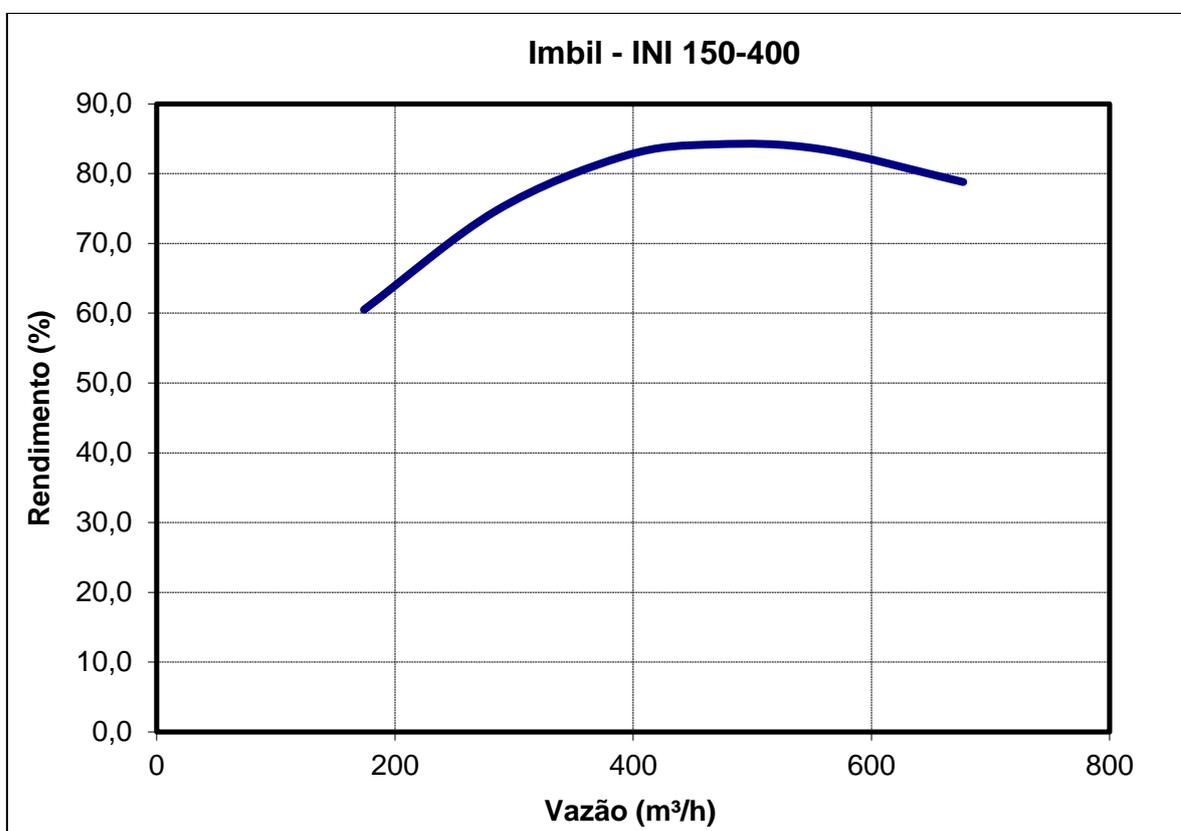
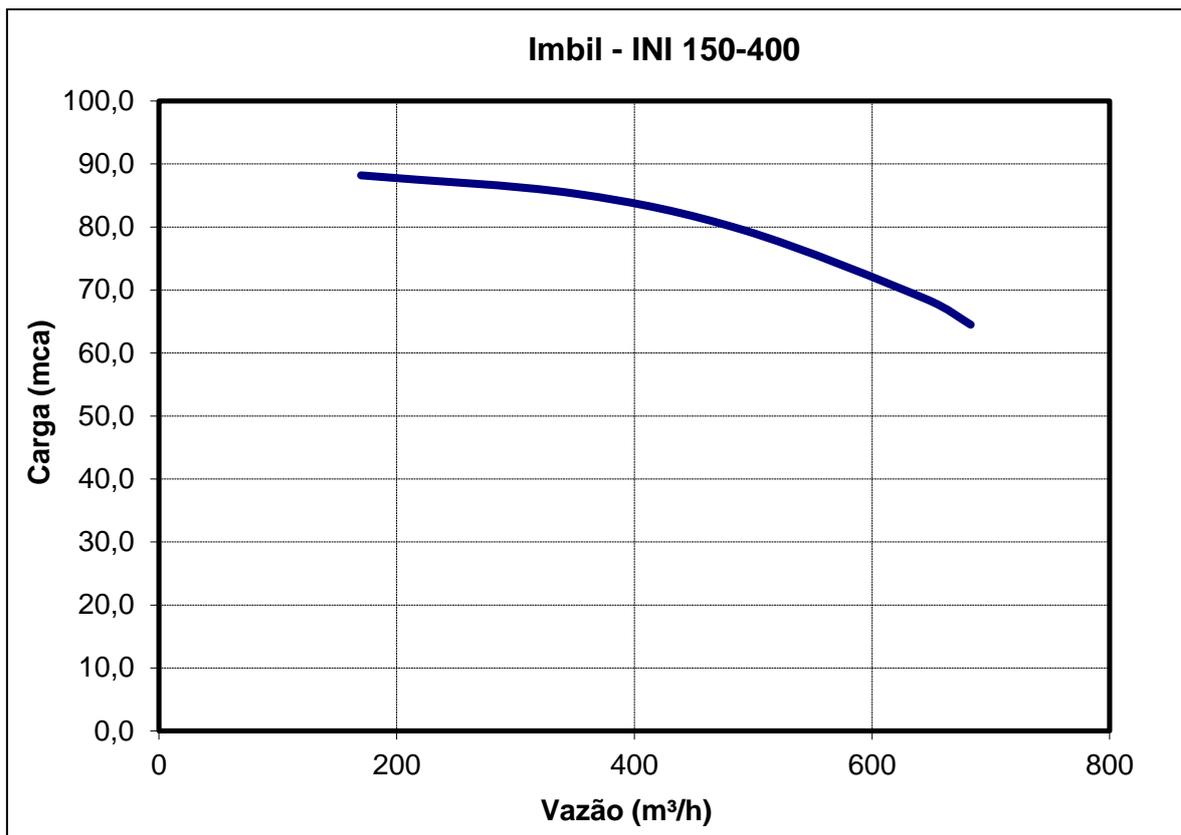
### DADOS HIDRÁULICOS E ELÉTRICOS

