



**Universidade Federal do Rio de Janeiro**  
**Escola Politécnica & Escola de Química**  
**Programa de Engenharia Ambiental**

Mauro Pilotto Domingues

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE ACOPLAMENTOS  
HIDRODINÂMICOS EM CONJUNTOS MOTOBOMBAS DE  
MÉDIA TENSÃO: APLICAÇÃO NO SETOR DE SANEAMENTO**

Rio de Janeiro

2012



**UFRJ**

Mauro Pilotto Domingues

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE ACOPLAMENTOS  
HIDRODINÂMICOS EM CONJUNTOS MOTOBOMBAS DE  
MÉDIA TENSÃO: APLICAÇÃO NO SETOR DE SANEAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Isaac Volschan Júnior

Rio de Janeiro

2012

Domingues, Mauro Pilotto

Avaliação do emprego de acoplamentos hidrodinâmicos em conjuntos motobombas de média tensão: Aplicação no setor de Saneamento / Mauro Pilotto Domingues - Rio de Janeiro - 2012.

xvii, 138 f.: 58 il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, 2012.

Orientador: Isaac Volschan Júnior

1. Bombas centrífugas. 2. Acoplamentos hidrodinâmicos. 3. Saneamento. 3. Estações elevatórias. 4. Motobombas de média tensão. 5. Variação de rotação. I. Volschan Jr., Isaac. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química. III. Título.



**UFRJ**

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE ACOPLAMENTOS  
HIDRODINÂMICOS EM CONJUNTOS MOTOBOMBAS DE  
MÉDIA TENSÃO: APLICAÇÃO NO SETOR DE SANEAMENTO**

Mauro Pilotto Domingues

Orientador: Isaac Volschan Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Rio de Janeiro, 22 de março de 2012.

Aprovada pela banca:

---

Isaac Volschan Júnior, *D.Sc.* – PEA / UFRJ

---

Gilberto Olympio Mota Fialho, *D.Sc.* - PEA / UFRJ

---

Theophilo Benedicto Ottoni Filho, *Ph.D.* – DRHIMA / UFRJ

---

Isaac José Antonio Luquetti dos Santos, *D.Sc.* - PEA / UFRJ

Aos meus grandes amores, Marina e Regina.  
Aos meus pais, Glória e Marildo (*in memoriam*), pelos valores transmitidos.  
Aos meus irmãos, sobrinhos e família, pelo exemplo e pela nossa união.

## **AGRADECIMENTOS:**

À minha esposa, Regina, pelo amor infinito, exemplo de pessoa e pelo dom de superar dificuldades com esperança, alegria e imenso bom humor.

À querida e linda Marina, um amor de filha e meu maior orgulho.

Aos meus sogros Engenheiros Carlos Henrique e Magnólia, pelos exemplos de vidas dedicadas à educação.

Ao Prof. Dr. Isaac Volschan Jr., pelos incentivos, dedicação e pela orientação nessa trajetória.

Ao Engenheiro Edes Oliveira, Gerente Geral da ETA Guandu / Lameirão, pelo grande e decisivo apoio e competência.

Ao Gerente de Divisão da ETE ABC, Michel Artur Margeri e equipe, que mesmo ocupadíssimos, sempre encontravam um tempo para me atenderem.

Aos Engenheiros Otávio Legg Neto, Júlio Antunes, Sebastião Moraes, Miguel Cunha, Clenilson Dias, José Brandão, Luiz Afonso Cordeiro, Rachel Andrade da Silva e Aguinaldo Tremontini pelas diversas instruções técnicas.

Aos Engenheiros Marcelo Romualdo, Gilberto Scopiato, Wanderley Rangel, Luiz Carlos Galves e, em especial, ao Thiago Duarte, pelos esclarecimentos técnicos, fundamentais para a realização desse trabalho.

Aos amigos, Ralf Dreckmann, Heidi Pauer, Felipe Teixeira, Leandro Lobo, Ralf Fünfer, Paulo Martins, Paula Martins Teixeira, Jorge Jappur, Johannes Luyten e Arlindo Queiroz, pelos incentivos e revisões.

À Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE) e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e seus profissionais, que muito colaboraram para a realização desta dissertação.

## RESUMO

Domingues, Mauro - Avaliação do emprego de acoplamentos hidrodinâmicos em conjuntos motobombas de média tensão: Aplicação no setor de Saneamento. Rio de Janeiro, 2012 - Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental - Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2012.

Este trabalho teve como objetivo realizar uma avaliação técnica e econômica da eficiência energética e confiabilidade em sistemas de bombeamento de média tensão aplicados ao esgotamento sanitário (EEF/ETE ABC - Caso I) e ao abastecimento de água (EE ARG/ETA Guandu - Caso II). Com este propósito, sistemas que empregam acoplamentos hidrodinâmicos (HC) e sistemas hipotéticos convencionais de rotação fixa e restrição por válvulas, acionados diretamente por motores elétricos de média tensão, foram comparados, utilizando como ferramenta o *software* EPANET. O estudo do Caso I revelou a contribuição dos HCs quanto ao desempenho hidráulico e energético. Uma considerável redução no custo operacional foi observada, de aproximadamente R\$ 443 mil por ano em energia elétrica, com um retorno do investimento em cinco anos, incluindo os três HCs / redutores. Com relação ao estudo de Caso II, simulações para as condições de operação do tipo “liga-desliga” das motobombas de média tensão operando em uma EE ETA, foi possível concluir que a implementação dos HCs é viável, apesar de não representar uma redução de despesas com energia elétrica. Todavia, essa pode ser uma solução atrativa para o caso estudado, objetivando diminuição de despesas com manutenção. Com relação aos índices de confiabilidade, MTBF e disponibilidade, calculados no estudo do Caso I (EEF ETE), para os HCs, foram detectados valores de 99,7%, 4,2 anos e 99,54%, respectivamente. A análise comparativa destes dados com os índices informados pelo fabricante, para a operação com HC, sugerem que a utilização do HC na EEF ETE, com acionamento em média tensão, está próxima dos resultados esperados, exceto para o MTBF, devido ao pequeno número de unidades avaliadas, bem como, pelo baixo tempo de uso.

Palavras-chave: Bombas centrífugas; Acoplamentos hidrodinâmicos;  
Saneamento

## ABSTRACT

Domingues, Mauro - Avaliação do emprego de acoplamentos hidrodinâmicos em conjuntos motobombas de média tensão: Aplicação no setor de Saneamento. Rio de Janeiro, 2012 - Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental - Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, 2012.

This work is a technical and economical evaluation of the energetic efficiency and reliability of medium voltage pumping systems used in sewage treatment plant (EEF/ETE ABC - Case I) and water high upsetting station (EE ARG/ETA Guandu - Case II). To this end, hydrodynamic coupling (HC) systems and directly-driven conventional systems (fixed-rotation electrical engines) were compared. Initially, Case I, a study using the EPANET software comparing the medium voltage HC pumping system of sewage treatment plant against an hypothetical situation with fixed-rotation and valve restriction revealed a significant contribution of the HC regarding hydraulic and energetic performance with a substantial reduction of R\$ 443,000.00 per year in operational costs. The results indicates a return on investment in 5 years, considering the acquisition & installation of three HCs/gearboxes. In a second study (Case II) , the operation of four medium voltage pumping system of a water treatment plant (ARG/ETA) in on/off mode, revealed that the investment for the implementation of HCs is technically feasible, but does not results in a reduction in electric energy consumption. Nevertheless, reductions in operational and maintenance costs are an appealing technical justification for this scenario. In the first study (Case I), the reliability, MTBF and availability indexes were respectively 99.7%, 4.2 years and 99.54%. These indexes regarding the application of medium voltage HCs in the sewage treatment plant are in line with the available manufacturer's data, except for the MTBF. This discrepancy might be justified by the small number of units tested, as well as the relatively short running times, since only one pumping train operates at a time, in a rotation schedule among the three available units.

Key-words: Centrifugal pumps; hydrodynamic couplings; Sanitary plants.



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABC - Santo André, São Bernardo e São Caetano

AMT - Altura Manométrica Total.

ARG - Alto Recalque do Guandu.

BEP - *Best Efficiency Point*

BRG - Baixo Recalque do Guandu.

CEDAE - Companhia Estadual de Águas e Esgotos.

CLP - Controlador Lógico Programável.

EE - Estação Elevatória.

EEF - Estação Elevatória Final.

ELETROBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras.

EPA - *Environmental Protection Agency*.

EPANET - *software* de simulação hidráulica.

ETA - Estação de Tratamento de Água.

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto.

FIPE - Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas.

HC - *Hydraulic Coupling*.

HPTE - *Hydrodynamic in Power Transmission Engineering*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

JMP - Join Monitoring Program.

MTBF - *Mean Time Between Failure*

MTTF - *Mean Time to Failure*

MTTR - *Mean Time to Repair*

NARG - Novo Alto Recalque do Guandu.

NBRG - Novo Baixo Recalque do Guandu.

NEZR - Nova Elevatória da Zona Rural.

NPSH - *Net Positive Suction Head*

OMS - Organização Mundial de Saúde

PAC - Programa de Aceleração do Crescimento.

PNAD - Plano Nacional de Amostra de Domicílio.

PNSB - Plano Nacional do Saneamento Básico

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

RNF - Reservatório de Nível Fixo.

RNV - Reservatório de Nível Variável.

SAA - Sistemas de Abastecimento de Água.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo.

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento.

SSC - Sistema de Supervisão e Controle.

VFTC - *Variable Speed Turbo Coupling*

VPL - Valor Presente Líquido

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 3.1</b> - Principais componentes de uma estação elevatória .....	13
<b>Figura 3.2</b> - Estação elevatória de poço seco e conjunto motobomba de eixo horizontal .....	15
<b>Figura 3.3</b> - Estação elevatória de poço úmido e conjunto motobomba de eixo vertical .....	16
<b>Figura 3.4</b> - Estação elevatória de poço úmido e conjunto motobomba de eixo vertical submerso .....	16
<b>Figura 3.5</b> - Classificação geral das bombas .....	21
<b>Figura 3.6</b> - Classificação das bombas centrífugas conforme a trajetória do líquido ao passar pelo rotor .....	22
<b>Figura 3.7</b> - Curva característica de bombas centrífugas .....	24
<b>Figura 3.8</b> - Ponto de operação de uma bomba centrífuga .....	25
<b>Figura 3.9</b> - Efeitos da operação fora da região de melhor eficiência .....	27
<b>Figura 3.10</b> - Relações conforme as leis da semelhança em bombas centrífugas .....	30
<b>Figura 3.11</b> - Efeito na curva de performance da variação de rotação em bombas centrífugas .....	31
<b>Figura 3.12</b> - Curva do sistema de associação de bombas em paralelo...	33
<b>Figura 3.13</b> - Curvas de associação de bombas centrífugas em série ....	34
<b>Figura 3.14</b> - Associação de bombas centrífugas em série .....	34
<b>Figura 3.15</b> - Classificação de motores elétricos .....	35
<b>Figura 3.16</b> - Motores de indução trifásico composto de 2 partes principais, rotor e estator .....	38
<b>Figura 3.17</b> - Forma de onda de um sistema trifásico .....	40
<b>Figura 3.18</b> - Curva do conjugado de partida x rotação .....	40
<b>Figura 3.19</b> - Curva característica de partida de um motor síncrono a plena tensão .....	41

<b>Figura 3.20</b> - Curvas comparativas entre partidas com e sem HC .....	42
<b>Figura 3.21</b> -Representação da conversão de energia estudada por Föttinger.....	45
<b>Figura 3.22</b> - Circuito de óleo no interior da câmara de trabalho .....	46
<b>Figura 3.23</b> - Principais componentes de um acoplamento hidrodinâmico .....	46
<b>Figura 3.24</b> - Curva característica de Potência x Rotação de HCs .....	47
<b>Figura 3.25</b> - Vista 3D em corte do acoplamento hidrodinâmico .....	49
<b>Figura 3.26</b> - Gráfico potência x escorregamento para equipamentos centrífugos .....	50
<b>Figura 3.27</b> - Curvas características torque x rotação de HCs .....	50
<b>Figura 3.28</b> - Vista externa e em corte parcial de HC .....	53
<b>Figura 3.29</b> - Seção transversal de HC tipo túnel .....	54
<b>Figura 3.30</b> - Acoplamento tipo túnel .....	55
<b>Figura 3.31</b> -Diagrama de seleção de HCs .....	57
<b>Figura 4.1</b> - Processo simplificado de tratamento da ETE ABC .....	60
<b>Figura 4.2</b> - Conjuntos motobombas com HCs na EE final, ETE ABC .....	61
<b>Figura 4.3</b> - Fotografia aérea da ETE ABC .....	62
<b>Figura 4.4</b> - Tomadas de água da ETA Guandu.....	64
<b>Figura 4.5</b> - Desarenadores, BRG e NBRG .....	64
<b>Figura 4.6</b> - Estações BRG e NBRG .....	64
<b>Figura 4.7</b> - ETA Guandu .....	64
<b>Figura 4.8</b> - Cinco conjuntos motobombas da EE ARG .....	65
<b>Figura 4.9</b> - Curva da banheira .....	74
<b>Figura 5.1</b> - Configuração dos componentes do sistema de recalque, ETE ABC.....	76
<b>Figura 5.2</b> - Curva da bomba da EE final, ETE ABC .....	77

<b>Figura 5.3</b> - Arranjo esquemático do recalque da EE final, ETE ABC .....	78
<b>Figura 5.4</b> - Perfil médio de operação ao longo de 24 horas, EE final, ETE ABC .....	80
<b>Figura 5.5</b> - Curva do sistema com controle de rotação por HC, EEF, ETE ABC .....	82
<b>Figura 5.6</b> - Fluxo de caixa do estudo de caso I, EE final, ETE ABC .....	86
<b>Figura 5.7</b> - Perfil “1” de operação ao longo de 24 horas (EPANET) .....	88
<b>Figura 5.8</b> - Perfil “2” de operação ao longo de 24 horas (EPANET) .....	89
<b>Figura 5.9</b> - Confiabilidade de acoplamentos hidrodinâmicos .....	90
<b>Figura 5.10</b> - Cálculo de MTBF e disponibilidade de acoplamentos hidrodinâmicos .....	90
<b>Figura 5.11</b> - Vista aérea do recalque da ARG para o reservatório do Marapicu .....	94
<b>Figura 5.12</b> - Curva de performance da bomba 16 LN 35, EE ARG .....	95
<b>Figura 5.13</b> - Arranjo esquemático do recalque da EE ARG .....	96
<b>Figura 5.14</b> - Perfil médio de operação ao longo de 24 horas, EE ARG... ..	98
<b>Figura 5.15</b> - Curva do sistema com controle de rotação por HC, EE ARG.....	102
<b>Figura 5.16</b> - Perfil “2” de operação ao longo de 24 horas (EPANET) .....	108
<b>Figura 5.17</b> - Programação do controle de válvula (EPANET) .....	109
<b>Figura 5.18</b> - Perfil “3” de operação ao longo de 24 horas (EPANET) .....	110

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> - Dados de estações de bombeamento com VFD de média tensão.....	02
<b>Tabela 02</b> - Níveis de atendimento com água e esgoto dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2009, segundo região geográfica e Brasil .....	07
<b>Tabela 03</b> - Investimentos realizados em 2009 de acordo com as informações dos prestadores de serviços participantes do SNIS, segundo região geográfica e tipo de contratante das obras .....	09
<b>Tabela 04</b> - Investimentos realizados em 2009 de acordo com as informações dos prestadores de serviços participantes do SNIS, segundo estados da Federação .....	11
<b>Tabela 05</b> - Dados das bombas da EE final, ETE ABC .....	78
<b>Tabela 06</b> - Dados dos motores elétricos da EE final, ETE ABC .....	79
<b>Tabela 07</b> - Dados dos HCs da EE final, ETE ABC.....	79
<b>Tabela 08</b> - Dados dos redutores da EE final, ETE ABC.....	80
<b>Tabela 09</b> - Dados obtidos após simulação no EPANET de uma bomba operando com HC em diferentes rotações e tempo.....	83
<b>Tabela 10</b> - Dados obtidos após simulação no EPANET de operação com restrição por válvula.....	84
<b>Tabela 11</b> - Fluxo de caixa com VPL para o estudo de caso I, ETE ABC...	86
<b>Tabela 12</b> - Dados das bombas da EE ARG, ETA Guandu.....	96
<b>Tabela 13</b> - Dados dos motores elétricos da EE ARG, ETA Guandu.....	97
<b>Tabela 14</b> - Parâmetros operacionais da EE ARG ao longo de 24 horas...	98
<b>Tabela 15</b> - Dados obtidos após simulação com restrição por válvula.....	101
<b>Tabela 16</b> - Dados obtidos após simulação de operação “liga-desliga” .....	101

<b>Tabela 17</b> - Dados obtidos após simulação com HC a 1.175 rpm com vazão de 4.000 ℓ/s por 15 horas.....	103
<b>Tabela 18</b> - Dados obtidos após simulação com HC a 1.040 rpm com vazão de 3.000 ℓ/s por 6 horas.....	103
<b>Tabela 19</b> - Dados obtidos após simulação com HC a 1.000 rpm com vazão de 2.000 ℓ/s por 3 horas.....	104
<b>Tabela 20</b> - Comparação de consumo energético entre as simulações A, B e C (EE ARG).....	104
<b>Tabela 21</b> - Comparativo de custo entre as simulações com HC na EE ARG.....	105

## LISTAS DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Reservatório de sucção - ETE ABC .....	87
<b>Quadro 2</b> - Tubulações - ETE ABC .....	87
<b>Quadro 3</b> - Reservatório de recalque - ETE ABC ... ..	87
<b>Quadro 4</b> - Reservatório de sucção - EE ARG .....	109
<b>Quadro 5</b> - Tubulações - EE ARG .....	109
<b>Quadro 6</b> - Válvulas de gaveta - EE ARG .....	109
<b>Quadro 7</b> - Reservatório de recalque - EE ARG .....	109

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>04</b>
2.1 - Objetivo Geral.....	04
2.2 - Objetivos Específicos.....	04
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>06</b>
3.1 - Saneamento e Energia .....	06
3.2 - Investimentos no setor de saneamento.....	08
3.3 - Estações elevatórias.....	12
3.3.1 - Tipos de estações elevatórias empregadas no SAA .....	14
3.3.2 - Procedimentos operacionais convencionais.....	17
3.3.3 - Eficiência energética em estações elevatórias.....	18
3.3.4 - Consumo e custo de energia em EE.....	19
3.4 – Bombas.....	21
3.4.1 - Classificação das bombas.....	21
3.4.2 - Classificação das bombas centrífugas.....	22
3.4.3 - Curvas de desempenho de bombas centrífugas.....	23
3.4.4 - Curva do sistema.....	25
3.4.5 - Perda de carga.....	25
3.4.6 - Variação de rotação de bombas centrífugas.....	28



3.4.7 - Associação de bombas centrífugas.....	32
3.4.7.1 - Associação em paralelo.....	32
3.4.7.2 - Associação em série.....	33
3.5 - Motores elétricos .....	35
3.5.1 - Classificação de motores elétricos.....	35
3.5.2 - Motores elétricos de corrente alternada.....	36
3.5.2.1 - Motores síncronos.....	36
3.2.2.2 - Motores de indução.....	37
3.5.3 - Princípio de funcionamento.....	38
3.5.4 - Conjugado de partida.....	40
3.5.5 - Rotores e eixos.....	42
3.5.6 - Mancais e Lubrificação.....	42
3.6 - Acoplamentos hidrodinâmicos .....	44
3.6.1 - Princípio de funcionamento.....	44
3.6.2 - Curvas características de HCs.....	49
3.6.3 - Aplicação de acoplamentos hidrodinâmicos.....	51
3.6.4 - Construção de acoplamentos hidrodinâmicos.....	52
3.6.5 - Acoplamentos hidrodinâmicos tipo túnel .....	54
3.6.6 - Características gerais de acoplamentos hidrodinâmicos.....	55
3.6.7 - Dimensionamento de acoplamentos hidrodinâmicos.....	56
3.6.8 - Sistema de lubrificação de HCs.....	57
3.6.9 - Sistema de controle e considerações sobre HCs.....	57
3.7 - Descrição do <i>software</i> EPANET .....	58
3.8 - Índices de confiabilidade, MTBF e Disponibilidade .....	59
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>62</b>
4.1 - Estudo de Caso I - EE Final - ETE ABC / SABESP.....	62

4.1.1 - Estudo realizado.....	62
4.1.2 - Descrição da estação de tratamento ETE ABC .....	62
4.1.3 - Processo de tratamento de esgoto da ETE ABC.....	63
4.1.4 - Dados operacionais coletados - EE Final / ETE ABC.....	65
4.2 - Estudo de Caso II - EE Alto Recalque do Guandu ARG/CEDAE....	66
4.2.1 - Estudo realizado.....	66
4.2.2 - Descrição geral do sistema de adução do Guandu.....	66
4.2.3 - Processo de tratamento de água da ETA Guandu.....	68
4.2.4 - Dados operacionais coletados - EE ARG / Guandu.....	69
4.3 - Processamento dos dados gerados.....	70
4.3.1 - EE Final - ETE ABC.....	70
4.3.2 - EE ARG – ETA GUANDU.....	72
4.4 - Índices de Confiabilidade, MTBF e Disponibilidade.....	74
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO - ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>75</b>
5.1 - Estudo de Caso I - EE Final - ETE ABC.....	75
5.1.1 - Calibração do sistema.....	75
5.1.2 - Dados coletados.....	76
5.1.3 - Dados gerados.....	81
5.1.4 - EPANET - EE Final - ETE ABC .....	86
5.2 - Cálculo de Confiabilidade, MTBF e Disponibilidade do HC modelo SVTL 21 instalado na EE final da ETE ABC .....	89
5.3 - Estudo de Caso II - ETA ARG / ETA GUANDU.....	93
5.3.1 - Calibração do sistema.....	93
5.3.2 - Dados coletados.....	94
5.3.3 - Dados gerados.....	99
5.3.4 - EPANET - EE ARG / ETA GUANDU .....	107

<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>111</b>
6.1 - CASO I - EE Final - ETE ABC.....	111
6.2 - CASO II - EE ARG - ETA GUANDU.....	111
6.3 - Resultados gerais de Confiabilidade, MTBF e Disponibilidade....	111
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>119</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

O setor de saneamento, que engloba a indústria de produção de água potável, de bombeamento desde a elevatória de água bruta até a distribuição aos domicílios, a coleta de esgoto e o tratamento deste antes da destinação final é, talvez, o setor mais estratégico no que diz respeito à saúde pública. O uso conjunto de água e energia neste setor é, portanto, merecedor de uma atenção especial, no tocante à racionalidade desta utilização, assim como pela necessidade imperativa de preservação do meio ambiente (ALIANÇA PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2002).

Estima-se que este setor seja responsável por aproximadamente 3% da energia consumida no Brasil. Este consumo inclui diversos processos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, com destaque para o emprego de motobombas nas estações elevatórias, que representam 90% da energia consumida nestas estações (MOREIRA, 2006 a).

Parte significativa deste alto consumo de energia se deve ao emprego de equipamentos de bombeamento de baixo rendimento (obsoletos, antigos, operando com rotação fixa ou mal dimensionados), ao excesso de perda de carga hidráulica nas linhas adutoras e nas redes de abastecimento, a manutenção precária, dentre outros fatores (MESQUITA *et.al.*, 2007).

Historicamente, a energia elétrica subsidiada consumida pelas operadoras, levou à desconsideração do custo deste insumo e ao super dimensionamento das unidades de elevação de água para minimizar riscos de interrupção de abastecimento, ainda que com operação antieconômica das unidades (BARRETO, 2007 *et al.*). Neste cenário, a utilização de válvulas à jusante de motobombas tem sido o método de controle mais utilizado pelo baixo custo inicial (SZYCHTA, 2004).

Nos últimos anos, no entanto, em virtude, principalmente, da repercussão do custo energético na operação dos sistemas de abastecimento, as empresas prestadoras de serviços de saneamento têm procurado adotar medidas para

diminuir seus custos operacionais, sem que haja comprometimento da qualidade do serviço de abastecimento (MESQUITA *et al.*, 2006).

Alternativas para a melhoria da eficiência energética tem sido propostas no intuito de minimizar estes custos com foco na utilização de equipamentos com maior rendimento, como por exemplo, a substituição de conjuntos motobombas com rotação fixa por sistemas de bombeamento dotados de variação de velocidade. Além do já consolidado emprego de inversores de frequência (VFD - do Inglês *variable frequency drive*) como variadores de velocidade para conjuntos motobombas de baixa tensão, o uso de acoplamentos hidrodinâmicos (HC - do Inglês *hydrodynamic coupling*), em aplicações de médias e altas tensões, pode representar uma alternativa técnica a ser avaliada. O emprego de inversores de frequência nessa faixa de potência requer cuidados especiais, pois esses VFD's têm custo inicial elevados, requerem mão-de-obra especializada, além de alto investimento de pós venda (TSUTIYA, 2007).

Em 2004, a Sabesp fez um levantamento em unidades de água e esgoto onde foram utilizados VFDs em médias tensões (SCOPIATO, 2004 *apud* TSUTIYA, 2007). A Tabela 1 apresenta dados referentes às diferentes estações de abastecimento avaliadas.

**Tabela 01.** Dados de estações de bombeamento com VFD de média tensão.

EE de água bruta	Potência	Tensão	Quantidade VFD
Biritiba-Mirim	1.260 kVA	3.300 V	1
Pinheiros	1.200 kVA	3.300 V	2
Guarapiranga	5.000 kVA	3.300 V	2
Parque Novo Mundo	1.250 kVA	3.300 V	3

Fonte: Scopiato, 2004 *apud* TSUTIYA, 2007

Neste mesmo estudo, Scopiato constatou dificuldades de operação e manutenção de inversores de frequência de média tensão em razão de falhas com baixo número de horas de operação e rápida obsolescência dos

inversores de frequência. Com base nestes dados, o autor concluiu que diferentemente dos VFDs de baixa tensão, os de média ainda representam uma tecnologia de alto custo inicial (SCOPIATO, 2004 *apud* TSUTIYA, 2007).

Segundo Barreto, outras alternativas para modulação de carga podem ser mais econômicas, devido ao alto custo dos inversores de frequência, sobretudo para tensões e potências mais elevadas (BARRETO *et al.*, 2007).

Neste contexto de acionamentos elétricos de médias e altas tensões, os sistemas de bombeamento com HC serão aqui analisados como uma possível solução técnica adicional a ser estudada, no sentido de proporcionar às empresas de saneamento redução de consumo energético, melhorias nas condições operacionais, operação automática em níveis pré-estabelecidos de pressões e operação confiável por um longo período de tempo dos sistemas de abastecimento de água (KUNZ, 1995).

Em função da alta demanda por água de abastecimento e elevada geração de esgoto a ser coletado e tratado nas grandes metrópoles brasileiras, devido a previsão de aumento da concentração populacional nesses grandes centros, há uma tendência que os novos sistemas de bombeamento sejam projetados com acionamentos elétricos cada vez mais potentes e alimentados por motores elétricos de médias e altas tensões (MESQUITA *et al.*, 2007). Dessa forma, verifica-se a necessidade de se estudar mais atentamente sistemas dotados de variação de velocidade, que promovam a redução com gastos de energia elétrica, diminuam os níveis de perdas por excesso de pressão e garantam uma operação com pressões constantes próximas às ideais, de forma simples, confiável e por longos períodos (PROSAB, 2009).

Por fim, considerando que, em relação aos acoplamentos hidrodinâmicos, há na literatura, pouco conhecimento difundido entre as empresas de saneamento e esta dissertação se propõe discutir algumas questões sobre essa importante opção de tecnologia de transmissão de potência, especialmente, em acionamentos de média e altas tensões.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 - Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral estudar aspectos relacionados a avaliação do emprego de acoplamentos hidrodinâmicos (HC) em conjuntos motobombas de média tensão, bem como comparar índices de confiabilidade em sistemas de bombeamento de média tensão aplicados ao abastecimento de água e ao esgotamento sanitário, tendo como principal referência a comparação técnica e econômica entre sistemas convencionais acionados diretamente por motores elétricos de rotação fixa e sistemas que empregam acoplamentos hidrodinâmicos.

### **2.2 - Objetivos Específicos:**

1- Com base em dados operacionais históricos fornecidos, avaliar o desempenho hidráulico e energético de uma estação elevatória (EE) de esgotos de média tensão dotada de acoplamento hidrodinâmico. Quantificar a efetiva redução no consumo de energia pelo aumento de eficiência de sistemas de bombeamento, quando comparado a uma operação hipotética simulada com rotação fixa e restrição por válvulas através do *software* EPANET. Calcular os ganhos anuais em economia de energia elétrica, bem como o retorno do investimento com a operação dotada de variação de velocidade por acoplamento hidrodinâmico.

2- Com base em dados operacionais de motobombas de média tensão operando em estações elevatórias (EE), comparar os resultados de três simulações distintas realizadas com auxílio do *software* EPANET para as condições reais de operação “liga-desliga” e para dois tipos de operações hipotéticas, com restrição por válvula e com variação de velocidade, avaliando os custos com energia elétrica para cada uma das condições operacionais. Comparar os gastos com energia elétrica para as três

condições simuladas, verificando a viabilidade econômica da aplicação de acoplamentos hidrodinâmicos.

3- Levando em consideração dados históricos de manutenção sobre a operação com acoplamento hidrodinâmico, analisar questões relativas ao aumento do intervalo entre falhas esperado, MTBF (do Inglês, *mean time between failure*), a confiabilidade e disponibilidade dos acoplamentos hidrodinâmicos aplicados em sistemas de bombeamento e comparar com índices padrão de confiabilidade de acoplamentos hidrodinâmicos, calculados pelo fabricante. Considerar aspectos relativos ao prolongamento da vida útil dos conjuntos motobombas pelo ajuste da rotação do sistema para a rotação efetivamente demandada pela carga.



### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. O Setor de Saneamento**

Apesar dos inúmeros problemas estruturais enfrentados pelo setor de saneamento, projetos identificados pelo Programa Procel Sanear da Eletrobrás, iniciado em 2003, evidenciaram que melhorias na eficiência energética podem colaborar para reduzir os custos das empresas prestadoras de serviços, podendo resultar em menores tarifas de água, esgoto e energia para a sociedade, acelerando, desta forma, o processo de universalização dos serviços básicos e elementares (ELETROBRÁS PROCEL SANEAR, 2011).

Estudos realizados pelo IBGE em 2011 indicaram que até o ano de 2020, mais de 70 % da população de países em desenvolvimento, caso do Brasil, estará vivendo em áreas urbanas, gerando problemas na área de saneamento, principalmente onde ainda há déficits de atendimento à população. Os principais problemas nos centros urbanos estarão relacionados à coleta e tratamento de esgoto, além da drenagem adequada de solo (ATLAS DE SANEAMENTO, 2011).

No Brasil, durante as últimas décadas, antes da implementação do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), em 2007, as empresas públicas responsáveis pelos serviços de saneamento, por falta de recursos, vinham investindo muito pouco em novos projetos. Segundo Moreira, em 2006, o saneamento básico no Brasil apresentava as seguintes características:

- a)** Indicadores percentuais elevados de cobertura geral dos serviços de abastecimento de água em áreas urbanas, embora os índices de tratamento de água ainda sejam baixos em algumas regiões do País;
- b)** Baixos índices de atendimento quanto aos serviços de esgotamento sanitário, sendo observado consideráveis desequilíbrios regionais e sociais na cobertura dos serviços de saneamento;
- c)** Baixos índices de abastecimento de água ou de controle sanitário nas áreas rurais (MOREIRA, 2006 b).

De acordo com os últimos dados divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2011), com números consolidados sobre o ano base de 2009, o índice médio de atendimento de água no Brasil foi de aproximadamente 80% da população de 190,7 milhões de habitantes (ATLAS DE SANEAMENTO, 2011), ou seja, 141 milhões de habitantes. Entretanto, grandes variações entre estes índices foram observadas quando comparados os estados brasileiros.

Como observado na Tabela 2, das cinco regiões brasileiras apenas no Sudeste mais da metade dos domicílios tinham acesso à rede de esgoto, contingente que chegou a 68,2%. No Centro-Oeste, o percentual foi de 46,5%, pouco superior aos 34,4% do Sul e muito superior aos 19,7% do Nordeste. O Norte do país apresentou o pior desempenho, tendo apenas 6,2% de sua população atendida quanto a coleta de esgoto (SNIS, 2011).

**Tabela 02. Níveis de atendimento com água e esgoto dos prestadores de serviços participantes do SNIS em 2009, segundo região geográfica e Brasil.**

Regiões	Índice de atendimento (%)				Índice de tratamento dos esgotos gerados (%)
	Água		Coleta de esgotos		
	Total (IN <sub>055</sub> )	Urbano (IN <sub>023</sub> )	Total (IN <sub>056</sub> )	Urbano (IN <sub>024</sub> )	Total (IN <sub>046</sub> )
<b>Norte</b>	58,5	73,5	6,2	7,7	15,7
<b>Nordeste</b>	69,7	91,4	19,7	26,5	33,0
<b>Sudeste</b>	90,6	97,7	68,2	73,7	41,3
<b>Sul</b>	85,9	97,0	34,4	40,5	32,9
<b>Centro-oeste</b>	89,0	96,7	46,5	51,4	44,2
<b>Brasil</b>	81,7	95,2	44,5	52,0	37,9

Fonte: SNIS, 2011

Segundo o Atlas de Saneamento divulgado pelo IBGE em 2011, apenas 55,1% das 210 grandes e médias cidades brasileiras pesquisadas possuem rede de esgoto e 68,8% delas recebem o devido tratamento de estações de tratamento de esgotos (ATLAS DE SANEAMENTO, 2011).

A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD) demonstrou um pequeno avanço nos índices de abastecimento de água e coleta de esgoto nos últimos anos: de 82% das casas com rede de água em 2004, para 84% em 2009, e de 56% para 59% dos domicílios com coleta ou fossa séptica, no mesmo período. O volume de tratamento de esgoto foi o que mais avançou, passando de 35% em 2000 para 69% em 2008, segundo a Pesquisa Nacional do Saneamento Básico (PNSB) (ATLAS DE SANEAMENTO, 2011).

Comparando estes dados com índices internacionais, o Brasil está mal colocado, especialmente com relação aos países desenvolvidos da Europa. Se a comparação for com países da América do Sul, o Brasil está atrás do Chile, que tem um sistema praticamente universalizado de água e esgotos, e também da Argentina, em situação avançada, e no mesmo nível da Colômbia. Mas está melhor do que outros emergentes, como Índia, que segundo dados do *Joint Monitoring Program* (JMP), coordenado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e pela Unicef, lidera o *ranking* de países nos quais os habitantes não possuem banheiro (63%), sendo seguida da Indonésia (58%) e China (50%). O Brasil está em nono lugar, com cerca de dez milhões de pessoas, ou aproximadamente 5% (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2011).

### **3.2 - Investimentos no setor de saneamento**

Conforme a Tabela 3, os investimentos realizados nos serviços de água e esgotos no Brasil, segundo a totalização dos participantes do SNIS em 2009, foi de R\$ 7,8 bilhões, superando em R\$ 2,2 bilhões os investimentos de 2008, o que representa um incremento de 40%. Vale observar que em 2008, já havia ocorrido um aumento relativo a 2007, de 32,7%. Comparando-se o

montante de 2009 com o realizado em 2007, o incremento total foi de 85,1% (SNIS 2011).