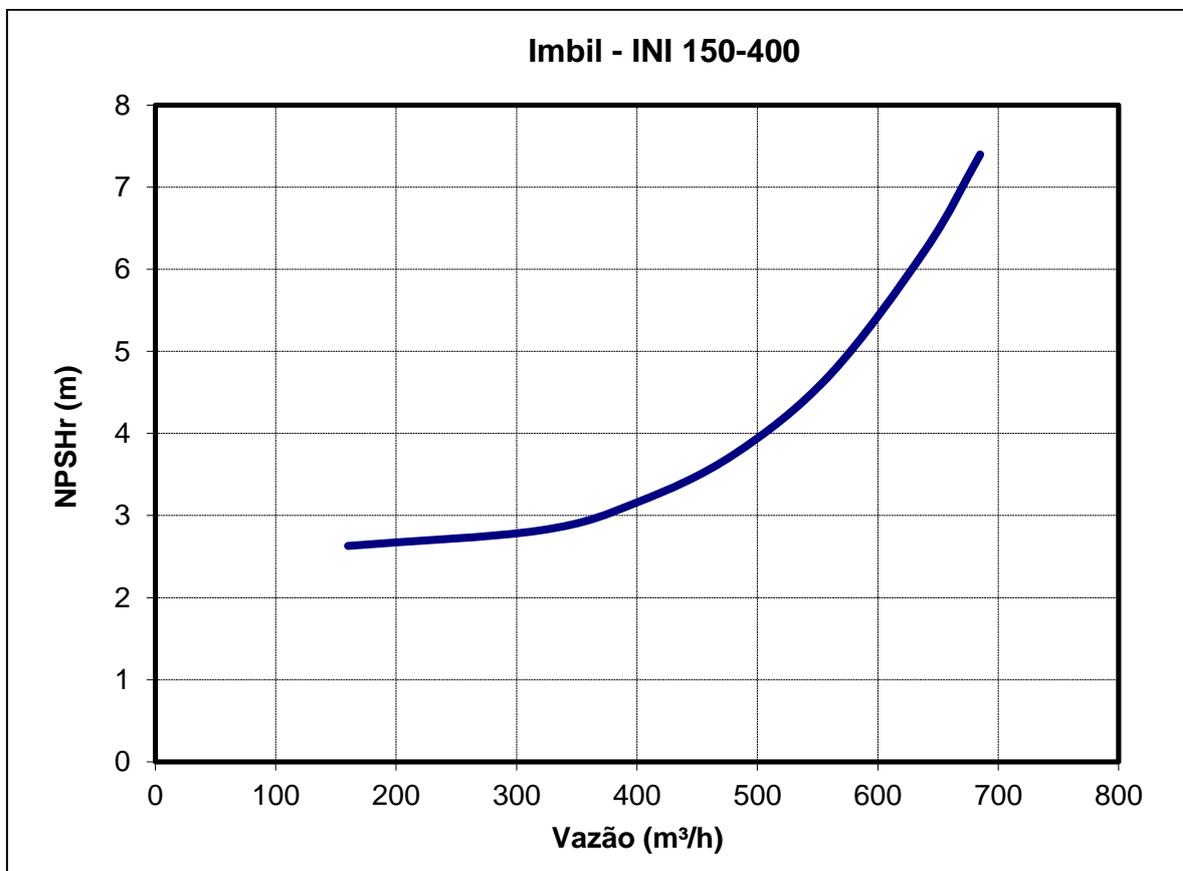
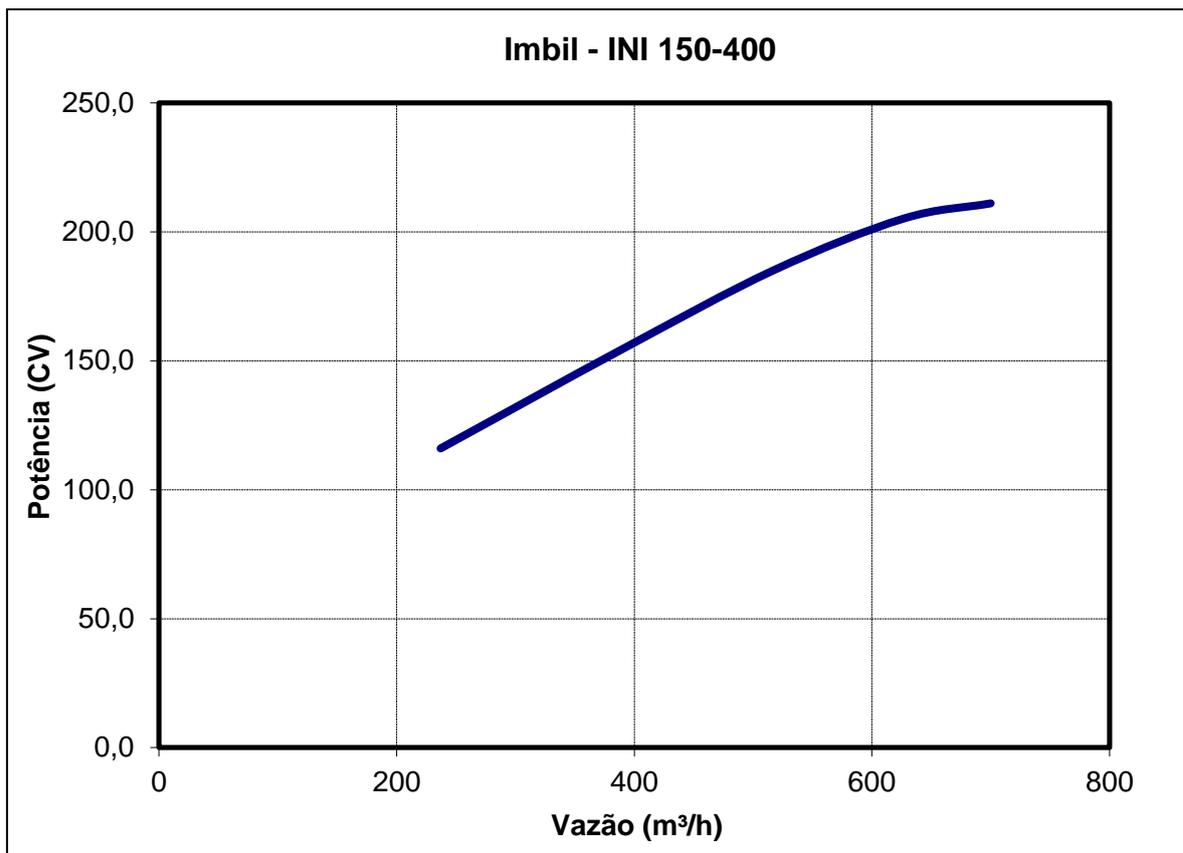
Fator de projeção de crescimento populacional:	1
Número de bombas em paralelo:	1
Altitude da Estação de Bomb.:	800
$\gamma$ (kgf/m <sup>3</sup> ) - Água - 15°C: Henn, 2006 Pág. 139	999
pa/ $\gamma$ - Água - 15°C: Henn, 2006 - Pág. 142	9,4506
pv/ $\gamma$ - Água - 15°C: Henn, 2006 - Pág. 139	0,1742
Perda de carga sucção:	1
Tensão da rede (V):	380
Fator de Potência da Instalação:	0,95
Tarifa (R\$/kWh):	0,144611
Tarifa (R\$/(kWh/12)):	0,012050917

### CURVAS DA BOMBA

Q (m <sup>3</sup> /h)	Carga (mca)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Potência (CV)
170	88,2	237	116,0
350	85,3	388	154,0
492	79,5	517	185,0
645	68,6	626	205,0
683	64,5	700	211,0

Q (m <sup>3</sup> /h)	Rendimento (%)	Q (m <sup>3</sup> /h)	NPSHr (m)
174	60,5	160	2,63
285	74,7	320	2,82
392	82,5	400	3,16
469	84,2	480	3,74
558	83,5	560	4,71
677	78,8	640	6,25
		685	7,4





## Custo Diário - Energia Elétrica

22/jul	Segunda	R\$ 339,95
23/jul	Terça	R\$ 334,45
24/jul	Quarta	R\$ 339,00
25/jul	Quinta	R\$ 339,14
26/jul	Sexta	R\$ 339,45
27/jul	Sábado	R\$ 345,43
28/jul	Domingo	R\$ 340,84