**Tabela 03. Investimentos realizados em 2009, de acordo com as informações dos prestadores de serviços participantes do SNIS, segundo região geográfica e tipo de contratante das obras.**

Regiões	Realizados pelos prestadores de serviço		Realizados pelos municípios		Realizados pelos estados		Total	
	(R\$ mi)	(%)	(R\$ mi)	(%)	(R\$ mi)	(%)	(R\$ mi)	(%)
Norte	90,0	1,3	6,5	3,8	215,5	38,9	313,1	4,0
	29,1%	-	2,1%	-	68,9%	-	100,0%	-
Nordeste	1.586,9	22,3	22,3	12,9	139,3	25,1	1.748,4	22,3
	90,8%	-	1,3%	-	8,0%	-	100,0%	-
Sudeste	3.988,0	56,0	129,0	74,8	195,9	35,3	4.312,8	55,0
	92,5%	-	3,0%	-	4,5%	-	100,0%	-
Sul	902,2	12,7	14,6	8,5	0,6	0,1	917,4	11,7
	98,3%	-	1,6%	-	0,1%	-	100,0%	-
Centro-oeste	549,1	7,7	0,0	0,0	3,5	0,6	552,5	7,0
	99,4%	-	0,0%	-	0,6%	-	100,0%	-
Brasil	7.117,0	100,0	172,4	100,0	554,8	100,0	7.844,2	100,0
	90,7%	-	2,2%	-	7,1%	-	100,0%	-

Fonte: SNIS, 2011.

Quando se analisa a distribuição dos investimentos segundo o tipo de contratante das obras, observa-se a grande supremacia dos investimentos realizados pelos prestadores de serviços, correspondente a 90,7% do total (R\$ 7,1 bilhões), seguidos daqueles feitos pelos estados, igual a 7,1% (R\$ 554,8 mil) e depois pelos Municípios, igual a 2,2% (R\$ 172,4 mil) (SNIS, 2011).

Segundo os dados apresentados na Tabela 4, relativos aos investimentos realizados nos estados em 2009, São Paulo lidera com folga os investimentos realizados, com 34,6% do valor total investido, seguido por Minas Gerais e Bahia, com 11,95% e 5,85%, respectivamente. O Estado do Rio de Janeiro, com 4,41%, investiu R\$ 346 milhões. Em outro extremo, Alagoas, Rondônia e Amapá despontam como estados com baixíssimos investimentos (SNIS, 2011).

Projetos de saneamento que dependerem unicamente de investimento público demorarão entre 30 e 40 anos, para atingir um grau de universalização de atendimento. Sendo assim, é preciso desenvolver estudos destinados a estabelecer formas alternativas para reduzir este prazo (OLIVEIRA, SCAZUFCA & MARCATO, 2011).

**Tabela 04. Investimentos realizados em 2009, de acordo com as informações dos prestadores de serviços participantes do SNIS, segundo estados da Federação.**

<b>Estado</b>	<b>Total (R\$ milhões)</b>	<b>(%)</b>
São Paulo	2.712,9	34,60
Minas Gerais	937,3	11,95
Bahia	458,7	5,85
Pernambuco	440,5	5,62
Rio Grande do Sul	359,7	4,59
Rio de Janeiro	346,0	4,41
Paraná	324,7	4,14
Espírito Santo	314,9	4,02
Piauí	292,7	3,73
Goiás	254,2	3,24
Santa Catarina	233,0	2,97
Rio Grande do Norte	198,5	2,53
Pará	147,1	1,88
Ceará	137,8	1,76
Sergipe	135,1	1,72
Distrito Federal	117,6	1,50
Mato Grosso do Sul	95,1	1,21
Mato Grosso	84,8	1,08
Roraima	48,1	0,61
Paraíba	45,3	0,58
Acre	43,6	0,56
Tocantins	40,4	0,52
Maranhão	36,5	0,47
Amazonas	28,6	0,36
Alagoas	3,4	0,043
Rondônia	3,2	0,041
Amapá	1,9	0,021
<b>Total</b>	<b>7.841,7</b>	<b>100</b>

Fonte: SNIS 2011

### **3.3- Estações Elevatórias (EE)**

As Estações Elevatórias (EE) são sistemas compostos por bombas e tubulações usados no recalque de líquidos, a fim de transportá-los aos pontos de consumo ou reservatórios elevados vencendo resistências impostas por desníveis topográficos e perdas de carga inerente ao sistema de dutos (BRAGA et al., 2005).

São unidades essenciais dos sistemas públicos de abastecimento de água, sendo utilizadas nos processos de captação de água bruta, tratamento, reservação e distribuição (TSUTIYA, 2004). O projeto de uma estação elevatória consiste no dimensionamento das tubulações de recalque e de sucção, com o conseqüente cálculo da potência do sistema de bombeamento (GOMES, 2009 a). Uma estação elevatória típica consiste de um conjunto de edificações, máquinas, equipamentos e componentes necessários para elevação de água bruta ou tratada de um ponto a outro, na pressão e volume adequados (BRAGA et al., 2005).

Sob o ponto de vista técnico e econômico, o projeto está condicionado ao dimensionamento da tubulação de recalque, já que representa o maior custo percentual em comparação ao sistema de sucção e de bombeamento. Os custos de implantação e de operação estão primordialmente relacionados com o diâmetro da adutora, pois poderão variar resultando em projetos mais ou menos, econômicos (GOMES, 2009 a).

Os principais componentes de uma estação elevatória de água estão detalhados na Figura 3.1.



Figura 3.1: Principais componentes de uma estação elevatória. Fonte: Tsutiya, 2004

Os custos de implantação e de operação de uma estação elevatória variam inversamente. Para uma mesma vazão, há uma considerável redução da perda de carga quando se aumenta o diâmetro da tubulação de recalque, pois esta perda de carga varia com o inverso da quinta potência do diâmetro, barateando assim a energia consumida na operação da instalação (GOMES, 2009 a).

O maior peso do custo de operação corresponde ao gasto com energia elétrica. Sendo assim, uma análise de viabilidade técnica e econômica é imprescindível para projetos de estações elevatórias de água, que envolvem custos bastante elevados no que se refere aos investimentos para implantação do projeto, bem como na operação e manutenção destes sistemas. Portanto, devem-se considerar os custos fixos de investimento e os gastos variáveis de operação e manutenção que incidirão ao longo da vida útil do projeto (GOMES, 2009 a).

Os custos variáveis ao longo do alcance do projeto dizem respeito aos gastos de exploração, que correspondem às despesas de operação e manutenção



das instalações, as quais são relativas à conservação das instalações, reparos de avarias, peças e equipamentos, bem como gastos de energia elétrica para acionamento das bombas (GOMES, 2009 a).

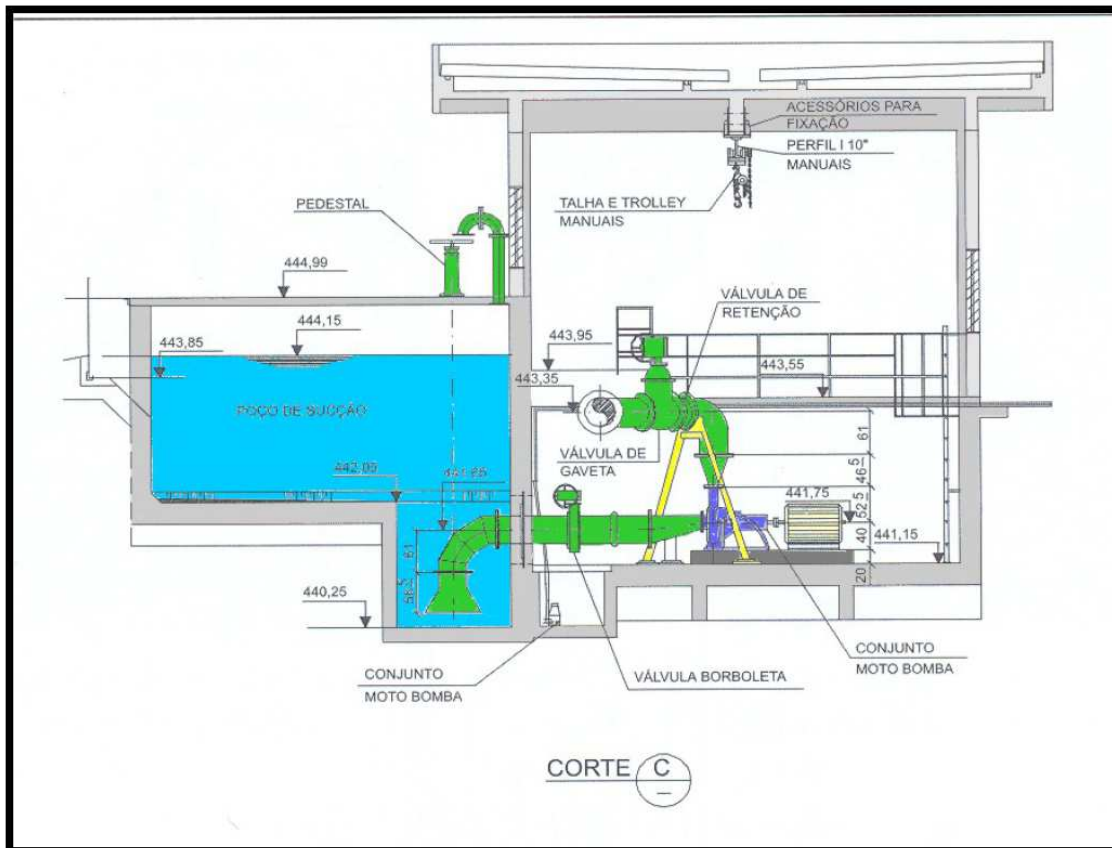
Os gastos com energia de bombeamento ao longo da vida útil do projeto, na grande maioria das vezes, podem ultrapassar os custos de implantação. Brailey & Jacobs (1980) relatam que aproximadamente 7% da energia elétrica consumida nos Estados Unidos são utilizados pelas empresas de saneamento (BRAILEY & JACOBS, 1980 *apud* GOMES, 2009 a). Clingenpeel (1983) afirmou que as empresas de saneamento gastam mais de 50% com energia elétrica, dos quais mais de 90% são associados aos custos de bombeamento nas estações elevatórias. Portanto, na análise econômica dos projetos de sistemas de abastecimento de água, além dos custos fixos de investimento, devem ser considerados os custos variáveis de exploração que incidem ao longo da vida útil do projeto (CLINGENPEEL, *apud* GOMES, 2009 a).

### **3.3.1 - Tipos de estações elevatórias empregadas nos sistemas de abastecimento de água (SAA)**

As estações elevatórias que recalcam água sem tratamento são denominadas elevatórias de água bruta e, quando recalcam água após o processo de tratamento, são denominadas elevatórias de água tratada. Quando são empregadas para aumento de pressão na rede, são denominadas de estação *booster* ou pressurizadoras (MONACHESI, 2005).

As elevatórias podem ser classificadas em elevatórias de poço seco (bombas fora da água) ou elevatórias de poço úmido (bombas dentro da água). As estações pressurizadoras ou *boosters* são instaladas diretamente nas adutoras (Tsutyia, 2004).

A Figura 3.2. ilustra um conjunto motobomba de eixo horizontal de uma estação elevatória de poço seco.



**Figura 3.2: Estação elevatória de poço seco e conjunto motobomba de eixo horizontal.**  
**Fonte: Tsutiya, 2004.**

Outros conjuntos de motobombas também são característicos deste tipo de elevatória tais como motobombas de eixo prolongado com bomba não submersa, motobombas de eixo vertical com bomba não submersa e motobombas auto escorvantes (MACINTYRE, 1997).

A Figura 3.3. ilustra um conjunto motobomba de eixo vertical de bomba submersa de uma estação elevatória de poço úmido.



Para as estações pressurizadoras são comuns os conjuntos motobombas de eixo horizontal e os conjuntos motobombas submersos.

### **3.3.2 - Procedimentos operacionais convencionais**

O custo de manutenção das estações elevatórias é alto, principalmente devido à queima de motores, porém, ao longo dos últimos anos houve um avanço nos processos operacionais com o uso da variação de velocidade (NOLTE, 2004).

No Brasil, para abastecimento de água de zonas altas, usa-se tradicionalmente o reservatório elevado alimentado por estação elevatória com bombas de rotação constante. De um modo geral, verifica-se que o reservatório tem função principal de garantir a pressão na rede, sendo o seu volume insuficiente para que lhe seja atribuída a finalidade de reservação (TSUTYIA, 2004).

Após a década de 1980, a Sabesp experimentou o uso de estações elevatórias tipo *booster* com variação de velocidade, eliminando, assim, o uso de reservatório elevado. Tais estações foram equipadas com variadores de velocidade tipo inversor estático de corrente, hidrodinâmicos e eletromagnéticos. Este último apresentou problemas de confiabilidade. O inversor estático de corrente apresentou bom desempenho, sendo a principal desvantagem o custo elevado e as dimensões relativamente grandes. O acoplamento hidrodinâmico apresentou bom desempenho, baixo custo e, pela simplicidade e robustez, foi utilizado em zonas de periferia até o início da década de 1990, sendo substituídos pelos inversores de frequência, que em baixas potências e tensões apresentam custos iniciais mais competitivos (VALLILO *et al.*, 1981).

### **3.3.3 - Eficiência Energética em Estações Elevatórias.**

As bombas geralmente são selecionadas para garantir a máxima vazão necessária ao sistema nas condições de rendimento máximo. Entretanto,

quando o sistema demanda uma vazão menor, torna-se necessário efetuar o controle de vazão da bomba através da mudança de suas características ou das características do sistema de bombeamento (TSUTIYA, 2007).

O controle de vazão das bombas através das modificações nas características do sistema de bombeamento pode ser realizado através de manobras de válvulas, enquanto que, com as variações da curva característica da bomba, o controle da vazão pode ser feito através do controle do número de bombas em operação (regime “liga-desliga”) e pela variação da rotação das bombas. O controle de vazão por meio de manobras de válvulas pode ser feito através de válvulas instaladas à jusante da bomba e de válvula instalada no *by-pass* da bomba (MONACHESI, 2005).

Teoricamente, com a utilização de válvulas à jusante da bomba, é possível reduzir a vazão da bomba até a vazão zero, conhecida como condição de *shut-off*. Na prática, entretanto, deve-se evitar que as bombas operem em baixas vazões. As operações contínuas, nessa condição, principalmente no caso de motobombas alimentadas por médias e altas tensões, ocasionarão recirculação de água na carcaça, provocando vibrações exageradas, cargas radiais e axiais excessivas, prejudiciais aos mancais, aquecimento da carcaça e aquecimento e desgaste excessivos dos motores elétricos. Uma boa regra prática é limitar a vazão mínima a valores não inferiores a 25 - 30% da vazão correspondente ao ponto de melhor rendimento da rotação (BEP) máxima recomendada (TSUTIYA, 2007).

Em estações elevatórias de água com bombas de maiores potências e tensões é comum ter várias bombas que podem operar individualmente, ou associadas em paralelo, bombeando água através de uma tubulação de recalque. Com duas ou mais bombas operando simultaneamente, cada bomba é responsável por uma parcela da vazão total recalçada. Portanto, ainda não é comum no Brasil o emprego de variadores de velocidade em estações elevatórias acionadas por equipamentos de média e alta tensão (GOMES, 2009 a).

Com o avanço da tecnologia e redução de custos, os inversores de frequência têm sido cada vez mais utilizados em elevatórias de água de baixa tensão, para manter o sistema de distribuição de água dentro de níveis de pressão e vazão compatíveis às necessidades do sistema, podendo até suprimir o tradicional reservatório elevado. O uso de variadores de velocidade elimina os bombeamentos com pressões excessivas, que provocam rupturas de redes e vazamentos de água, diminuindo as perdas reais de água. Além disso, como já mencionado, o controle de vazão através de variadores de velocidade resulta em consumo menor de energia elétrica (TSUTIYA, 2004).

### 3.3.4 - Consumo e custo de energia em EE

O custo da energia de bombeamento, em um determinado intervalo de tempo, pode ser determinado em função da potência requerida pela elevatória, do número de horas contido no intervalo de tempo considerado e do custo unitário da energia, como na fórmula abaixo:

$C_{\text{energia}} = P \times N_b \times p$  , onde:

$C_{\text{energia}}$  = custo da energia, em unidades monetárias em um determinado intervalo de tempo;  $P$  = potência requerida pela estação elevatória;  $N_b$  = número de horas de bombeamento, em um determinado intervalo de tempo, em horas e  $p$  = custo unitário da energia, em \$/kWh.

A potência demandada por uma estação elevatória de água bruta, tratada ou de esgoto, em kW, pode ser obtida diretamente pela equação:

$P = \frac{9,81 \times Q \times H}{\eta}$  , onde:

$\eta$

$Q$  = vazão de projeto, em m<sup>3</sup>/s;  $H$  = altura manométrica de bombeamento em metros de coluna d'água obtida pela soma do desnível geométrico entre o nível mínimo do reservatório de montante e o máximo do reservatório de jusante, mais as perdas totais no sistema (por atrito e localizadas) e  $\eta$  =

rendimento global do conjunto elevatório, em decimais, resultante do produto entre o rendimento do motor e da bomba.

O custo da energia de bombeamento, para um determinado intervalo de tempo será então:

$$C_{\text{energia}} = \frac{9,81 \times Q \times H \times N_b \times p}{\eta}$$

O regime de bombeamento diário é estabelecido segundo as condições de operação e manutenção do projeto. Para se estabelecer o número de horas de bombeamento diário, deve-se levar em conta a vazão demandada e a disponibilizada para o sistema, e as capacidades dos reservatórios de distribuição e regularização. Além disso, deve-se limitar, quando possível, o número máximo diário de horas de operação de forma a evitar bombear durante o horário de ponta, no qual as tarifas de energia são significativamente maiores do que as do horário fora de ponta. Por horário de ponta, entende-se o intervalo de tempo, em horas, no qual a tarifa cobrada pelas concessionárias de energia elétrica é mais cara que a tarifa normal, como forma de estimular a diminuição do consumo justamente no período de maiores demandas. Como o horário de ponta no Brasil é, normalmente, de três horas, das 17:30 às 20:30 horas, o regime de bombeamento diário não deve exceder 21 horas. Na prática, a demanda cresce mais do que a prevista e então a estação de recalque é forçada a operar no horário de ponta, onerando o custo de energia do sistema (GOMES, 2009 a).

### 3.4 – Bombas

Atribui-se o termo bomba hidráulica, ou simplesmente bomba, a todo equipamento capaz de transferir energia de determinada fonte para um líquido, de modo que esse líquido possa realizar determinado trabalho sob forma de energia potencial de pressão e cinética. No abastecimento público de água, esse trabalho corresponde ao deslocamento de um volume de água, através de uma tubulação entre dois pontos (MONACHESI, MONTEIRO & ROCHA, 2005).

#### 3.4.1 - Classificação das bombas

A classificação das bombas está apresentada na Figura 3.5 e esta se baseia no modo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e o recurso para cedê-la ao líquido aumentando sua pressão e/ou sua velocidade.

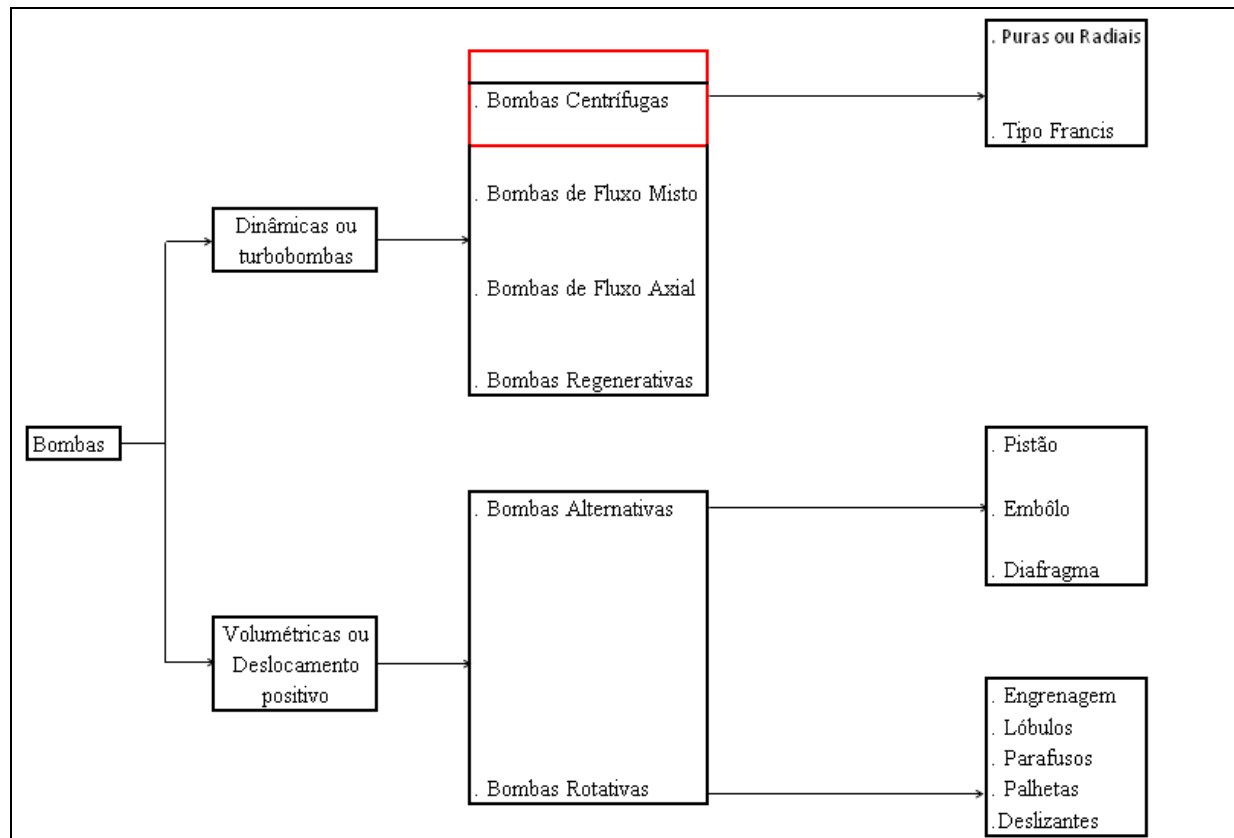


Figura 3.5: Classificação geral das bombas. Fonte: Mattos & de Falco, 1998.



As bombas de deslocamento positivo possuem uma ou mais câmaras, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seu escoamento (MACINTYRE, 1997). Essas bombas não são aplicadas em sistemas de abastecimento de água (SAA) e, por isso, não serão objeto de estudo deste trabalho. As bombas aplicáveis em SAA são as bombas centrífugas.

### 3.4.2 - Classificação das bombas centrífugas

As bombas centrífugas se classificam conforme a trajetória do líquido ao passar pelo rotor, ou seja, de fluxo radial, de fluxo axial ou misto. A Figura 3.6 apresenta a classificação de bombas centrífugas.

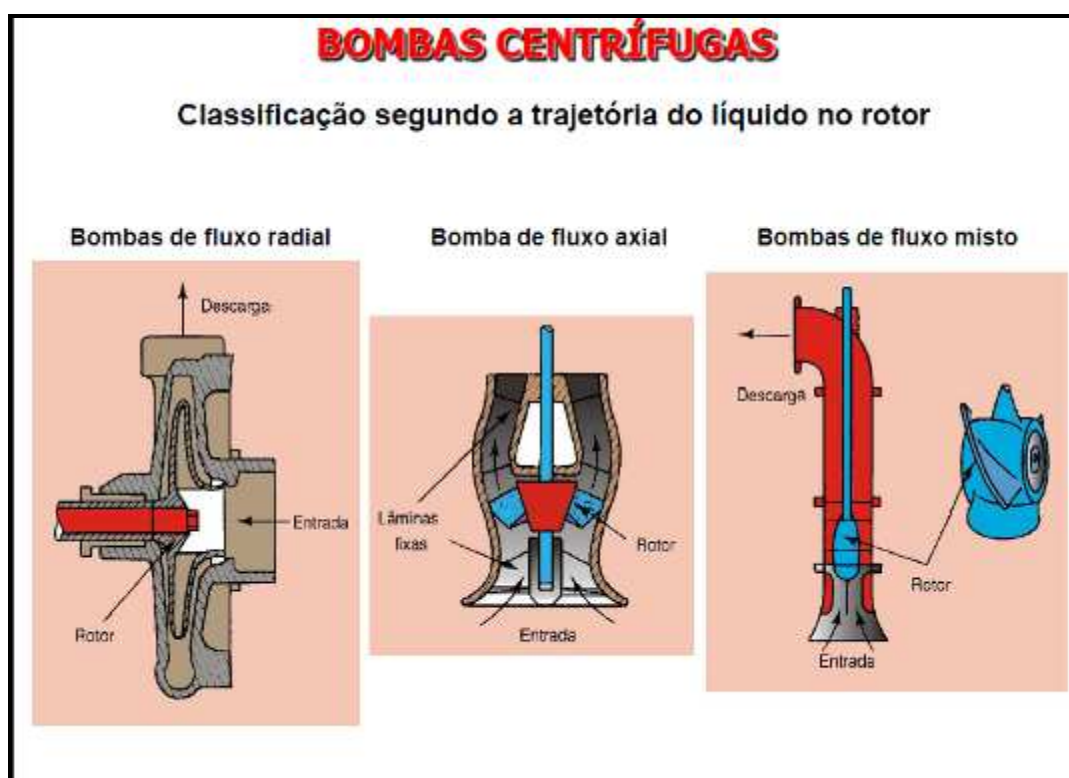


Figura 3.6: Classificação das bombas centrífugas conforme a trajetória do líquido ao passar pelo rotor. Fonte: Tsutiya, 2004.

Nas bombas de fluxo radial, o líquido passa pelo rotor paralelamente ao eixo e é direcionado pelas pás para a periferia, segundo trajetória contida em planos normais ao eixo da bomba, ou seja, no sentido radial. Nas bombas

axiais, pelo formato dos rotores, a trajetória do líquido é paralelo ao eixo da bomba, no sentido axial e são empregadas para grandes vazões e pequena altura de elevação. Nas bombas de fluxo misto o formato do rotor determina um escoamento nos sentidos axial e radial e são utilizadas para baixas alturas de recalque e altas vazões (MACINTYRE, 1997).

### 3.4.3 - Curvas de desempenho de bombas centrífugas

As curvas características de bombas centrífugas são representadas por gráficos fornecidos pelos fabricantes de bombas. Elas expressam o desempenho esperado de cada bomba. São basicamente três as curvas características tradicionais, as quais estão representadas na Figura 3.7.

- Curva de carga **H** (altura ou *head*) x vazão **Q**;  
O funcionamento de uma bomba centrífuga é determinado pela relação entre pressão fornecida e a vazão, que pode ser verificada através da curva H-Q, que representa a quantidade de energia de pressão que a bomba fornece para uma determinada vazão. No caso das bombas centrífugas, a característica principal dessa curva é que a pressão fornecida diminui conforme a vazão aumenta (MATTOS & de FALCO, 1998).
- Curva de potência necessária **P** (ou absorvida) x vazão **Q**;  
Para cada vazão a bomba irá consumir uma determinada potência. Essa curva é essencial para que se possa selecionar corretamente o acionador que será empregado para o funcionamento da bomba. A potência consumida pela bomba aumenta conforme a vazão, por isso é importante que, ao dimensionar o acionador, o valor de potência consumida a ser levado em consideração seja aquele relativo à vazão máxima (SILVA, 2003).
- Curva de rendimento  $\eta$  x vazão **Q**.  
Para cada vazão a bomba possui um valor diferenciado de eficiência. Essa curva é uma parábola e é de fundamental importância para selecionar a região de operação da bomba. É recomendado que o ponto de operação da bomba, seja sempre aquele em que a bomba

possua melhor eficiência: esse ponto é denominado BEP (do inglês, *best efficiency point*). Para o melhor funcionamento da bomba é recomendado que a mesma funcione em uma faixa de 80 – 110% do BEP (faixa preferencial de operação). A operação prolongada em vazões fora dessa faixa irá acarretar danos ao conjunto motobomba, por exemplo: danos a selos e mancais devidos a vibração, recirculação e cavitação (MATTOS & de FALCO, 1998).

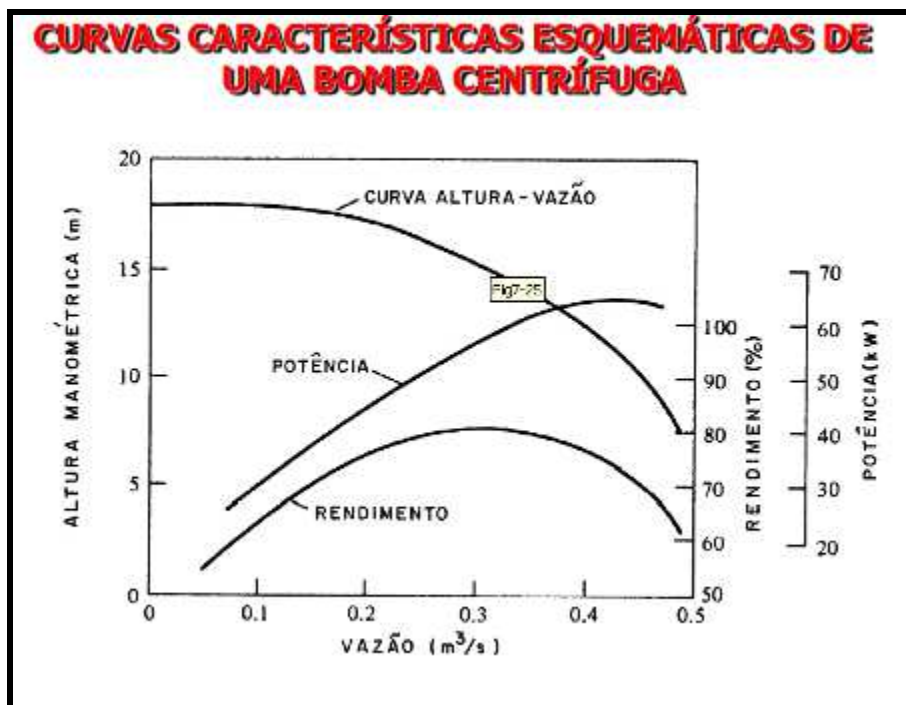


Figura 3.7: Curvas características de bombas centrífugas. Fonte: Tsutiya, 2004.

A interpretação da curva característica é muito importante pois a bomba é projetada para elevar determinada vazão (Q) de líquido a uma altura manométrica total (H) em condições de máximo rendimento. O ponto de trabalho (ou ponto de operação) de uma bomba centrífuga é dado pelo cruzamento da curva do sistema com a curva da bomba, como representado na Figura 3.8.

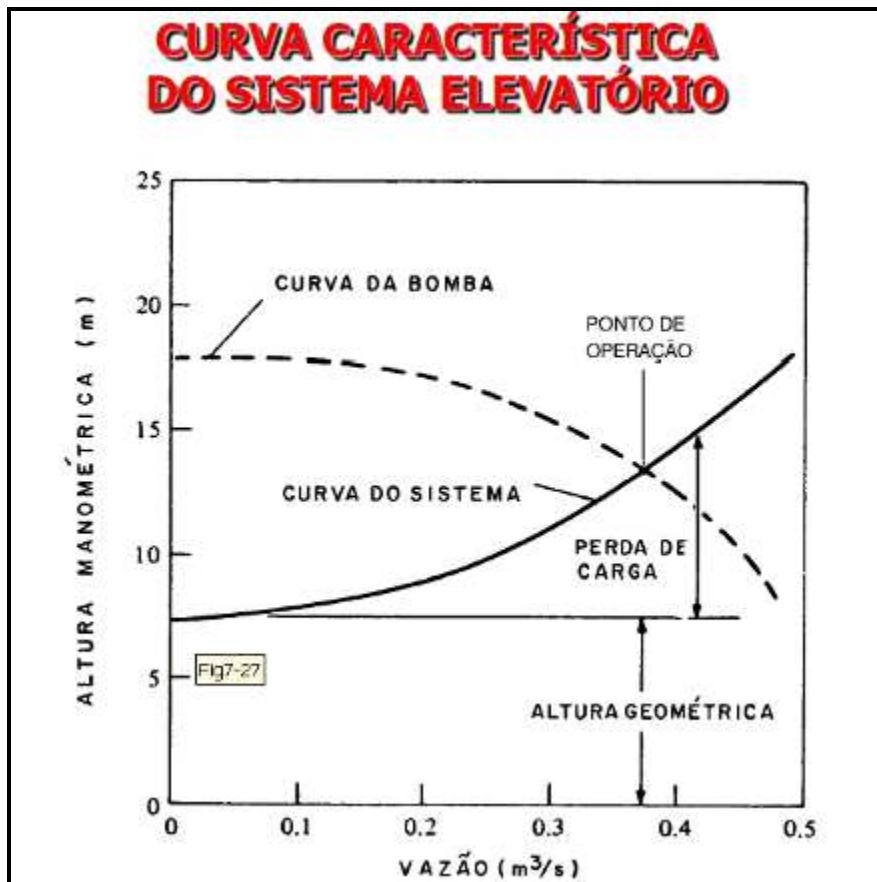


Figura 3.8: Ponto de operação de uma bomba centrífuga. Fonte: Tsutiya, 2004.

### 3.4.4 - Curva do sistema

Os sistemas de bombeamento são compostos por bombas, válvulas, tubulações e acessórios, que se fazem necessários à transferência do fluido de um ponto para outro. Sempre é relevante conhecer não somente o ponto de operação do sistema ( $Q \times H$ ), mas a curva do sistema (Figura 3.8), ou seja, a altura manométrica total correspondente a cada vazão, dentro de uma determinada faixa de operação do sistema. Esta curva é importante para sistemas de associação de bombas, sistemas com variações de níveis nos reservatórios e sistemas com variação de vazões (SILVA, 2003).

### 3.4.5 - Perda de carga

As perdas de carga distribuídas e localizadas no escoamento em tubulações podem ser determinadas através das medidas de pressão. Por outro lado, estas podem ser calculadas através de fórmulas experimentais ou empíricas,

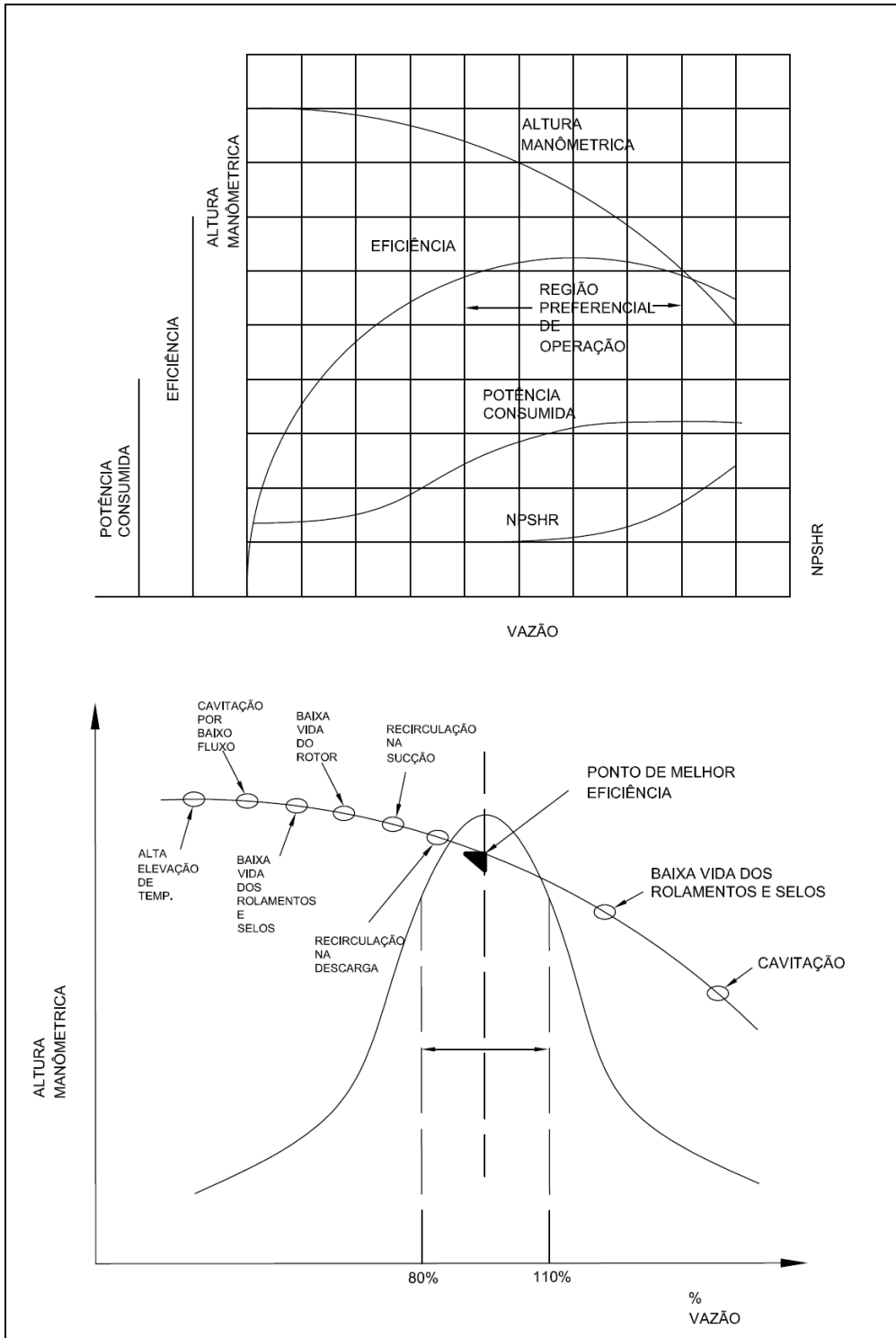
conhecendo-se as dimensões da tubulação, características do líquido, conexões, dentre outros aspectos (SILVA, 2003).