## Tarifa de Energia Elétrica

Estimada - Planilha	
R\$	11.211,90

MEDIÇÕES						RESULTADOS															
Ponto	Data/Hora	Vazão Real (m³/h)	Pressão Recalque (mca)	Pressão Sucção (mca)	AMT Real (mca) - (1)	Vazão Projetada (m³/h) - (2)	Vazão Individual (m³/h) - (3)	AMT Teórico (mca) - (4)	NPSHr Teórico (mca) - (5)	Zmáx (m) - (6)	Rendimento (%) - (7)	Potência de Eixo (CV) - (8)	Potência de Eixo (kW) - (9)	Rendimento Motor (%) - (10)	Potência Consumida (kW) - (11)	Fator de Potência - (12)	Corrente (A) - (13)	Custo de Energia Elétrica (R\$) - (14)	m³/kW - (15)	R\$/m³ - (16)	Fator de Carga - (17)
1	22/07/2013 00:01	254,35	74,52	-0,28	74,8	254,35	254,35	87,97	3,04	-5,24	72,23	116,66	85,74	93,68%	91,53	0,863	161,22	R\$ 1,10	0,2316	0,0520	66,66%
2	22/07/2013 00:06	253,18	74,52	-0,18	74,7	253,18	253,18	87,98	3,03	-5,24	72,10	116,42	85,57	93,68%	91,34	0,862	160,93	R\$ 1,10	0,2310	0,0522	66,52%
3	22/07/2013 00:11	252,50	74,63	-0,18	74,81	252,50	252,50	87,99	3,03	-5,25	72,01	116,28	85,47	93,68%	91,23	0,862	160,75	R\$ 1,10	0,2306	0,0523	66,45%
4	22/07/2013 00:16	252,98	75,04	0,03	75,01	252,98	252,98	87,99	3,03	-5,24	72,07	116,38	85,54	93,68%	91,31	0,862	160,87	R\$ 1,10	0,2309	0,0522	66,50%
5	22/07/2013 00:21	250,13	75,14	0,13	75,01	250,13	250,13	88,02	3,02	-5,25	71,73	115,80	85,11	93,68%	90,86	0,862	160,15	R\$ 1,09	0,2294	0,0525	66,17%
6	22/07/2013 00:26	248,07	75,35	0,13	75,22	248,07	248,07	88,04	3,02	-5,26	71,48	115,38	84,80	93,67%	90,53	0,862	159,63	R\$ 1,09	0,2284	0,0528	65,93%
7	22/07/2013 00:31	247,17	75,55	0,23	75,32	247,17	247,17	88,04	3,01	-5,26	71,37	115,19	84,67	93,67%	90,39	0,862	159,40	R\$ 1,09	0,2279	0,0529	65,82%
8	22/07/2013 00:36	245,14	75,65	0,23	75,42	245,14	245,14	88,06	3,00	-5,27	71,13	114,78	84,36	93,67%	90,07	0,861	158,89	R\$ 1,09	0,2268	0,0531	65,59%
9	22/07/2013 00:41	244,29	75,76	0,34	75,42	244,29	244,29	88,07	3,00	-5,27	71,02	114,61	84,24	93,66%	89,94	0,861	158,68	R\$ 1,08	0,2264	0,0532	65,49%
10	22/07/2013 00:46	241,30	75,86	0,34	75,52	241,30	241,30	88,10	2,99	-5,28	70,65	114,01	83,80	93,66%	89,47	0,861	157,93	R\$ 1,08	0,2248	0,0536	65,15%
11	22/07/2013 00:51	242,08	75,96	0,44	75,52	242,08	242,08	88,09	2,99	-5,28	70,75	114,16	83,91	93,66%	89,59	0,861	158,13	R\$ 1,08	0,2252	0,0535	65,24%
12	22/07/2013 00:56	239,04	75,96	0,44	75,52	239,04	239,04	88,11	2,98	-5,29	70,37	113,55	83,46	93,66%	89,12	0,860	157,37	R\$ 1,07	0,2235	0,0539	64,89%
13	22/07/2013 01:01	241,05	76,17	0,54	75,63	241,05	241,05	88,10	2,99	-5,29	70,62	113,96	83,76	93,66%	89,43	0,861	157,87	R\$ 1,08	0,2246	0,0536	65,12%
14	22/07/2013 01:06	236,34	76,27	0,65	75,62	236,34	236,34	88,13	2,97	-5,30	70,03	113,02	83,07	93,65%	88,70	0,860	156,70	R\$ 1,07	0,2220	0,0543	64,58%
15	22/07/2013 01:11	237,83	76,48	0,75	75,73	237,83	237,83	88,12	2,98	-5,30	70,22	113,31	83,28	93,65%	88,93	0,860	157,07	R\$ 1,07	0,2229	0,0541	64,75%
16	22/07/2013 01:16	239,43	76,48	0,85	75,63	239,43	239,43	88,11	2,99	-5,29	70,42	113,63	83,52	93,66%	89,18	0,860	157,47	R\$ 1,07	0,2237	0,0539	64,93%
17	22/07/2013 01:21	237,41	76,58	0,95	75,63	237,41	237,41	88,13	2,98	-5,30	70,17	113,23	83,22	93,65%	88,86	0,860	156,97	R\$ 1,07	0,2226	0,0541	64,70%
18	22/07/2013 01:26	235,87	76,68	0,95	75,73	235,87	235,87	88,14	2,97	-5,30	69,97	112,92	83,00	93,65%	88,63	0,860	156,59	R\$ 1,07	0,2218	0,0543	64,53%
19	22/07/2013 01:31	235,02	76,79	1,06	75,73	235,02	235,02	88,14	2,97	-5,31	69,87	112,75	82,87	93,65%	88,50	0,860	156,38	R\$ 1,07	0,2213	0,0545	64,43%
20	22/07/2013 01:36	233,38	76,89	1,16	75,73	233,38	233,38	88,16	2,96	-5,31	69,66	112,43	82,63	93,64%	88,24	0,860	155,97	R\$ 1,06	0,2204	0,0547	64,24%
21	22/07/2013 01:41	230,57	77,09	1,26	75,83	230,57	230,57	88,17	2,96	-5,32	69,30	111,88	82,23	93,64%	87,81	0,859	155,29	R\$ 1,06	0,2188	0,0551	63,93%
22	22/07/2013 01:46	228,80	77,3	1,26	76,04	228,80	228,80	88,18	2,95	-5,33	69,07	111,53	81,97	93,64%	87,55	0,859	154,86	R\$ 1,06	0,2178	0,0553	63,73%
23	22/07/2013 01:51	228,96	77,3	1,36	75,94	228,96	228,96	88,18	2,95	-5,33	69,09	111,56	82,00	93,64%	87,57	0,859	154,90	R\$ 1,06	0,2179	0,0553	63,75%
24	22/07/2013 01:56	229,08	77,4	1,47	75,93	229,08	229,08	88,18	2,95	-5,33	69,11	111,58	82,01	93,64%	87,59	0,859	154,93	R\$ 1,06	0,2180	0,0553	63,76%
25	22/07/2013 02:01	229,75	77,51	1,47	76,04	229,75	229,75	88,18	2,95	-5,32	69,19	111,71	82,11	93,64%	87,69	0,859	155,09	R\$ 1,06	0,2183	0,0552	63,84%
26	22/07/2013 02:06	229,43	77,61	1,57	76,04	229,43	229,43	88,18	2,95	-5,32	69,15	111,65	82,06	93,64%	87,64	0,859	155,01	R\$ 1,06	0,2182	0,0552	63,80%
27	22/07/2013 02:11	230,51	77,61	1,57	76,04	230,51	230,51	88,17	2,96	-5,32	69,29	111,86	82,22	93,64%	87,81	0,859	155,27	R\$ 1,06	0,2188	0,0551	63,92%
28	22/07/2013 02:16	228,35	77,71	1,67	76,04	228,35	228,35	88,19	2,95	-5,33	69,01	111,44	81,91	93,63%	87,48	0,859	154,75	R\$ 1,05	0,2175	0,0554	63,68%
29	22/07/2013 02:21	231,26	77,71	1,67	76,04	231,26	231,26	88,17	2,96	-5,32	69,39	112,01	82,33	93,64%	87,92	0,859	155,46	R\$ 1,06	0,2192	0,0550	64,01%
30	22/07/2013 02:26	229,77	77,81	1,77	76,04	229,77	229,77	88,18	2,95	-5,32	69,20	111,72	82,11	93,64%	87,69	0,859	155,09	R\$ 1,06	0,2183	0,0552	63,84%
31	22/07/2013 02:31	229,86	77,81	1,77	76,04	229,86	229,86	88,18	2,95	-5,32	69,21	111,74	82,13	93,64%	87,71	0,859	155,12	R\$ 1,06	0,2184	0,0552	63,85%
32	22/07/2013 02:36	231,39	77,92	1,77	76,15	231,39	231,39	88,17	2,96	-5,32	69,40	112,04	82,35	93,64%	87,94	0,859	155,49	R\$ 1,06	0,2193	0,0550	64,02%
33	22/07/2013 02:41	227,77	77,92	1,88	76,04	227,77	227,77	88,19	2,95	-5,33	68,94	111,33	81,83	93,63%	87,39	0,859	154,61	R\$ 1,05	0,2172	0,0555	63,62%
34	22/07/2013 02:46	228,40	78,12	1,98	76,14	228,40	228,40	88,19	2,95	-5,33	69,02	111,45	81,92	93,63%	87,48	0,859	154,76	R\$ 1,05	0,2176	0,0554	63,69%
35	22/07/2013 02:51	227,99	78,12	1,98	76,14	227,99	227,99	88,19	2,95	-5,33	68,97	111,37	81,86	93,63%	87,42	0,859	154,66	R\$ 1,05	0,2173	0,0555	63,64%
36	22/07/2013 02:56	228,53	78,12	2,08	76,04	228,53	228,53	88,19	2,95	-5,33	69,04	111,47	81,93	93,63%	87,50	0,859	154,79	R\$ 1,05	0,2176	0,0554	63,70%
37	22/07/2013 03:01	228,77	78,23	2,08	76,15	228,77	228,77	88,18	2,95	-5,33	69,07	111,52	81,97	93,64%	87,54	0,859	154,85	R\$ 1,05	0,2178	0,0553	63,73%
38	22/07/2013 03:06	229,65	78,23	2,08	76,15	229,65	229,65	88,18	2,95	-5,32	69,18	111,69	82,10	93,64%	87,67	0,859	155,07	R\$ 1,06	0,2183	0,0552	63,83%
39	22/07/2013 03:11	228,79	78,33	2,08	76,25	228,79	228,79	88,18	2,95	-5,33	69,07	111,53	81,97	93,64%	87,54	0,859	154,86	R\$ 1,05	0,2178	0,0553	63,73%
40	22/07/2013 03:16	226,86	78,23	2,18	76,05	226,86	226,86	88,20	2,94	-5,33	68,82	111,15	81,69	93,63%	87,25	0,859	154,39	R\$ 1,05	0,2167	0,0556	63,51%

**Legendas:**

- (1)  $AMT\ Real = Press\ \text{de recalque} - Press\ \text{de Sucção}$
- (2)  $Vaz\ \text{ão Projetada} = Vaz\ \text{ão Real} \times Fator\ \text{de projeção de crescimento}$
- (3)  $Vaz\ \text{ão Individual} = \frac{Vaz\ \text{ão Real}}{Número\ \text{de bombas em paralelo}}$
- (4)  $AMT\ T\acute{e}orico\ (m):$  Dado retirado da curva de carga
- (5)  $NPSHr\ T\acute{e}orico\ (m):$  Dado retirado da curva de  $NPSHr$
- (6)  $Zm\acute{a}x(m) = \pm \left[ NPSHr - \frac{pa - pv}{\gamma} + Perda\ \text{de Carga Sucção} \right]$
- (7)  $Rendimento\ (\%):$  Dado retirado da curva de rendimento
- (8)  $Pot\ \text{ência de eixo (CV):}$  Dado retirado da curva de pot\ \text{ência}
- (9)  $Pot\ \text{ência de eixo (kW)} = Pot\ \text{ência de eixo (CV)} \times 0,735$
- (10)  $Rendimento\ \text{do motor} (\%):$  Dado retirado da curva de rendimento do motor
- (11)  $Pot\ \text{ência consumida (kW)} = \frac{Pot\ \text{ência de eixo (kW)}}{Rendimento\ \text{do motor}}$
- (12)  $Fator\ \text{de pot\ \text{ência}:}$  Dado retirado da curva de fator de pot\ \text{ência do motor
- (13)  $Corrente\ Te\acute{o}rica\ (A) = \frac{Pot\ \text{ência Consumida}}{Tens\ \text{ão} \times Fator\ \text{de Pot\ \text{ência}} \times \sqrt{3}}$
- (14)  $Custo\ \text{de energia el\ \text{étrica}}\ (5\ \text{minutos de funcionamento}) = Pot\ \text{ência consumida} \times Tarifa\ \text{de energia el\ \text{étrica}} \times N\acute{u}mero\ \text{de bombas em paralelo}$
- (15)  $\frac{Volume\ \text{de \u00e1gua bombeada}}{Pot\ \text{ência consumida}}$
- (16)  $\frac{Custo\ \text{de energia el\ \text{étrica}}}{Volume\ \text{de \u00e1gua bombeada}}$
- (17)  $Fator\ \text{de carga} = \frac{Pot\ \text{ência de eixo (CV)}}{Pot\ \text{ência nominal do motor}}$

## APÊNDICE C – PLANILHA DE ANÁLISE HIDRÁULICA E ELÉTRICA DA BOMBA IMBIL – MODELO: INI 80-200

### DADOS DA ESTAÇÃO

Estação de Bombeamento:	EBAT Santa Fé
Data:	05/09/2013
Marca/Modelo da(s) bomba(s):	Imbil - INI 80-200
Marca/Modelo do(s) motor(es):	WEG - 250 S/M
Potência nominal do(s) motor(es) (CV):	100

### CURVAS DO MOTOR

Carga	Rendimento (%)	Carga	Fator de Potência
50%	93,5	50%	0,82
75%	94,3	75%	0,88
100%	94,3	100%	0,9
125%	93,5	125%	0,88

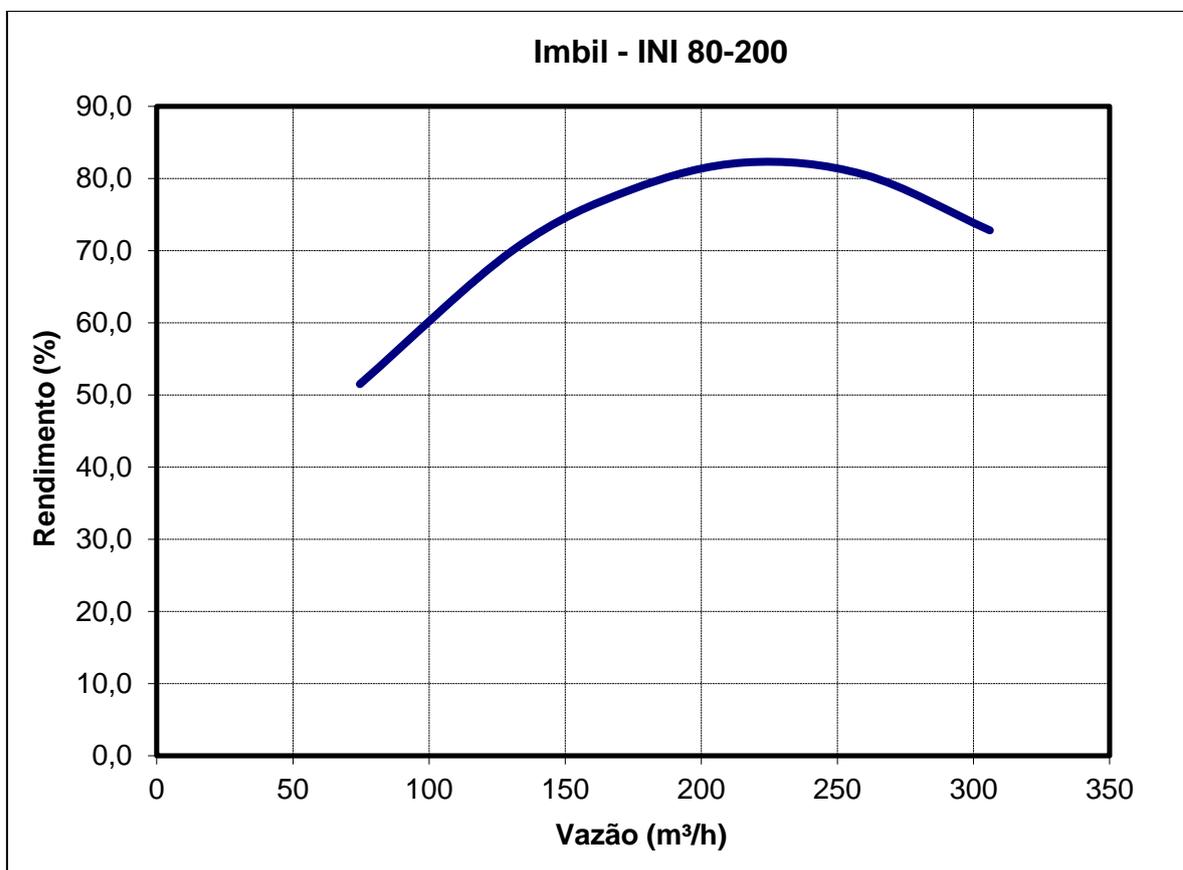
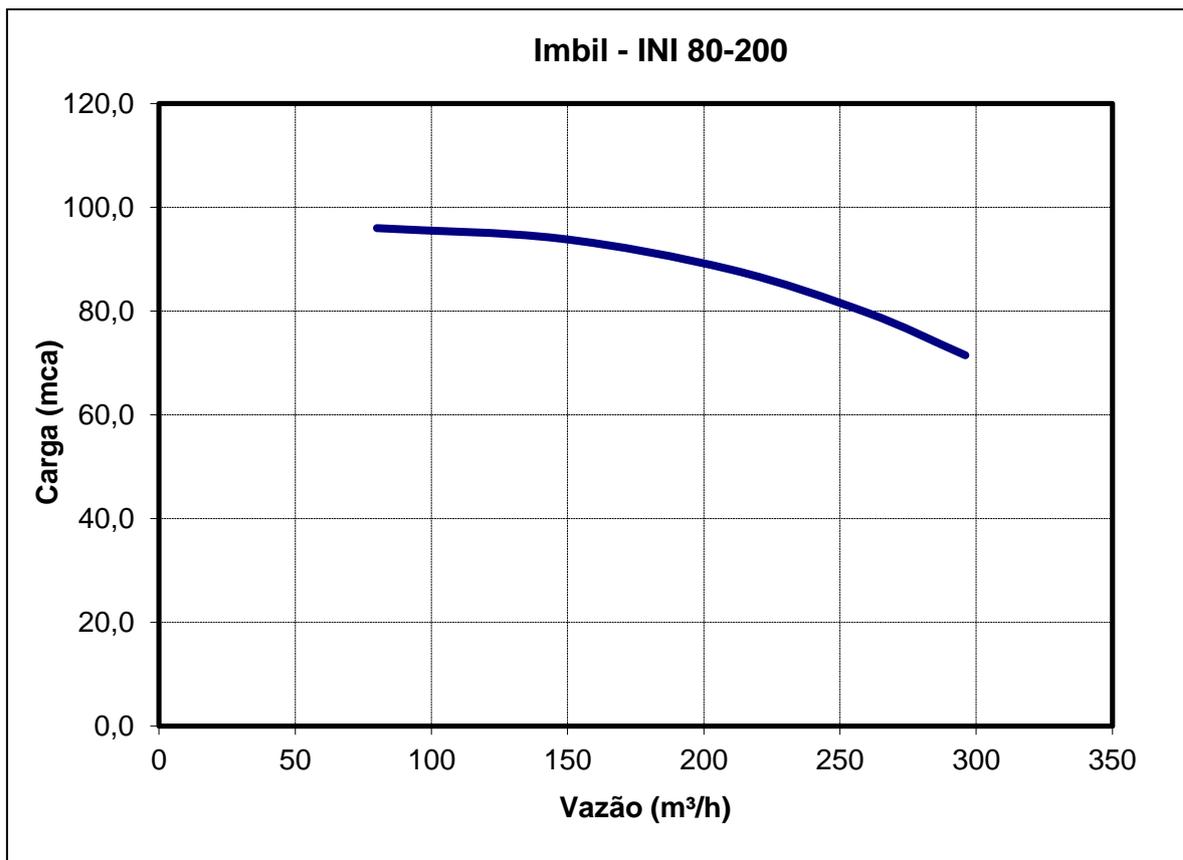
### DADOS HIDRÁULICOS E ELÉTRICOS