A fórmula de Hazen-Willians, apresentada abaixo, é muito utilizada no meio industrial, sendo válida para diâmetros acima de 50 mm e escoamento com água (SILVA, 2003). Tal equação é aplicada no cálculo efetuado pelo *software* EPANET.

$$J = \frac{H_p}{L} = 10,643 \times Q^{1,85} \times C^{-1,85} \times D^{-4,87}$$

Onde: J = perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo (m/m);  $H_p$  = perda de carga distribuída (m); L = Comprimento do trecho reto do tubo (m); Q = Vazão (m<sup>3</sup>/s); D = Diâmetro interno do tubo (m) e C = coeficiente de Hazen-Willians (adimensional). Os valores de C dependem do material e estado das paredes do tubo, variando de 60 para aço corrugado até 140 para plástico.

Se do ponto de vista hidrodinâmico é vantajoso obter maior vazão em função de uma menor perda de carga, do ponto de vista energético deve-se observar as características do equipamento, que pode não estar mais nas proximidades do ponto de melhor eficiência, como ilustrado na Figura 3.9, que apresenta a faixa de 80% a 110% da vazão como a ideal para a operação. Caso a operação se afaste dessa faixa, a bomba não perderá apenas eficiência, mas confiabilidade também (LARRALDE & OCAMPO, 2010).



**Figura 3.9: Efeitos da operação fora da região de melhor eficiência.**  
**Fonte : Larralde & Ocampo, 2010.**

Há ainda outra curva, apresentada na Figura 3.9, que traduz o NPSH (do inglês: *net positive suction head*) requerido pela bomba, que deve ser comparado ao NPSH disponível do sistema. O termo NPSH representa a energia em altura absoluta do líquido na sucção da bomba acima da pressão

de vapor deste líquido, na temperatura de bombeamento, referida à linha de centro da bomba. Portanto, o fim prático do NPSH é impor limitações às condições de sucção da bomba, de modo a manter a pressão na entrada do rotor acima da pressão de vapor do líquido bombeado. A pressão mais baixa ocorre na entrada do rotor, se for mantida a pressão na entrada do rotor superior à pressão de vapor, não ocorrerá vaporização na sucção, evitando assim, o fenômeno de cavitação (SILVA, 2003).

Existem certas relações que nos permitem conhecer as curvas de performance das bombas para uma rotação diferente daquela cujas curvas características são conhecidas. Outras relações nos permitem estimar as novas curvas de performance de uma bomba caso o diâmetro do rotor seja reduzido, dentro de limites que dependem do tipo da bomba (GURGEL, 2006).

#### **3.4.6 - Variação de rotação de bombas centrífugas**

Para uma bomba centrífuga girando com velocidades diferentes por variação na demanda, são válidas as relações apresentadas nas fórmulas abaixo que interessam particularmente ao estudo de eficiência das bombas centrífugas, conhecidas como “leis de semelhança”. Elas refletem a variação das características da bomba (vazão, altura manométrica e potência) quando outras grandezas variam (rotação e diâmetro do rotor). É interessante identificar como as curvas de performance variam com a rotação e com a variação do diâmetro do rotor, para obtenção do melhor rendimento do conjunto motobomba instalado. A variação de velocidade é conseguida com o uso de acoplamentos de velocidade para obter maior eficiência energética e flexibilidade operacional em sistemas de bombeamento com demanda variável. No setor de saneamento, a área de distribuição é a que tem o maior potencial de aplicação, tendo em vista a importância de se manter, de forma automática, pressões constantes nas linhas, conforme a demanda imediata (EVEHART, 2004).

$$Q_1 = \frac{N_1}{N} \times Q$$

Vazão

$$H_1 = \left( \frac{N_1}{N} \right)^2 \times H$$

Altura manométrica

$$P_1 = \left( \frac{N_1}{N} \right)^3 \times P$$

Potência

Sendo:  $N_1$  e  $N$  = Velocidade de rotação da bomba;  $Q_1$  e  $Q$  = Vazão relativa à rotação da bomba;  $P_1$  e  $P$  = Potência consumida pela bomba relativa à rotação.

A Figura 3.10 mostra as leis da semelhança em um sistema cuja bomba apresenta as suas características alteradas em decorrência da variação de rotação. Esta Figura apresenta o cruzamento das curvas características da bomba com curvas características do sistema, para rotações  $N_1$ ,  $N_2$  e  $N_3$ , resultando nos pontos A1, A2, A3 ; B1, B2, B3 ; C1, C2, C3 e D1, D2 e D3 (TSUTIYA, 2007).



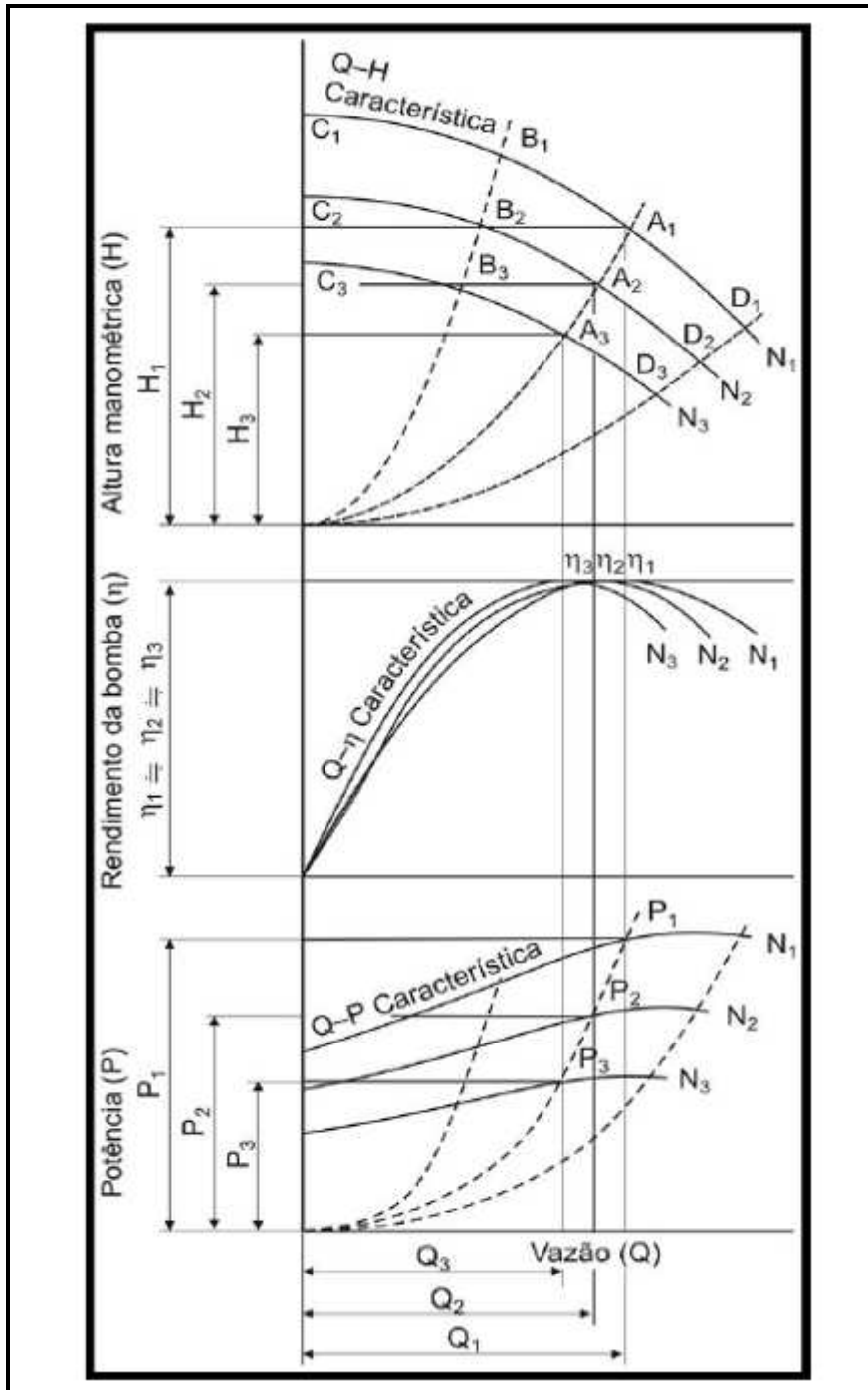
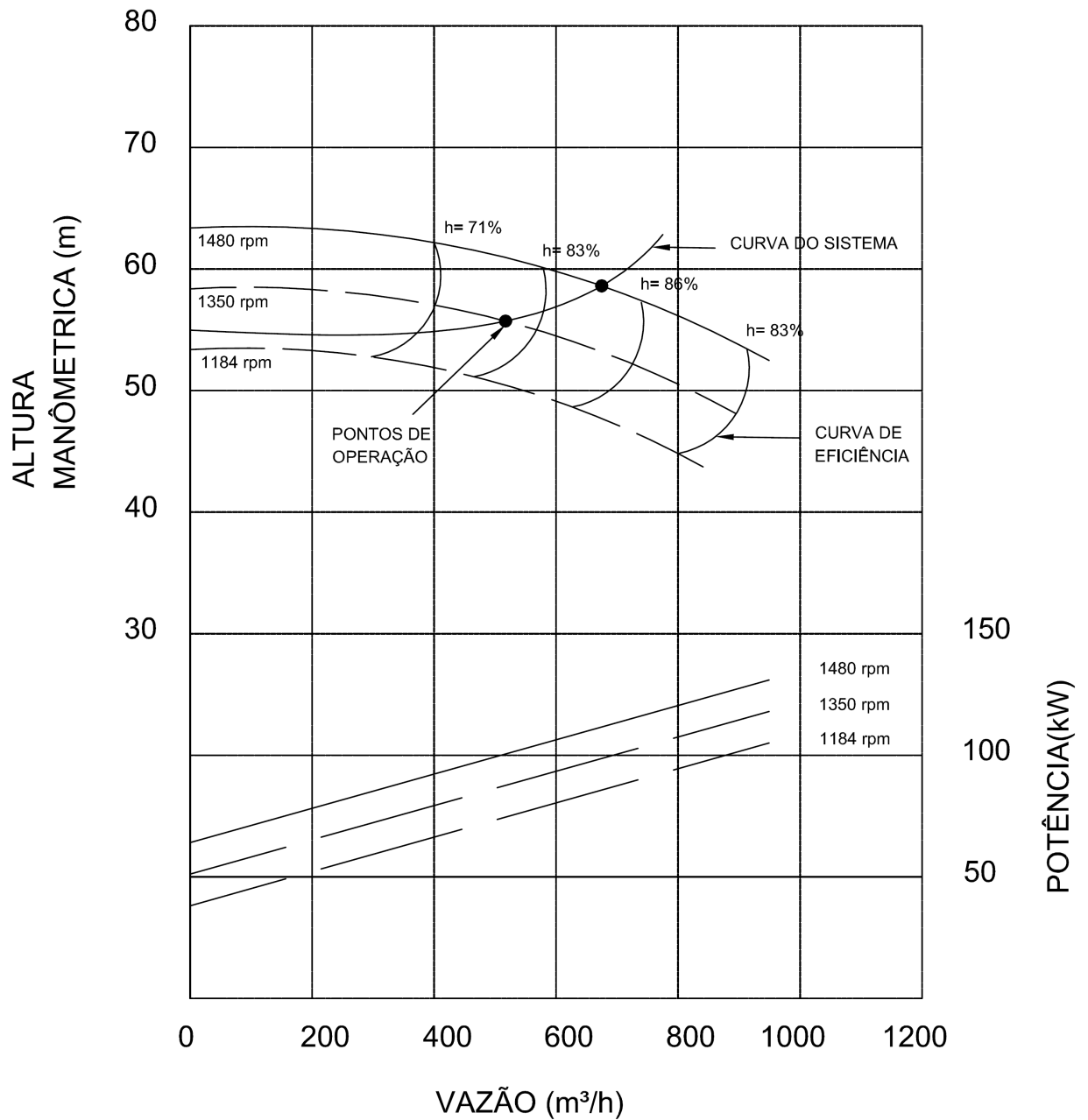


Figura 3.10: Relações conforme as leis da semelhança em bombas centrífugas.  
 Fonte: Tsutiya, 2001

Em um sistema com elevada carga estática (AMT), a curva do sistema não parte da origem, mas de um valor qualquer acima de zero no eixo das ordenadas, correspondendo ao *head* estático. Assim, a curva do sistema não segue a curva de eficiência constante. Ao contrário, ela corta tal curva (Figura 3.11). A redução na vazão não é mais proporcional a rotação. Uma pequena redução na velocidade, acarretará em uma elevada redução da vazão, bem como na eficiência. Um erro comum é usar a lei da semelhança para calcular a energia

economizada em sistemas com *head* estático. Embora isso possa ser feito como uma aproximação, esse método pode levar a erros consideráveis (EUROPUMP, 2004).



**Figura 3.11: Efeito na curva de performance da variação de rotação em bombas centrífugas. Fonte: EUROPUMP, 2004.**

A seguinte fórmula é utilizada para avaliação da variação de parâmetros operacionais em função do diâmetro do rotor:

$$Q_1 = \frac{D_1}{D} \times Q$$

Vazão

$$H_1 = \left( \frac{D_1}{D} \right)^2 \times H$$

Altura manométrica total

$$P_1 = \left( \frac{D_1}{D} \right)^3 \times P$$

Potência consumida

A relação direta entre os diâmetros é válida, para redução de diâmetros em rotores, até 20%. Essas relações são aproximadas. Portanto, é recomendável usar menos que o calculado, testar a vazão e se for necessário, complementar a usinagem (MONACHESI, MONTEIRO & ROCHA, 2005).

Na operação com uma única bomba, o ponto de operação do sistema de bombeamento é escolhido pesquisando-se nas curvas características das bombas aquela que eleva a vazão de projeto à sua altura manométrica, operando o mais próximo possível do ponto de melhor rendimento (GURGEL, 2006).

### **3.4.7 - Associação de bombas centrífugas**

Há varias razões para a opção pelo uso de associação de bombas. Por exemplo, quando uma bomba não pode atender sozinha à vazão requerida, quando há variação da vazão ao longo do tempo, quando não há bomba que atenda à altura manométrica requerida no projeto, entre outras situações (SILVA, 2003).

#### **3.4.7.1 - Associação em paralelo**

Esta associação pode ser em paralelo, e neste caso, para cada altura manométrica total, o valor da vazão total do sistema será a soma da vazão correspondente à cada tubulação. Assim, inicialmente procede-se ao levantamento da curva de cada sistema individualmente, como se não existissem os outros. Em seguida, para cada altura manométrica, somam-se

as vazões correspondentes em cada sistema, obtendo-se a curva do sistema resultante, ilustrada pela Figura 3.12 (MATTOS & de FALCO, 1998).

Em elevatórias geralmente há duas ou mais bombas operando individualmente ou em paralelo, enviando o líquido bombeado através de uma única tubulação de recalque (MONACHESI, MONTEIRO & ROCHA, 2005).

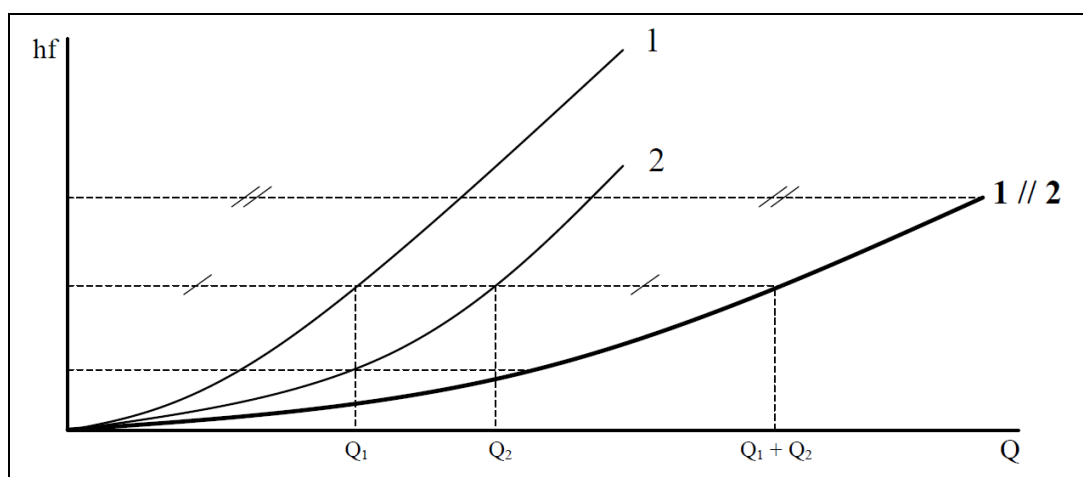


Figura 3.12: Curva do sistema de associação de bombas em paralelo. Fonte: KSB, 2003

Um sistema com bombas em paralelo pode variar sensivelmente em função do número de bombas em operação simultânea, fazendo com que o ponto de operação de cada uma das bombas se afaste do ponto de melhor rendimento. Tsutiya (2004) recomenda que o projeto do sistema seja feito de tal forma que, nas condições mais desfavoráveis, a vazão de cada bomba não saia dos limites de 60% a 120% da vazão correspondente ao ponto de maior rendimento dessa bomba, Figura 3.9, (GURGEL, 2006).