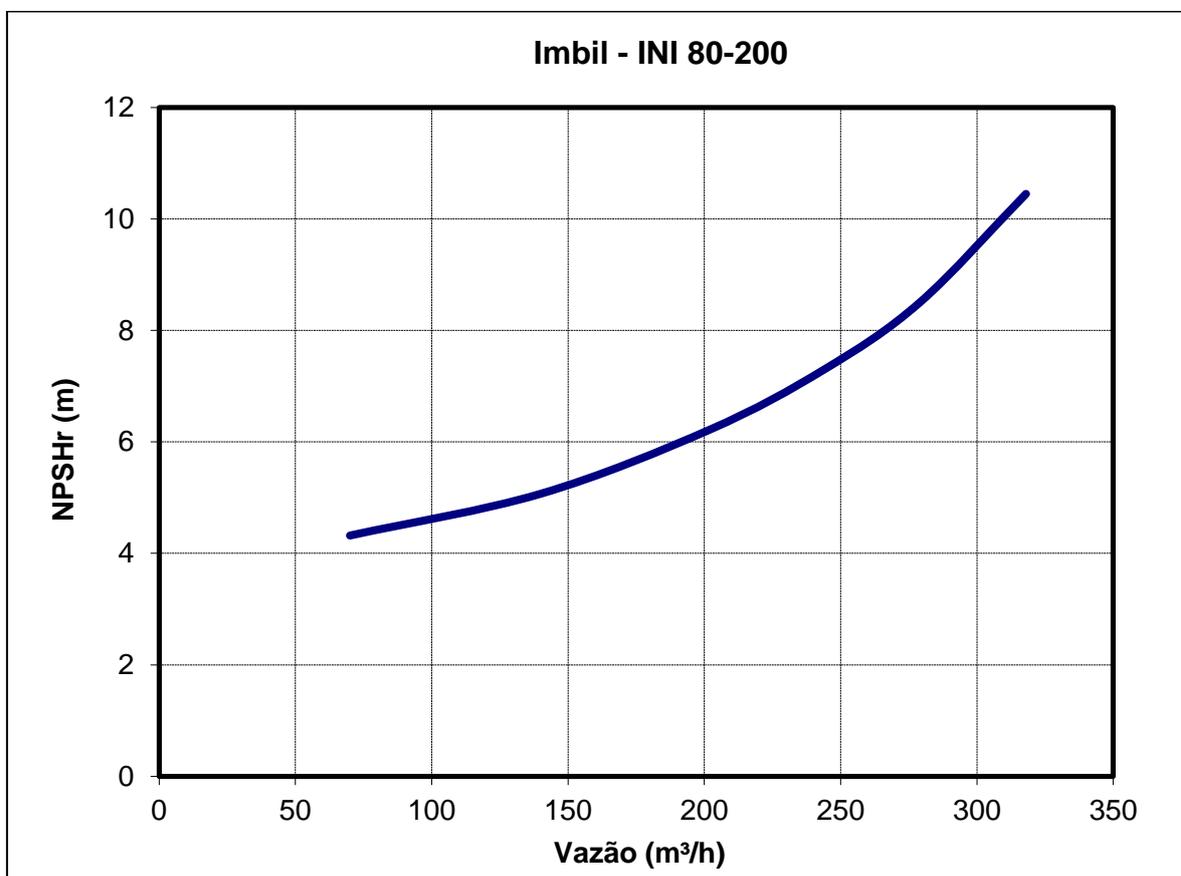
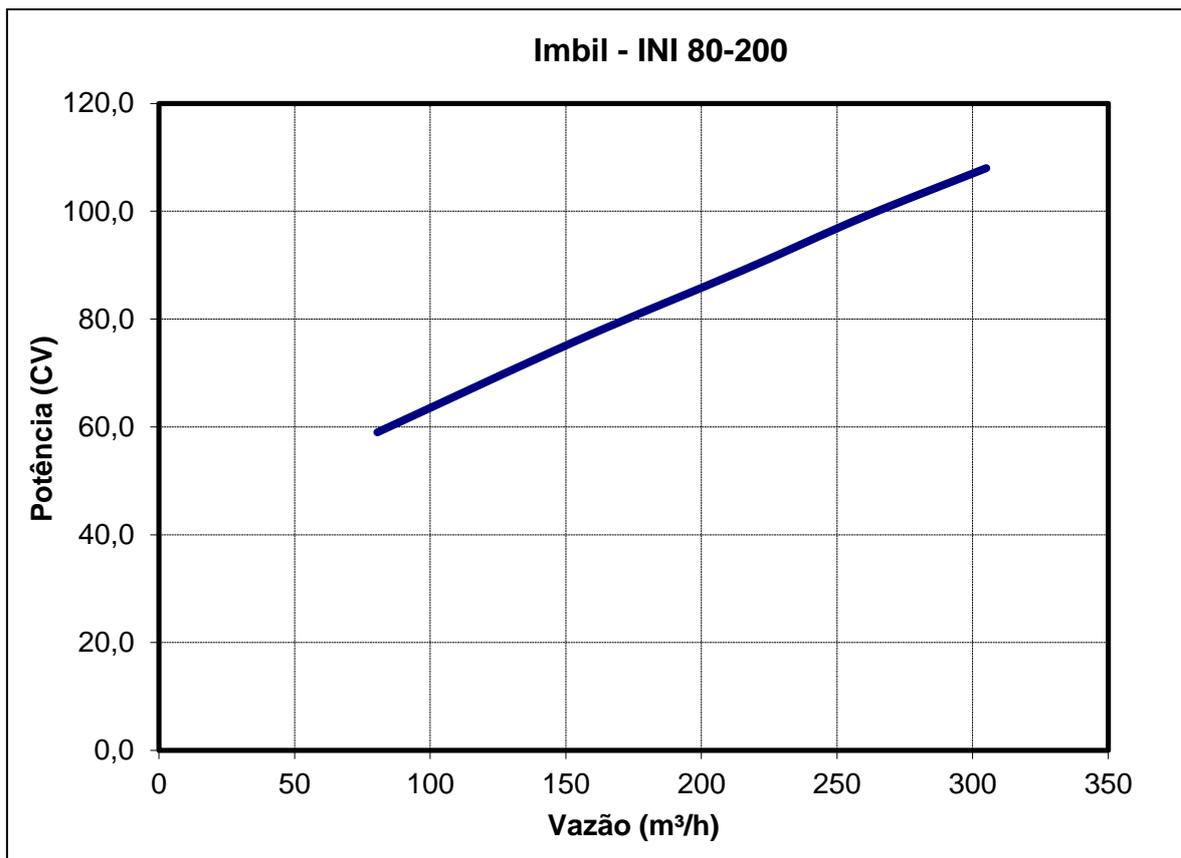
Fator de projeção de crescimento populacional:	1
Número de bombas em paralelo:	2
Altitude da Estação de Bomb.:	800
$\gamma$ (kgf/m <sup>3</sup> ) - Água - 15°C: Henn, 2006 Pág. 139	999
pa/ $\gamma$ - Água - 15°C: Henn, 2006 - Pág. 142	9,4506
pv/ $\gamma$ - Água - 15°C: Henn, 2006 - Pág. 139	0,1742
Perda de carga sucção:	1
Tensão da rede (V):	380
Fator de Potência da Instalação:	0,95
Tarifa (R\$/kWh):	0,144611
Tarifa (R\$/(kWh/12)):	0,012050917

### CURVAS DA BOMBA

Q (m <sup>3</sup> /h)	Carga (mca)	Q (m <sup>3</sup> /h)	Potência (CV)
80	96,0	80,5	59,0
147	94,0	154	76,0
210	88,0	215	89,0
260	79,7	260	99,0
296	71,5	305	108,0

Q (m <sup>3</sup> /h)	Rendimento (%)	Q (m <sup>3</sup> /h)	NPSHr (m)
74,6	51,5	70	4,32
131	70,1	140	5,07
174	78,4	202	6,22
216	82,2	244	7,3
260	80,5	279	8,5
306	72,8	318	10,45





## Custo Diário - Energia Elétrica

22/jul	Segunda	R\$ 398,48
23/jul	Terça	R\$ 392,61
24/jul	Quarta	R\$ 397,31
25/jul	Quinta	R\$ 397,64
26/jul	Sexta	R\$ 397,54
27/jul	Sábado	R\$ 403,71
28/jul	Domingo	R\$ 399,04

## Tarifa de Energia Elétrica

Estimada - Planilha

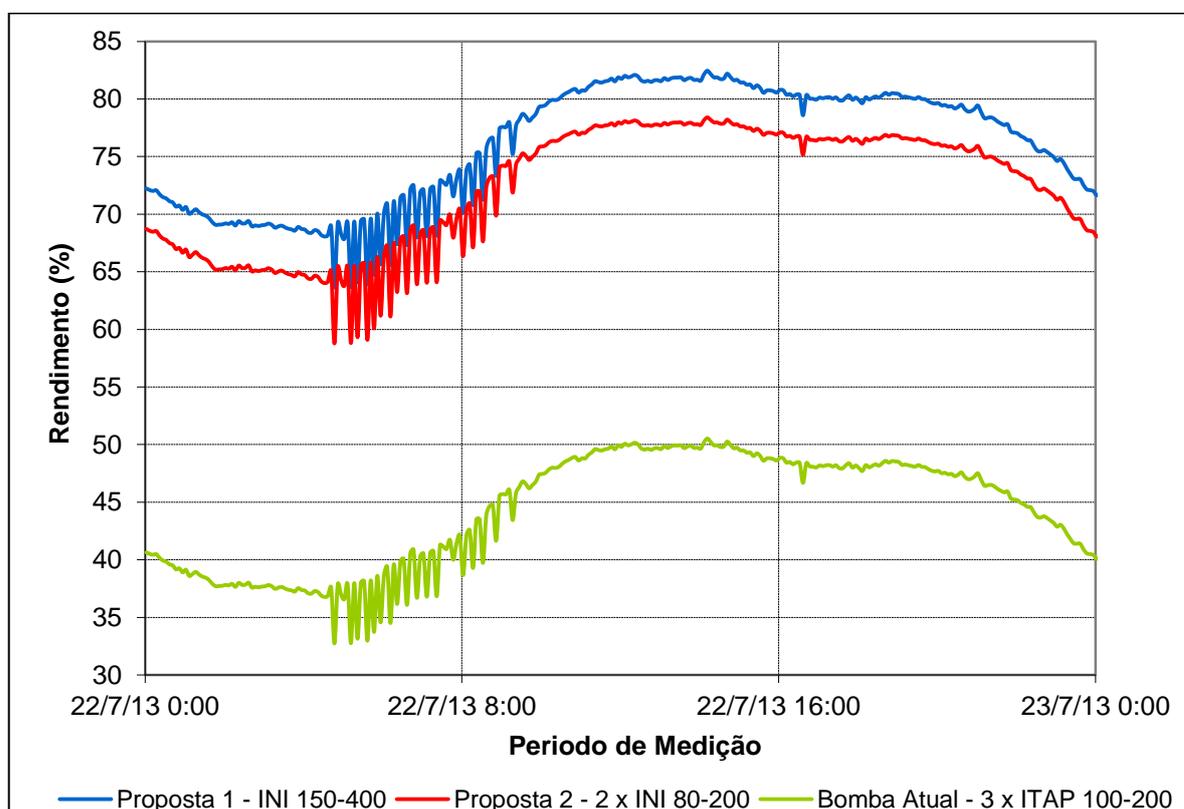
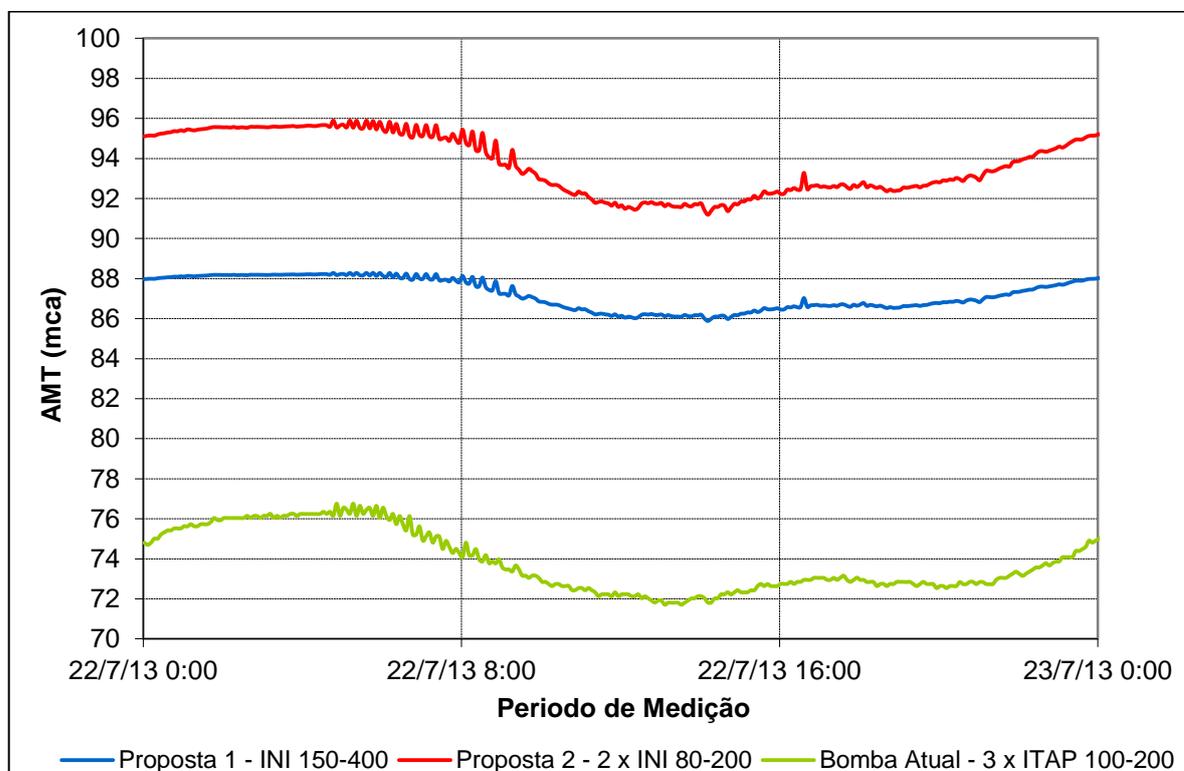
R\$ 13.135,57