#### 3.4.7.2 - Associação em série

Outra possibilidade, é a de associação das bombas em série, quando o recalque da primeira coincide com a sucção da seguinte, como se a bomba de jusante fosse *booster* da outra. Assim, para cada vazão, as alturas manométricas serão a soma das alturas manométricas individuais de cada bomba ( $H_A + H_B$ ) das bombas A e B para a vazão  $Q_p$ . As Figuras 3.13 e 3.14

ilustram o comportamento da associação de duas bombas em série (ELETROBRAS PROCEL, 2005).

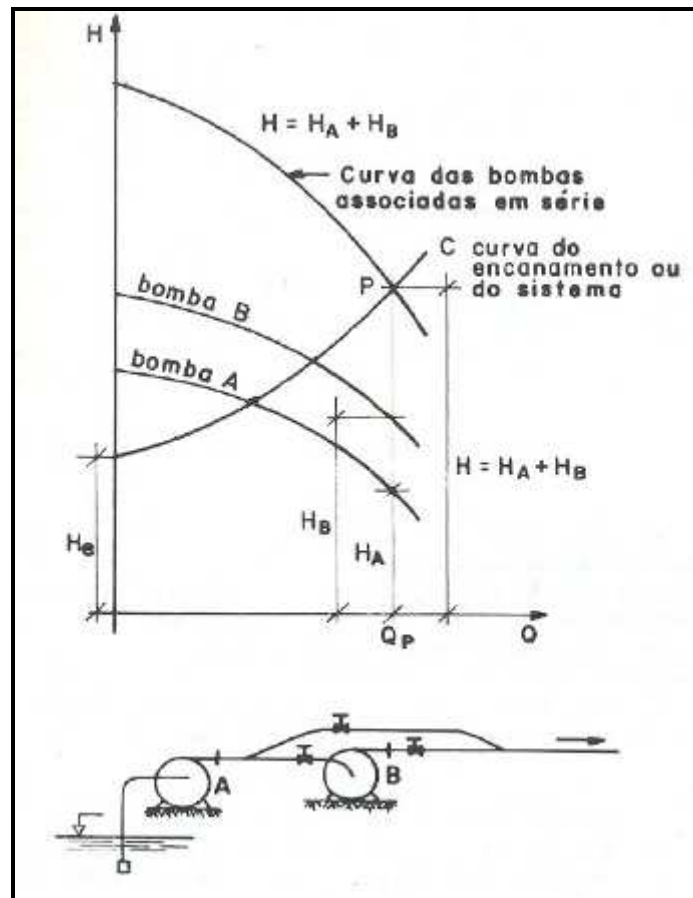


Figura 3.13 - Curvas de associação de bombas centrífugas em série.

Fonte: Macintyre, 1997

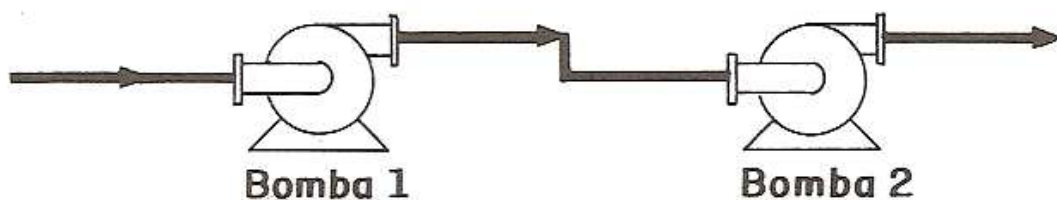


Figura 3.14 - Associação de bombas centrífugas em série.

Fonte: MATTOS & de FALCO, 1998

### 3.5 - Motores Elétricos

Motor elétrico é uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica. O motor de indução (assíncrono) é o mais usado, pois combina as vantagens da utilização da energia elétrica (baixo custo) e simplicidade, com construção simples, custo reduzido, versatilidade de adaptação a cargas de diversos tipos e melhores rendimentos (EUROPUMP, 2004).

#### 3.5.1 - Classificação de motores elétricos

Os motores elétricos proporcionam operação eficiente e flexibilidade para projetos de estações de bombeamento e em diversas aplicações na indústria. Podem ser fabricados com características que se ajustam a quase todos os tipos de cargas, conforme classificação (Figura 3.15), e podem ser projetados para operar de forma confiável em locais expostos ao tempo e em atmosferas agressivas. Os tipos mais comumente empregados na indústria são os motores de corrente alternada. (GAS PROCESSORS ASSOCIATION, 1994).

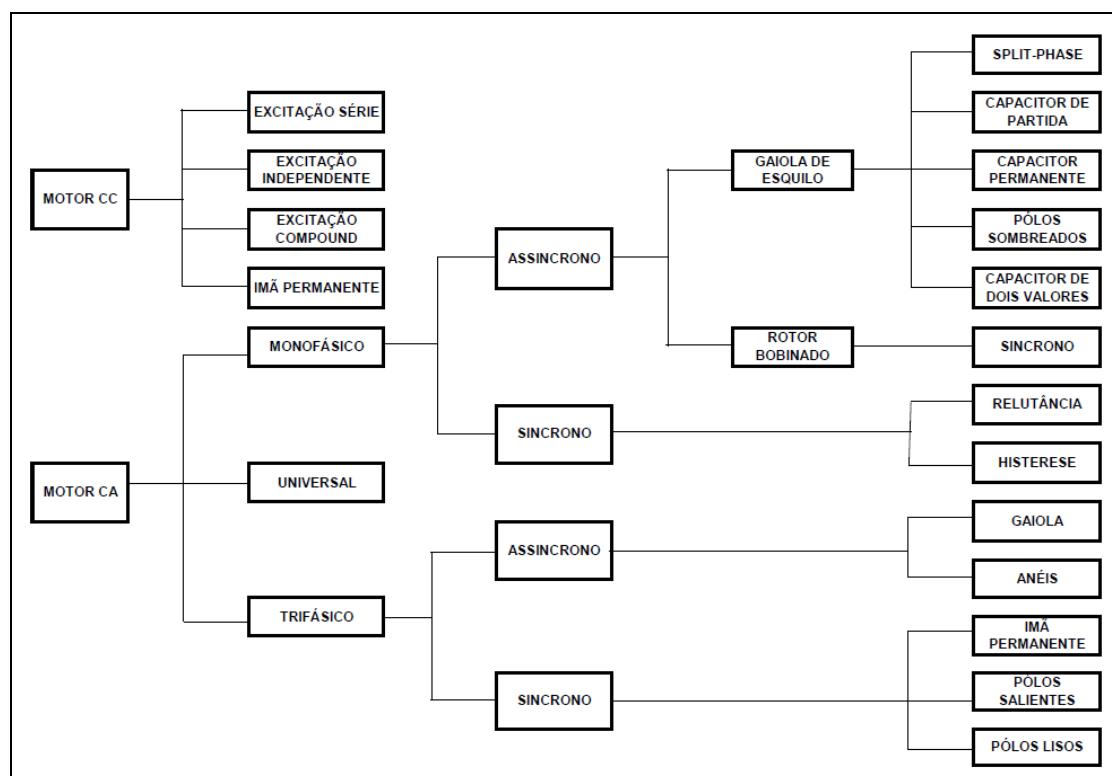


Figura 3.15 - Classificação de motores elétricos. Fonte: WEG, 2005.

### **3.5.2 - Motores elétricos de corrente alternada**

Os motores de corrente alternada acionam diversos tipos de cargas devido ao elevado rendimento. Altos torques, velocidade constante nas variações de carga e baixo custo de manutenção, também são características especiais de funcionamento que proporcionam inúmeras vantagens econômicas e operacionais ao usuário (WEG, 2006).

São os mais utilizados na indústria em geral e particularmente no saneamento, porque a distribuição de energia elétrica é feita em corrente alternada trifásica. Os motores elétricos em corrente alternada trifásicos são divididos em motores de indução (ou assíncronos) e motores síncronos (GOMES, 2008).

#### **3.5.2.1 - Motores síncronos**

As faixas de voltagem mais comuns em motores elétricos são de 460 volts para motores de até 250 HP, 2,3 kV para faixas entre 250 e 7.500 HP, 13,2 kV para motores acima de 7.500 HP. Segundo Lobosco & Dias, (apud TSUTYIA, 2004), em geral os motores síncronos são aplicados para potências acima de 300 HP e são têm emprego quase unânime em aplicações de potências elevadas.

Os motores síncronos funcionam com velocidade fixa e são mais aplicados para grandes potências ou quando não há demanda de variação de velocidade. Apresentam alto rendimento e permitem a correção do fator de potência da rede (GAS PROCESSORS ASSOCIATION, 1994).

Os motores síncronos de velocidade constante têm como vantagem o fato de normalmente ser a escolha lógica para muitos acionamentos industriais de alta potência. As características de torque do motor síncrono podem ser ajustadas no projeto de acordo com a demanda da carga acionada e da fonte de energia disponível. O torque de partida pode ser selecionado ao longo de uma faixa extensa (GAS PROCESSORS ASSOCIATION, 1994).

Os motores síncronos normalmente partem mais facilmente do que os motores de indução. A queda de tensão do sistema na partida é menor em uma dada potência.

Conforme definido por Puccinelli (1968), nos motores síncronos, a velocidade está em sincronismo com a frequência da rede de alimentação, dependendo unicamente da frequência e do número de pólos, independentemente da carga a ser vencida.

A rotação de sincronismo é obtida pela equação abaixo:

$$N = \frac{120 \times f}{p}$$

Onde:

N = rotação de sincronia; f = frequência da rede (Hz) e p = número de pólos

### **3.5.2.2 - Motores de indução**

Os motores de indução (Figura 3.16) funcionam normalmente com velocidades constantes, que variam com a carga mecânica aplicada ao eixo. Devido à grande simplicidade, robustez e baixo custo, são os motores elétricos mais empregados. São adequados a quase todos os tipos de máquinas acionadas. Atualmente, é possível o controle direto da velocidade dos motores de indução com o emprego de inversores de frequência (WEG, 2005).

Em geral, os motores de indução podem acelerar inércias maiores do que os motores síncronos e normalmente desempenham essa tarefa em um tempo mais curto, porém tendendo a demandar mais corrente de partida por unidade de potência, a um fator de potência mais baixo do que motores síncronos do mesmo tamanho e rotação. Isso resulta em uma maior queda de tensão no sistema quando na partida do motor. Se o motor estiver partindo uma carga de alta inércia, a voltagem mais baixa no terminal resultará no



aumento da temperatura da gaiola durante a aceleração. Assim, quedas de voltagens superiores a 20% podem demandar a seleção de motores com características especiais (GAS PROCESSORS ASSOCIATION, 1994).

Uma vez que tenha partido, o motor de indução é uma máquina estável. A maioria dos motores podem facilmente operar entre 25 a 30% de queda de voltagem causada por uma falha externa. A estabilidade geral do sistema e a continuidade podem ser obtidas pelo uso de um motor de indução de grande porte. Isso é, entretanto, conseguido com a desvantagem de um baixo fator de potência e menor eficiência (GAS PROCESSORS ASSOCIATION, 1994).

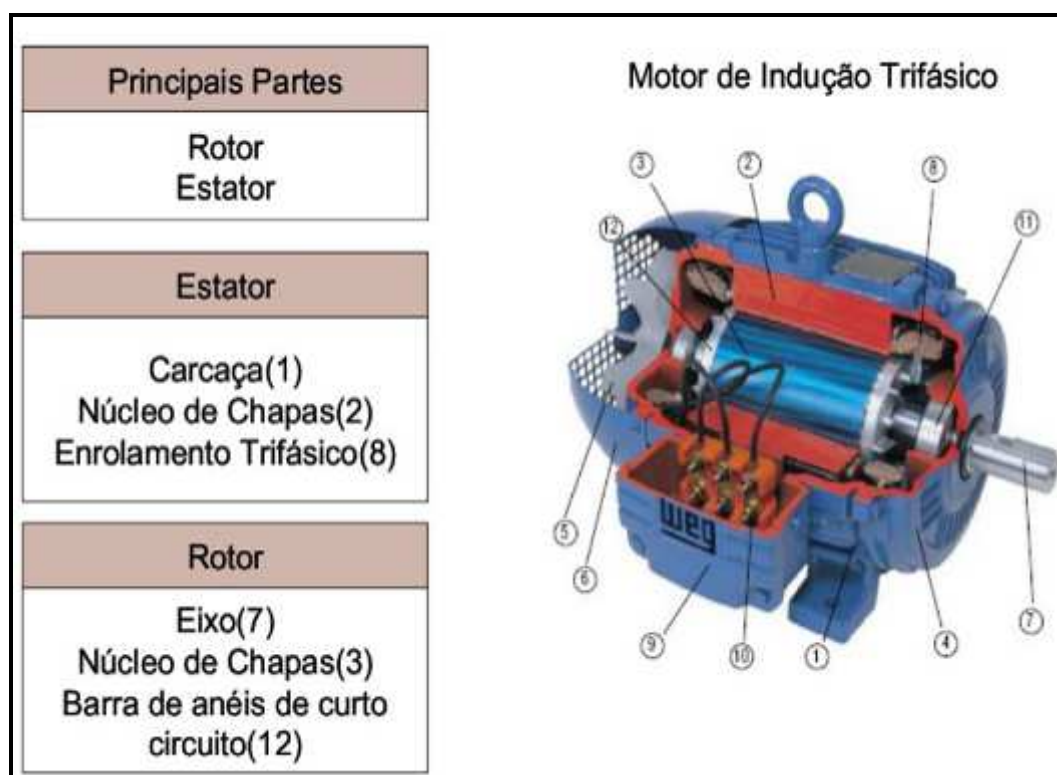


Figura 3.16- Motor de indução trifásico composto de 2 partes principais, rotor e estator. Fonte: WEG, 2005.

### 3.5.3 - Princípio de Funcionamento

Como já mencionado, o motor de indução trifásico é o tipo mais utilizado, devido à maioria dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica serem trifásicos de corrente alternada. O motor de indução trifásico apresenta

como vantagem em relação ao monofásico, uma partida mais fácil e menor nível de ruído (WEG, 2005).

O rotor em *gaiola de esquilo* é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio (condutores), dispostos paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, também em alumínio, que curto-circuitam os condutores (ULIANA, 2006).

O estator é também constituído por um núcleo ferromagnético laminado, nas cavidades do qual são colocados os enrolamentos alimentados pela rede de corrente alternada trifásica. A vantagem deste rotor em relação ao rotor bobinado é que resulta numa construção do induzido mais rápida, mais prática e mais barata (WEG, 2005).

Os motores síncronos possuem o estator e os enrolamentos de estator (armadura) bastante semelhantes aos dos motores de indução trifásicos. Assim como no motor de indução, a circulação de corrente no enrolamento distribuído do estator produz um fluxo magnético girante que progride em torno do entreferro (WEG, 2006).

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente, criando o campo girante do estator. Na Figura 3.17 está indicada a forma de onda de um sistema trifásico equilibrado constituído por três conjuntos de bobinas dispostas simetricamente no espaço, formando um ângulo de  $120^\circ$  (ULIANA, 2006).

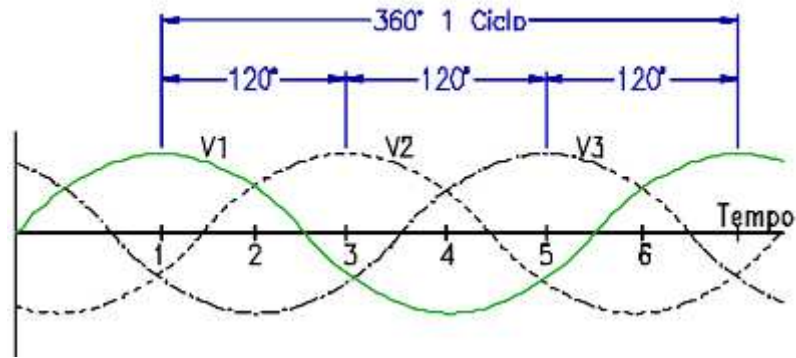


Figura 3.17 - Forma de onda de um sistema trifásico. Fonte: WEG, 2006

### 3.5.4 – Conjugado de Partida

À medida em que a carga aumente, a rotação do motor cairá gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinja o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cairá bruscamente, podendo chegar a travar o rotor. Representando num gráfico a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal, é possível obter uma curva com aspecto representado na Figura 3.18 (WEG,2006).