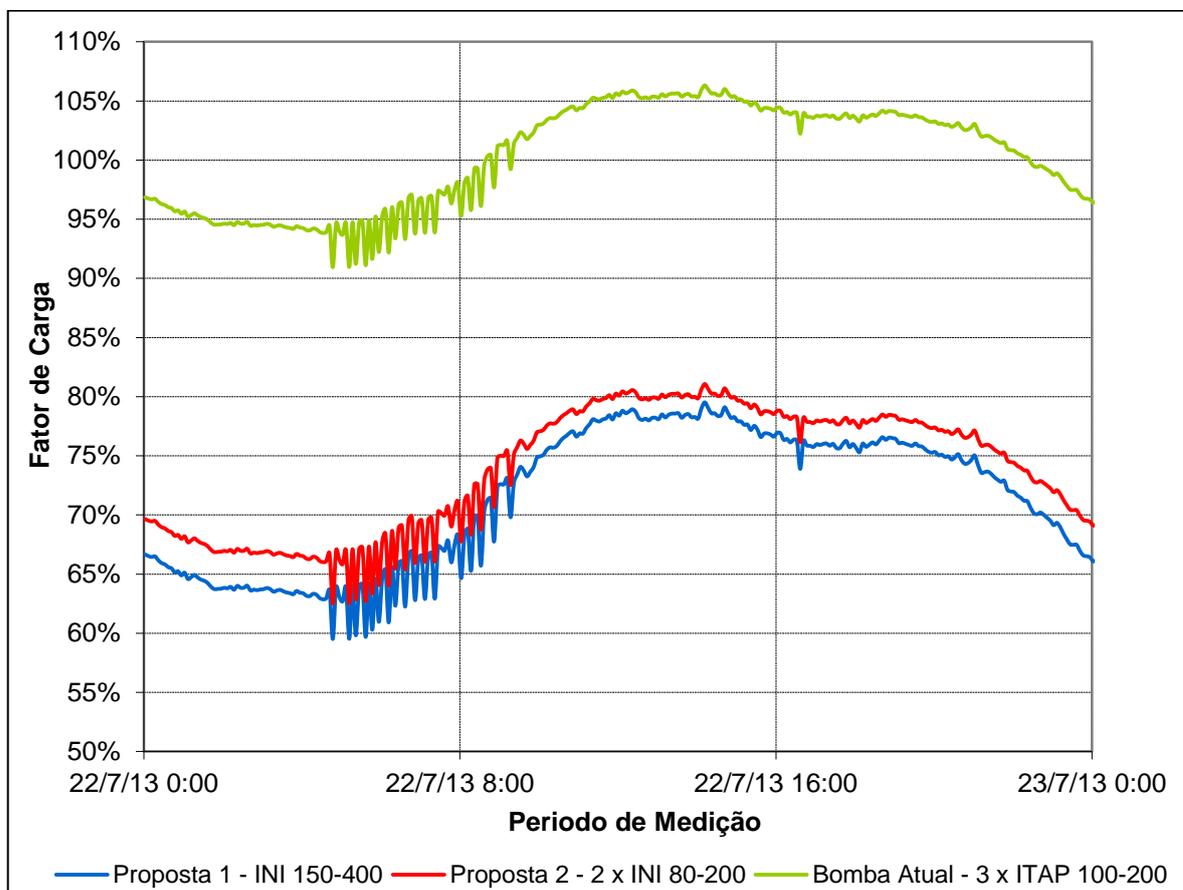
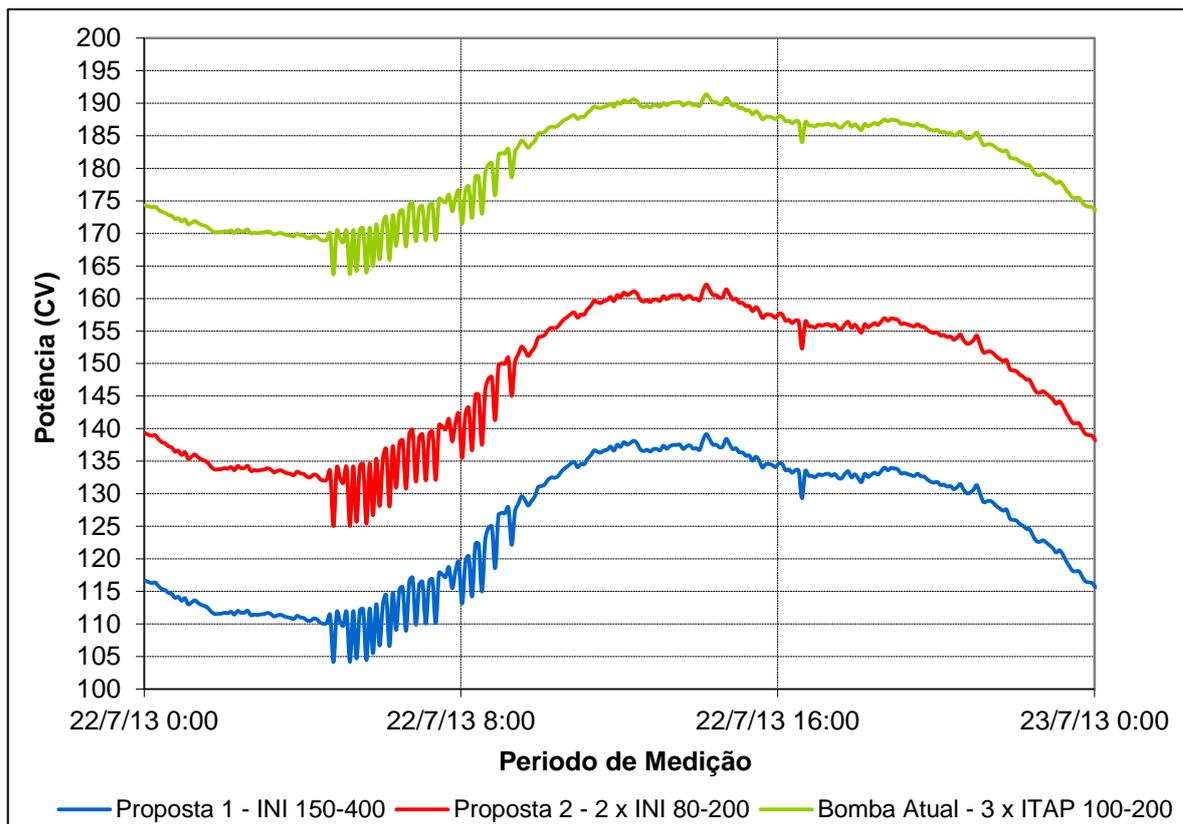
MEDIÇÕES						RESULTADOS															
Ponto	Data/Hora	Vazão Real (m³/h)	Pressão Recalque (mca)	Pressão Sucção (mca)	AMT Real (mca) - (1)	Vazão Projetada (m³/h) - (2)	Vazão Individual (m³/h) - (3)	AMT Teórico (mca) - (4)	NPSHr Teórico (mca) - (5)	Znáz (m) - (6)	Rendimento (%) - (7)	Potência de Eixo (CV) - (8)	Potência de Eixo (kW) - (9)	Rendimento Motor (%) - (10)	Potência Consumida (kW) - (11)	Fator de Potência - (12)	Corrente (A) - (13)	Custo de Energia Elétrica (R\$) - (14)	m³/kW - (15)	R\$/m³ - (16)	Fator de Carga - (17)
1	22/07/2013 00:01	254,35	74,52	-0,28	74,8	254,35	127,17	95,11	5,09	-3,18	68,71	69,65	51,19	94,39%	54,24	0,880	93,62	R\$ 1,31	0,3908	0,0617	69,65%
2	22/07/2013 00:06	253,18	74,52	-0,18	74,7	253,18	126,59	95,13	5,09	-3,19	68,56	69,52	51,10	94,39%	54,14	0,880	93,48	R\$ 1,30	0,3897	0,0618	69,52%
3	22/07/2013 00:11	252,50	74,63	-0,18	74,81	252,50	126,25	95,15	5,08	-3,20	68,47	69,45	51,04	94,38%	54,08	0,880	93,40	R\$ 1,30	0,3891	0,0619	69,45%
4	22/07/2013 00:16	252,98	75,04	0,03	75,01	252,98	126,49	95,14	5,08	-3,19	68,53	69,50	51,08	94,39%	54,12	0,880	93,46	R\$ 1,30	0,3895	0,0619	69,50%
5	22/07/2013 00:21	250,13	75,14	0,13	75,01	250,13	125,07	95,20	5,06	-3,21	68,16	69,19	50,85	94,38%	53,88	0,879	93,12	R\$ 1,30	0,3868	0,0623	69,19%
6	22/07/2013 00:26	248,07	75,35	0,13	75,22	248,07	124,04	95,24	5,05	-3,23	67,89	68,96	50,69	94,37%	53,71	0,879	92,88	R\$ 1,29	0,3849	0,0626	68,96%
7	22/07/2013 00:31	247,17	75,55	0,23	75,32	247,17	123,59	95,26	5,04	-3,24	67,77	68,87	50,62	94,37%	53,64	0,878	92,77	R\$ 1,29	0,3840	0,0628	68,87%
8	22/07/2013 00:36	245,14	75,65	0,23	75,42	245,14	122,57	95,30	5,03	-3,25	67,49	68,65	50,45	94,36%	53,47	0,878	92,53	R\$ 1,29	0,3821	0,0631	68,65%
9	22/07/2013 00:41	244,29	75,76	0,34	75,42	244,29	122,14	95,31	5,02	-3,26	67,38	68,55	50,39	94,36%	53,40	0,878	92,43	R\$ 1,29	0,3812	0,0632	68,55%
10	22/07/2013 00:46	241,30	75,86	0,34	75,52	241,30	120,65	95,37	5,00	-3,28	66,97	68,23	50,15	94,35%	53,15	0,877	92,08	R\$ 1,28	0,3783	0,0637	68,23%
11	22/07/2013 00:51	242,08	75,96	0,44	75,52	242,08	121,04	95,35	5,00	-3,27	67,07	68,31	50,21	94,35%	53,21	0,877	92,17	R\$ 1,28	0,3791	0,0636	68,31%
12	22/07/2013 00:56	239,04	75,96	0,44	75,52	239,04	119,52	95,41	4,98	-3,30	66,65	67,98	49,96	94,34%	52,96	0,876	91,81	R\$ 1,28	0,3761	0,0641	67,98%
13	22/07/2013 01:01	241,05	76,17	0,54	75,63	241,05	120,53	95,37	5,00	-3,28	66,93	68,20	50,13	94,35%	53,13	0,877	92,05	R\$ 1,28	0,3781	0,0637	68,20%
14	22/07/2013 01:06	236,34	76,27	0,65	75,62	236,34	118,17	95,45	4,96	-3,31	66,27	67,68	49,75	94,33%	52,74	0,876	91,50	R\$ 1,27	0,3735	0,0645	67,68%
15	22/07/2013 01:11	237,83	76,48	0,75	75,73	237,83	118,92	95,43	4,97	-3,30	66,48	67,85	49,87	94,34%	52,86	0,876	91,67	R\$ 1,27	0,3749	0,0643	67,85%
16	22/07/2013 01:16	239,43	76,48	0,85	75,63	239,43	119,71	95,40	4,98	-3,29	66,71	68,02	49,99	94,34%	52,99	0,877	91,86	R\$ 1,28	0,3765	0,0640	68,02%
17	22/07/2013 01:21	237,41	76,58	0,95	75,63	237,41	118,71	95,44	4,97	-3,31	66,42	67,80	49,83	94,34%	52,83	0,876	91,62	R\$ 1,27	0,3745	0,0644	67,80%
18	22/07/2013 01:26	235,87	76,68	0,95	75,73	235,87	117,93	95,46	4,96	-3,32	66,20	67,63	49,71	94,33%	52,70	0,876	91,44	R\$ 1,27	0,3730	0,0646	67,63%
19	22/07/2013 01:31	235,02	76,79	1,06	75,73	235,02	117,51	95,47	4,95	-3,32	66,08	67,54	49,64	94,33%	52,63	0,875	91,34	R\$ 1,27	0,3722	0,0648	67,54%
20	22/07/2013 01:36	233,38	76,89	1,16	75,73	233,38	116,69	95,50	4,94	-3,34	65,85	67,36	49,51	94,32%	52,49	0,875	91,15	R\$ 1,27	0,3705	0,0650	67,36%
21	22/07/2013 01:41	230,57	77,09	1,26	75,83	230,57	115,29	95,54	4,92	-3,36	65,44	67,05	49,28	94,31%	52,26	0,874	90,82	R\$ 1,26	0,3677	0,0655	67,05%
22	22/07/2013 01:46	228,80	77,3	1,26	76,04	228,80	114,40	95,57	4,91	-3,37	65,18	66,86	49,14	94,31%	52,11	0,874	90,61	R\$ 1,26	0,3659	0,0659	66,86%
23	22/07/2013 01:51	228,96	77,3	1,36	75,94	228,96	114,48	95,57	4,91	-3,37	65,20	66,88	49,15	94,31%	52,12	0,874	90,63	R\$ 1,26	0,3661	0,0658	66,88%
24	22/07/2013 01:56	229,08	77,4	1,47	75,93	229,08	114,54	95,56	4,91	-3,37	65,22	66,89	49,16	94,31%	52,13	0,874	90,64	R\$ 1,26	0,3662	0,0658	66,89%
25	22/07/2013 02:01	229,75	77,51	1,47	76,04	229,75	114,87	95,55	4,91	-3,36	65,32	66,96	49,22	94,31%	52,19	0,874	90,72	R\$ 1,26	0,3669	0,0657	66,96%
26	22/07/2013 02:06	229,43	77,61	1,57	76,04	229,43	114,71	95,56	4,91	-3,36	65,27	66,93	49,19	94,31%	52,16	0,874	90,68	R\$ 1,26	0,3665	0,0658	66,93%
27	22/07/2013 02:11	230,51	77,61	1,57	76,04	230,51	115,26	95,54	4,92	-3,36	65,43	67,05	49,28	94,31%	52,25	0,874	90,81	R\$ 1,26	0,3676	0,0656	67,05%
28	22/07/2013 02:16	228,35	77,71	1,67	76,04	228,35	114,18	95,57	4,91	-3,37	65,11	66,81	49,11	94,30%	52,07	0,874	90,56	R\$ 1,26	0,3654	0,0660	66,81%
29	22/07/2013 02:21	231,26	77,71	1,67	76,04	231,26	115,63	95,53	4,93	-3,35	65,54	67,13	49,34	94,31%	52,31	0,874	90,90	R\$ 1,26	0,3684	0,0654	67,13%
30	22/07/2013 02:26	229,77	77,81	1,77	76,04	229,77	114,89	95,55	4,91	-3,36	65,32	66,97	49,22	94,31%	52,19	0,874	90,72	R\$ 1,26	0,3669	0,0657	66,97%
31	22/07/2013 02:31	229,86	77,81	1,77	76,04	229,86	114,93	95,55	4,92	-3,36	65,34	66,98	49,23	94,31%	52,20	0,874	90,73	R\$ 1,26	0,3670	0,0657	66,98%
32	22/07/2013 02:36	231,39	77,92	1,77	76,15	231,39	115,69	95,53	4,93	-3,35	65,56	67,14	49,35	94,32%	52,32	0,874	90,91	R\$ 1,26	0,3685	0,0654	67,14%
33	22/07/2013 02:41	227,77	77,92	1,88	76,04	227,77	113,89	95,58	4,90	-3,38	65,03	66,75	49,06	94,30%	52,02	0,874	90,49	R\$ 1,25	0,3649	0,0661	66,75%
34	22/07/2013 02:46	228,40	78,12	1,98	76,14	228,40	114,20	95,57	4,91	-3,37	65,12	66,82	49,11	94,30%	52,08	0,874	90,56	R\$ 1,26	0,3655	0,0659	66,82%
35	22/07/2013 02:51	227,99	78,12	1,98	76,14	227,99	113,99	95,58	4,90	-3,37	65,06	66,77	49,08	94,30%	52,04	0,874	90,51	R\$ 1,25	0,3651	0,0660	66,77%
36	22/07/2013 02:56	228,53	78,12	2,08	76,04	228,53	114,26	95,57	4,91	-3,37	65,14	66,83	49,12	94,31%	52,09	0,874	90,58	R\$ 1,26	0,3656	0,0659	66,83%
37	22/07/2013 03:01	228,77	78,23	2,08	76,15	228,77	114,39	95,57	4,91	-3,37	65,18	66,86	49,14	94,31%	52,11	0,874	90,61	R\$ 1,26	0,3659	0,0659	66,86%
38	22/07/2013 03:06	229,65	78,23	2,08	76,15	229,65	114,83	95,56	4,91	-3,36	65,31	66,95	49,21	94,31%	52,18	0,874	90,71	R\$ 1,26	0,3668	0,0657	66,95%
39	22/07/2013 03:11	228,79	78,33	2,08	76,25	228,79	114,40	95,57	4,91	-3,37	65,18	66,86	49,14	94,31%	52,11	0,874	90,61	R\$ 1,26	0,3659	0,0659	66,86%
40	22/07/2013 03:16	226,86	78,23	2,18	76,05	226,86	113,43	95,60	4,89	-3,38	64,89	66,65	48,99	94,30%	51,95	0,873	90,38	R\$ 1,25	0,3639	0,0662	66,65%