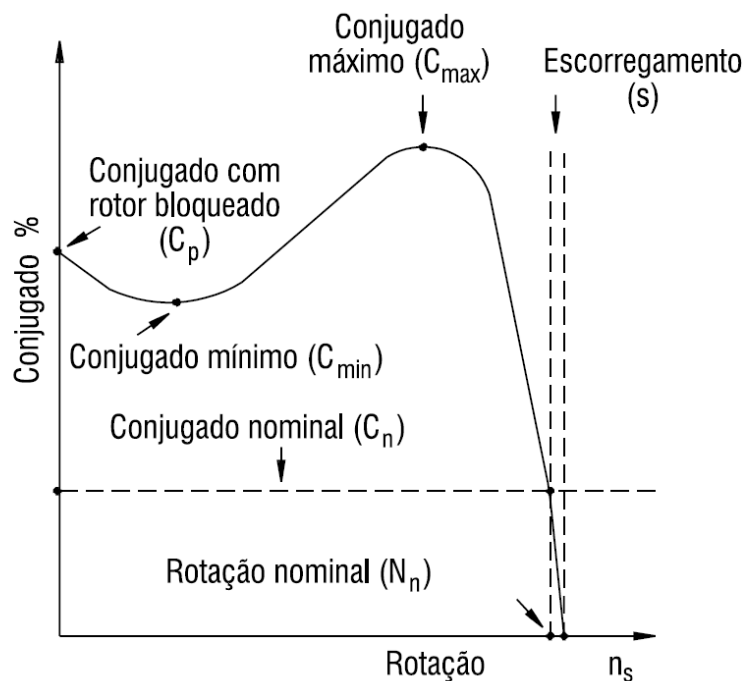


Figura 3.18 - Curva do conjugado de partida x rotação  
Fonte: WEG, 2006.

O motor síncrono parte como um motor de indução (assíncrono), e acelera a carga até o ponto onde o conjugado do motor iguale o conjugado resistente da carga. Usualmente este ponto ocorre com 95% da rotação síncrona ou acima e, nessa situação, a tensão de excitação é aplicada ao motor e o rotor sincroniza, ou seja, irá acelerar a inércia combinada do rotor do motor mais a da carga, até rotação síncrona precisa, Figura 3.19 (WEG, 2006).

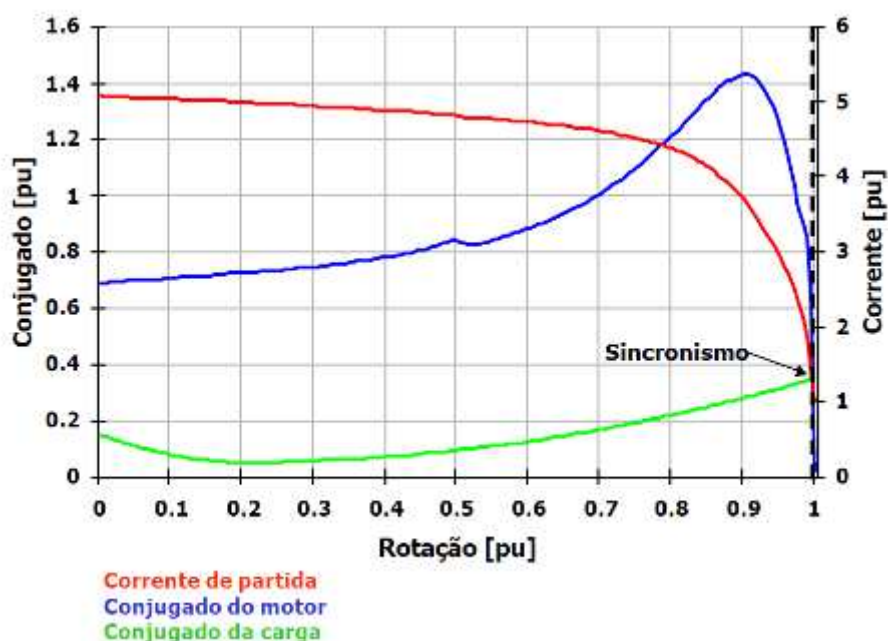


Figura 3.19 - Curva característica de partida de um motor síncrono a plena tensão. Fonte: WEG, 2006.

A aplicação de HCs não impede que o pico de corrente de partida do motor seja alcançado; entretanto, pelo fato de o HC proporcionar uma desconexão completa entre motor e máquina acionada, o motor parte em vazio, o que reduz de forma expressiva o tempo e duração do pico da corrente de partida, como representado pela Figura 3.20 (VOITH, 2007).

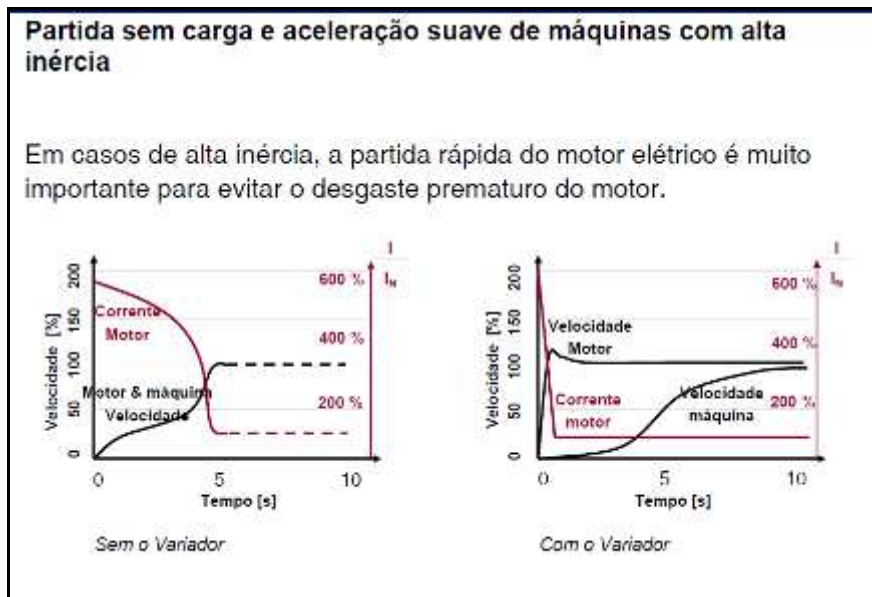


Figura 3.20: Curvas comparativas entre partida com e sem HC. Fonte: Voith, 2010.

### 3.5.5 – Rotores e Eixos

O rotor pode ser construído com pólos lisos ou salientes dependendo das características construtivas do motor e da aplicação. Consiste nas partes ativas giratórias compostas da *coroa do rotor*, o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor. As bobinas de campo são feitas de fios de cobre esmaltados ou barras de cobre planas (WEG, 2006). Os eixos são fabricados de aço forjado ou laminado e usinados. A ponta de eixo normalmente é cilíndrica ou flangeada (WEG, 2006).

### 3.5.6 – Mancais e Lubrificação

Em função da aplicação, os motores elétricos podem ser fornecidos com mancais de rolamento lubrificadas a graxa, ou mancais de deslizamento com lubrificação a óleo. Os mancais de deslizamento podem ter lubrificação natural (auto lubrificáveis) ou lubrificação forçada, externa. Os mancais de rolamentos, lubrificadas a graxa, são constituídos de rolamento de esferas ou de rolos cilíndricos, dependendo da rotação e dos esforços axiais e radiais a que são submetidos (WEG, 2006).

Já para os mancais de deslizamento, com lubrificação natural, quando o rotor gira, o óleo lubrificante é recolhido pelo anel pescador interno e transferido diretamente à superfície do eixo criando uma camada de óleo entre o eixo a superfície dos casquilhos do mancal (WEG, 2006).

Em conjuntos acionados por acoplamentos hidrodinâmicos, a lubrificação externa pode ser integrada, ou seja, o próprio tanque de óleo e bomba mecânica do HC podem desempenhar o papel de lubrificação do motor elétrico e da máquina acionada, economizando espaço e a inclusão de mais uma unidade hidráulica externa (VOITH, 2010).

### **3.6. Acoplamentos hidrodinâmicos**

Acoplamentos hidrodinâmicos (HC) são turboacoplamentos hidráulicos que conectam o acionador principal (normalmente um motor elétrico) à máquina acionada, que pode ser uma bomba, um compressor ou um ventilador. A potência é transmitida pela transferência de energia cinética do óleo no interior da câmara de trabalho. O nível do fluido pode variar de 0% a 80% do volume total da câmara de trabalho, volume entre o rotor bomba (ou primário) e o rotor turbina (ou secundário) e quanto mais alto o nível do fluido no interior da câmara de trabalho, maior será a velocidade da máquina acionada (ESTNER, 1998).

#### **3.6.1 - Princípio de Funcionamento**

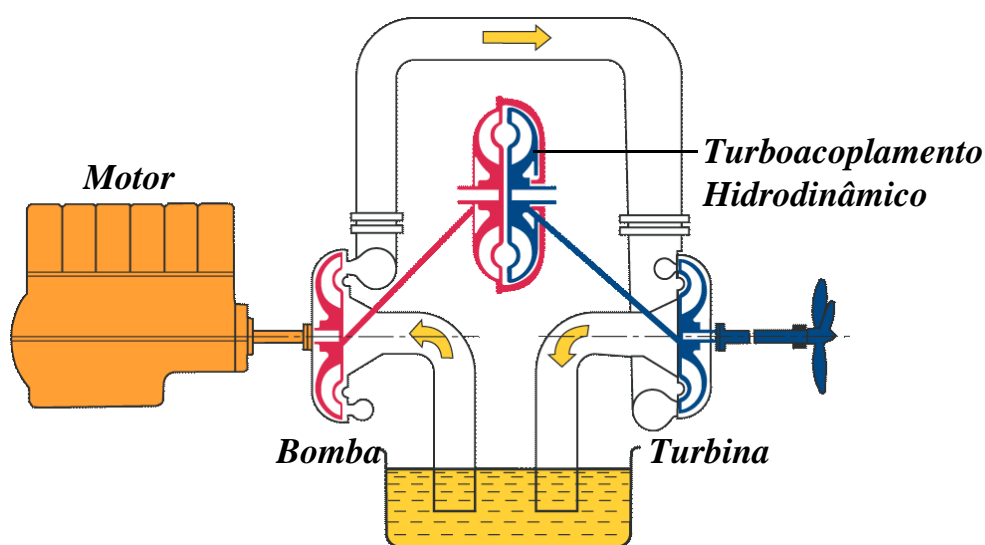
O princípio hidrodinâmico de transmissão de energia foi descoberto por Föttinger, no início do século XX, que, em seus estudos sobre o sistema de transmissão de energia, observou que, ao partir o motor, era possível transmitir energia cinética hidrodinamicamente. Em sua experiência, o motor foi conectado a uma bomba centrífuga que foi ligada, em circuito fechado, a uma turbina do tipo Francis por um circuito fechado. Essas duas partes foram conectadas ao tanque de óleo através de tubos (FOTTINGER *apud* PEIKERT, 1992).

Após este ensaio, Föttinger decidiu eliminar a tubulação, e dessa forma, aproximou os rotores da bomba centrífuga e da turbina, promovendo uma construção mais compacta, eliminando a tubulação e, conseqüentemente, reduzindo as perdas de energia no processo, conforme ilustrado na Figura 3.21. Sinclair deu continuidade a esse projeto, o qual foi posteriormente desenvolvido em escala industrial (SINCLAIR *apud* PEIKERT, 1992).

Sabe-se que, ao se colocar dois ventiladores, um em frente ao outro, mas só ligarmos um deles, o outro irá girar devido à força do fluxo de ar de encontro às suas pás. Com o HC acontece o mesmo, só que ao invés de um fluxo de

ar, temos um meio líquido como elemento transmissor, o óleo lubrificante (VOITH, 2007).

A energia transmitida do rotor bomba para o rotor turbina só é possível quando há escorregamento, ou diferenças de velocidades entre o rotor primário e secundário. Nas condições de projeto, o escorregamento mínimo, pode variar entre 1,5 e 3,0%, dependendo do volume de óleo dentro da câmara de trabalho (FECHNER, 1997).



**Figura 3.21: Representação da conversão de energia estudada por Föttinger.**  
Fonte: HPT Engineering, 1998.

O rotor bomba absorve a energia mecânica do motor elétrico e a transforma em energia cinética transmitida ao fluido, Figura 3.22. Esta é absorvida pelo rotor turbina do HC, que a transforma novamente em energia mecânica para a máquina acionada (TORREIRA, 1996).

Com o HC é possível modular a rotação na saída para a máquina acionada através da variação da quantidade de óleo dentro da câmara de trabalho. Essa variação ocorre por intermédio do ajuste do posicionamento do tubo captador de óleo, proporcionando o controle das características operacionais da máquina acionada, sendo especialmente indicado para acionamentos com por motores elétricos de médias e altas tensões de alimentação (HÖFERT, 1999).



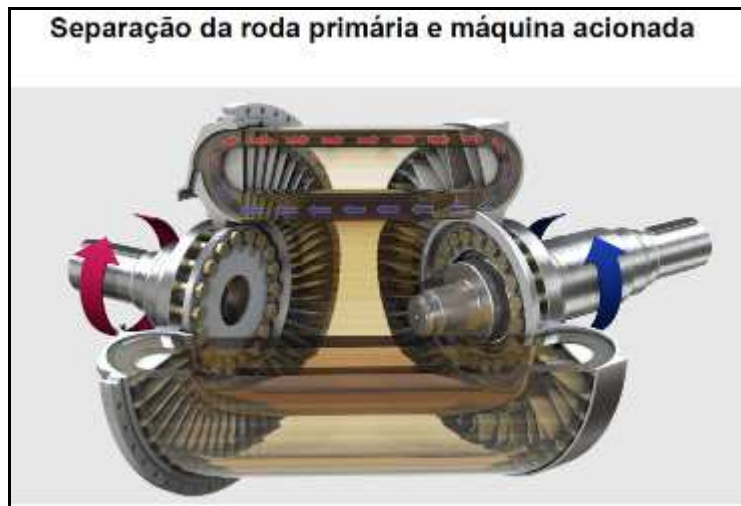


Figura 3.22: Circuito de óleo no interior da câmara de trabalho. Fonte: HÖLLER, 2008.

Uma vez que o fluxo de óleo circula entre os dois rotores e transmite a energia unicamente sob forças dinâmicas, não há desgaste mecânico, pois não há contato físico entre as partes rotativas de transmissão de potência, conforme ilustrado na Figura 3.23. Os torques nos eixos de entrada e de saída são iguais, pois só existem dois elementos (GLASBRENNER & WORSCH, 1990).

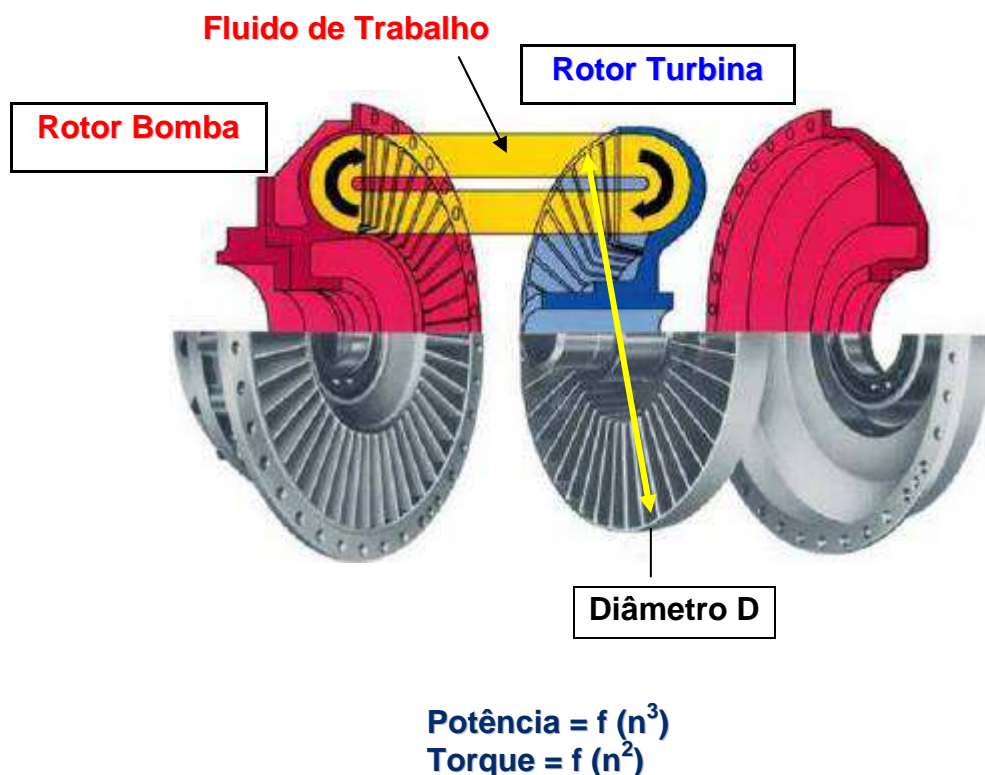
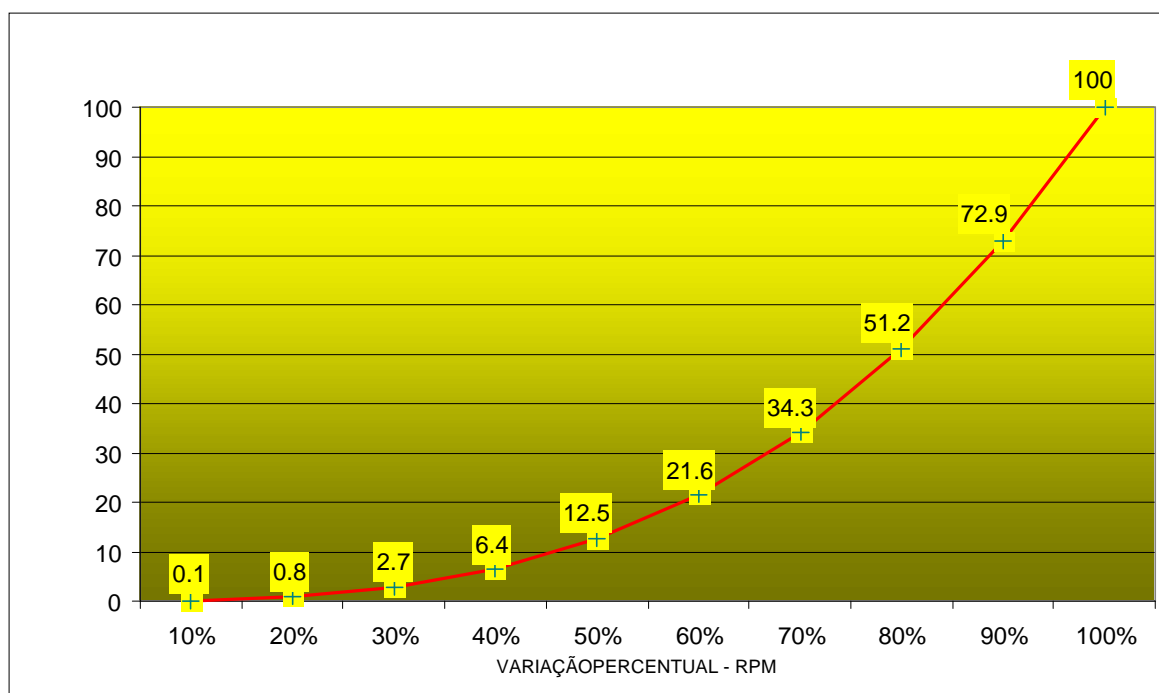


Figura 3.23: Principais componentes de um acoplamento hidrodinâmico. Fonte.: HÖLLER, 2002.