**Legendas:**

- (1)  $AMT\ Real = Press\ \text{de}\ recalque - Press\ \text{de}\ Suc\ \text{\c{c}}\ \text{a}\ \text{o}$
- (2)  $Vaz\ \text{a}\ \text{o}\ Proj\ \text{e}\ \text{t}\ \text{a}\ \text{d}\ \text{a} = Vaz\ \text{a}\ \text{o}\ Real \times Fator\ \text{de}\ proje\ \text{\c{c}}\ \text{a}\ \text{o}\ \text{de}\ crescimento$
- (3)  $Vaz\ \text{a}\ \text{o}\ Individual = \frac{Vaz\ \text{a}\ \text{o}\ Real}{N\ \text{u}\ \text{m}\ \text{e}\ \text{r}\ \text{o}\ \text{de}\ bombas\ \text{em}\ paralelo}$
- (4)  $AMT\ T\ \text{e}\ \text{o}\ \text{r}\ \text{i}\ \text{c}\ \text{o}\ (m):$  Dado retirado da curva de carga
- (5)  $NPSHr\ T\ \text{e}\ \text{o}\ \text{r}\ \text{i}\ \text{c}\ \text{o}\ (m):$  Dado retirado da curva de NPSHr
- (6)  $Z_{m\ \text{a}\ \text{x}}(m) = \pm \left[ NPSHr - \frac{p_a - p_v}{\gamma} + Perda\ \text{de}\ Carga\ Suc\ \text{\c{c}}\ \text{a}\ \text{o} \right]$
- (7)  $Rendimento\ (\%):$  Dado retirado da curva de rendimento
- (8)  $Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{de}\ eixo\ (CV):$  Dado retirado da curva de pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}
- (9)  $Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{de}\ eixo\ (kW) = Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{de}\ eixo\ (CV) \times 0,735$
- (10)  $Rendimento\ \text{do}\ motor\ (\%):$  Dado retirado da curva de rendimento do motor
- (11)  $Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{consumida}\ (kW) = \frac{Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{de}\ eixo\ (kW)}{Rendimento\ \text{do}\ motor}$
- (12)  $Fator\ \text{de}\ pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}:$  Dado retirado da curva de fator de pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{do}\ motor
- (13)  $Corrente\ Te\ \text{o}\ \text{r}\ \text{i}\ \text{c}\ \text{a}\ (A) = \frac{Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ Consumida}{Tens\ \text{a}\ \text{o} \times Fator\ \text{de}\ Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a} \times \sqrt{3}}$
- (14)  $Custo\ \text{de}\ energia\ el\ \text{e}\ \text{t}\ \text{r}\ \text{i}\ \text{c}\ \text{a}\ (5\ \text{minutos}\ \text{de}\ funcionamento) = Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{consumida} \times Tarifa\ \text{de}\ energia\ el\ \text{e}\ \text{t}\ \text{r}\ \text{i}\ \text{c}\ \text{a} \times N\ \text{u}\ \text{m}\ \text{e}\ \text{r}\ \text{o}\ \text{de}\ bombas\ \text{em}\ paralelo$
- (15)  $\frac{Volume\ \text{de}\ \text{a}\ \text{g}\ \text{u}\ \text{a}\ \text{bom}\ \text{b}\ \text{e}\ \text{a}\ \text{d}\ \text{a}}{Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{consumida}}$
- (16)  $\frac{Custo\ \text{de}\ energia\ el\ \text{e}\ \text{t}\ \text{r}\ \text{i}\ \text{c}\ \text{a}}{Volume\ \text{de}\ \text{a}\ \text{g}\ \text{u}\ \text{a}\ \text{bom}\ \text{b}\ \text{e}\ \text{a}\ \text{d}\ \text{a}}$
- (17)  $Fator\ \text{de}\ carga = \frac{Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{de}\ eixo\ (CV)}{Pot\ \text{e}\ \text{n}\ \text{c}\ \text{i}\ \text{a}\ \text{nominal}\ \text{do}\ motor}$

## APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA A TROCA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO





## APÊNDICE E – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA PARA CONTROLE DOS VALORES DE PRESSÃO