Pelas funções representadas na Figura 3.24, é possível verificar que a potência varia com o cubo da rotação; portanto, essa variação pode ser expressa conforme a curva genérica representada pela Figura 3.25.



**Figura 3.24: Curva característica potência x rotação de HCs.**

O desenvolvimento industrial dos turboacoplamentos hidrodinâmicos remonta à década de 1930. No Brasil, as atividades foram iniciadas na década de 1960, com a fabricação para o mercado interno de acoplamentos de enchimento constante, HCs e conversores de torque (VOITH, 2007).

Os acoplamentos hidrodinâmicos podem ser de enchimento variável, objeto deste estudo, ou de enchimento constante (sem tubo captador e com câmaras secundárias de óleo). Os acoplamentos de enchimento constante são amplamente aplicados no acionamento de correias transportadoras. Já os HCs, são mais utilizados para controle de rotação de equipamentos cuja curva típica de torque, é parabólica, tais como bombas, compressores e ventiladores. Há referências de HCs usados como embreagem, para evitar sobrecarga no motor elétrico e no equipamento acionado por sucessivos desligamentos do conjunto motobomba (PEIKERT, 1992).

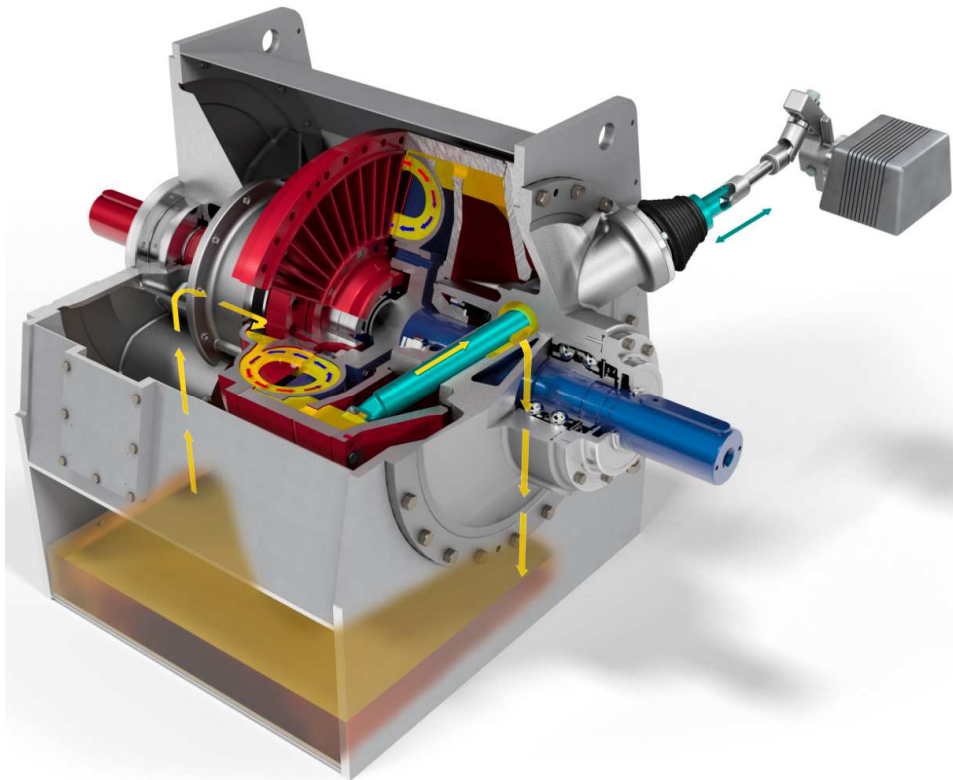
O funcionamento dos acoplamentos hidrodinâmicos explicado neste item é uma das possíveis maneiras de operação existentes, entre algumas outras tecnologias disponíveis, cujos princípios diferem entre si. Todavia, só serão considerados nesta dissertação aqueles acoplamentos hidráulicos, cuja transmissão de energia é realizada quando 100% do óleo é transferido do rotor primário para o secundário.

Sendo assim, diferentemente dos princípios básicos de funcionamento descritos nos parágrafos anteriores, é importante ressaltar que existem acoplamentos hidrodinâmicos que dispensam o uso de tubo captador, que é substituído pelo controle por válvulas. Portanto, nesses casos, o enchimento da câmara de trabalho é comandado por válvulas de controle de vazão, tendo o seu rendimento apresentado na Figura 3.26.

Outros tipos de variadores de velocidade hidrodinâmicos de alta performance, como o multiplicador planetário de velocidade, VORECON, não serão abordados neste estudo, por não serem aplicados a conjuntos motobombas utilizados em saneamento. Esses variadores planetários de alto rendimento realizam, de forma simultânea, a variação e a multiplicação da rotação. Portanto, são mais comumente aplicados a compressores de processo e em algumas bombas de alimentação de caldeira que demandem elevada faixa de potência e alta rotação. A razão para o alto rendimento do multiplicador planetário reside no fato de que 75% da potência é transmitida mecanicamente, ou seja, diretamente através de conexão mecânica entre o eixo principal e engrenagem planetária (VARIABLE SPEED PLANETARY GEAR, 2005).

Como já mencionado, o nível de óleo dos HCs pode variar conforme a demanda de processo. Este procedimento tem como objetivo elaborar uma rampa de partida suave da máquina sendo, portanto, um equipamento ideal para acelerar grandes massas, além de possibilitar a alteração da velocidade da máquina acionada em operação dentro dos limites do motor. Como apresentado pela Figura 3.25, o fornecimento do fluido de transmissão é feito

através de um tanque de óleo do próprio HC, e permite uma partida do motor totalmente sem carga (PEIKERT, 1992).

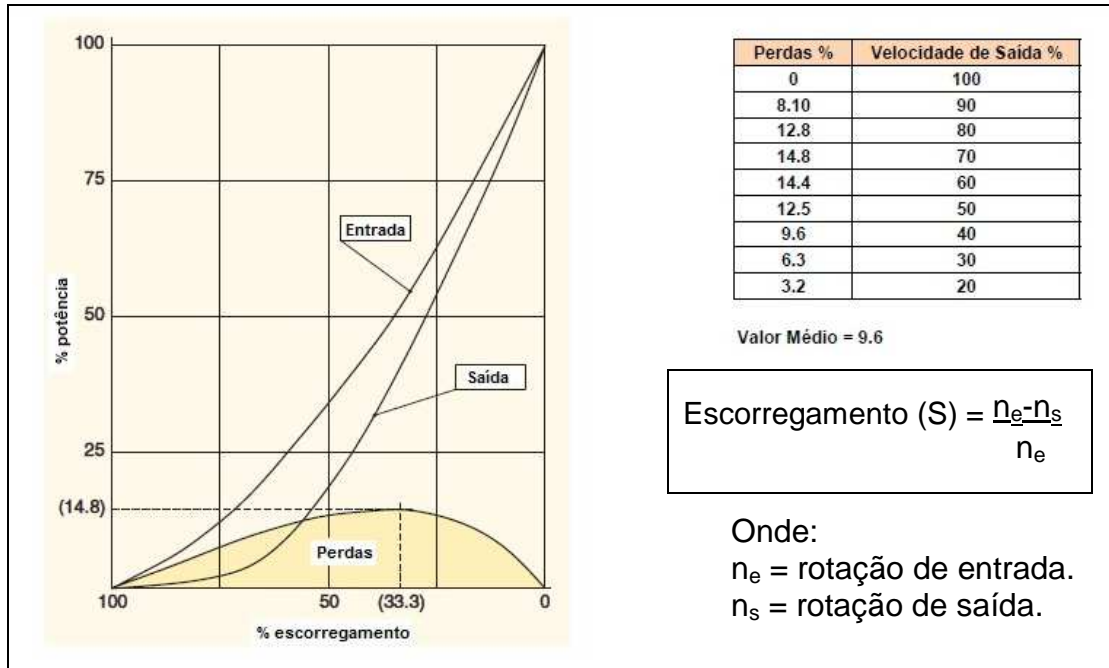


**Figura 3.25: Vista 3D em corte do acoplamento hidrodinâmico. Fonte: Voith 2010**

Para uma mesma velocidade motora, quanto maior for a potência motora, maior será o tamanho do acoplamento. Entretanto, para uma mesma potência, quanto maior a velocidade, menor será o tamanho do acoplamento (VST COUPLING, 2010).

### **3.6.2 - Curvas características de HCs**

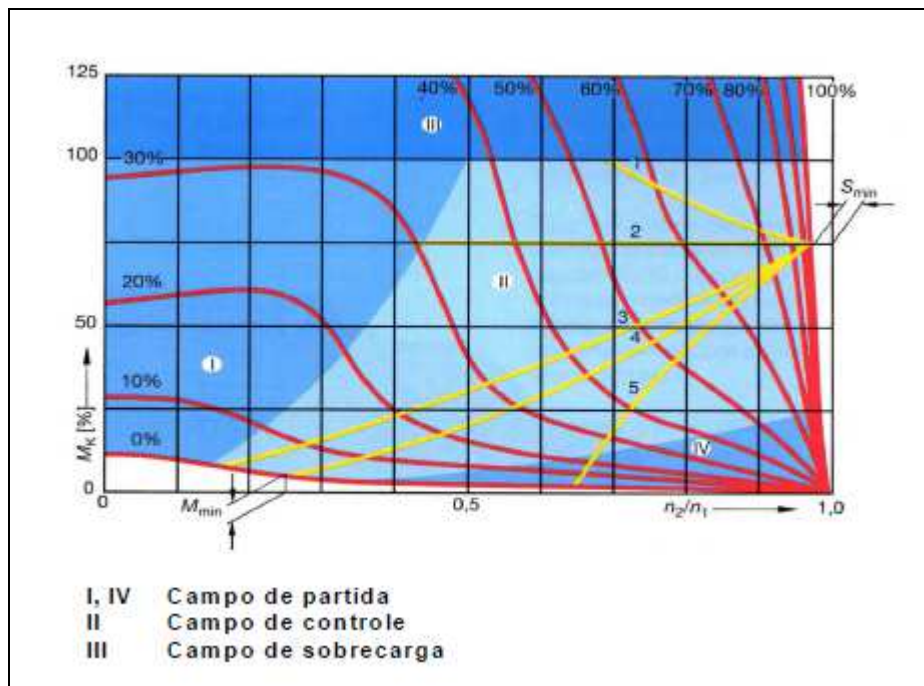
A curva característica de potência de um acoplamento hidrodinâmico está representada pela potência ( $P$ ) em função da velocidade do rotor turbina (entrada) ou de forma inversa em função do escorregamento “S”, Figura 3.26.



**Figura 3.26: Gráfico potência x escorregamento para equipamentos centrífugos.**

Fonte: Transfluid, 2011

As curvas características de torque em função da velocidade da máquina ou do escorregamento estão representadas na Figura 3.27. As várias curvas de torque (0% a 100%) indicam as diferentes posições do tubo captador, ou seja, os diferentes graus de enchimento (FECHNER, 1994).



**Figura 3.27: Curvas características torque x rotação de HCs. Fonte: FECHNER, 1994**

Pela análise da Figura 3.27, pode-se definir:

- 1- Torque Decrescente (Bombas de processos em que a densidade sofre alterações).
- 2- Torque Constante (Transportador de correia e compressores alternativos).
- 3- Torque Crescente (Bombas de alimentação de caldeira com variação de pressão).
- 4- Torque Parabólico (Ventilador, bombas sem contrapressão).
- 5- Torque Crescente (Bombas de alimentação de caldeira com pressão fixa).

**Observações:**

- Observando-se as curvas de enchimento, nota-se que quanto maior o enchimento, maiores são a velocidade de saída e a eficiência.
- A velocidade de saída é obtida no ponto de interseção das curvas de torque do HC ( $M_k$ ) e da máquina acionada, e quanto mais definido for o ponto de interseção melhor será a precisão de regulagem.
- No campo II consegue-se alta precisão de regulagem. Nos demais não ocorre esta precisão de regulagem e, portanto, não se aconselha o uso de variação de velocidade nestes campos.
- No eixo vertical, as ordenadas ( $M_k$ ) representam o percentual de torque transmitido em função da rotação do eixo de saída, eixo das abscissas, que representa o percentual de rotação do eixo de saída.
- A velocidade de máquinas com curvas característica de perfil parabólico, pode variar a rotação de 25 a 100% com total precisão de ajuste e regulagem.

**3.6.3 - Aplicação de acoplamentos hidrodinâmicos**

Os acoplamentos hidrodinâmicos são tipicamente apropriados para acionamento dos seguintes equipamentos: bombas centrífugas, compressores e ventiladores.

Sempre que as características dos equipamentos acionadores e acionados não coincidirem, a aplicação de um HC pode ser considerada de utilidade em diversos segmentos da indústria, tais como em equipamentos para movimentação de materiais e, particularmente, em saneamento, na indústria

de óleo e gás, termelétricas, petroquímica, siderurgia, indústria de papel e celulose, dentre outras (VOITH, 2007).

No setor de saneamento são utilizados em bombas de sistemas de abastecimento de água (SAA) e ETE's, em bombas de distribuição de água e em bombas de elevatórias de esgoto. Na indústria petroquímica e de óleo e gás em compressores de processo, devido à elevada rotação demandada por estes equipamentos, o acoplamento com caixa multiplicadora embutida é o mais empregado, sendo chamado de *gear coupling*. São utilizados também em ventiladores de grande porte e em bombas de descoqueamento.

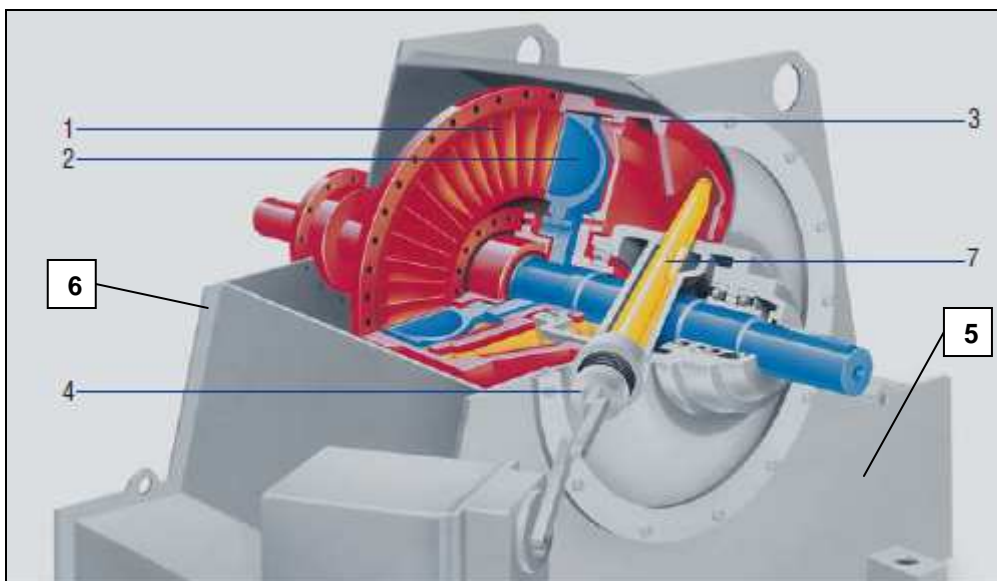
Em plataformas marítimas *offshore* são utilizados em bombas de exportação de petróleo e em bombas de injeção de água. Em oleodutos e gasodutos (O&G), em bombas de óleo bruto e em compressores de gás natural. Em termelétricas, são utilizados em bombas de alimentação de caldeiras, em bombas de refrigeração de água, em bombas de condensados e em ventiladores e exaustores. Na indústria de papel e celulose, HCs podem ser aplicados em bombas de polpa e em bombas de alimentação de caldeiras.

Portanto, através dos exemplos acima, verifica-se que os turboacoplamentos hidrodinâmicos apresentam inúmeras aplicações no acionamento dos mais diversos equipamentos rotativos, em importantes campos da indústria.

#### **3.6.4 - Construção de acoplamentos hidrodinâmicos**

- O HC é apoiado, através de mancais próprios e independentes, em uma carcaça fechada. Dependendo da potência e velocidade aplicadas, estes mancais poderão ser de rolamentos ou deslizantes.
- A ligação do variador é feita através de conexões mecânicas do tipo elementos elásticos (borracha, dentadas ou lâminas).
- O HC é apropriado para o trabalho ao tempo, em ambientes agressivos, pois as partes rotativas não estão expostas ao ar livre.
- Instrumentação necessária:

- Termômetro: controle da temperatura do óleo na entrada da câmara de trabalho e na saída.
- Termostato: para alarme ou desarme do acionamento elétrico caso a temperatura de saída exceda o máximo admissível.
- Manômetro: para controle da pressão do óleo de lubrificação.
- Pressostato: para desarme do acionamento quando a pressão de óleo estiver abaixo do mínimo admissível. (VOITH, 2007).



**Figura 3.28: Vista externa e em corte parcial de HC. Fonte: VST Coupling, 2010.**  
 1 – Rotor primário; 2 – Rotor secundário; 3 – Concha; 4 – Guia do tubo captador; 5 – Tanque de óleo ; 6 - Carcaça; 7– Tubo captador.

Na Figura 3.28, são apresentados os principais componentes dos HCs. Uma bomba de funcionamento contínuo retira o óleo do tanque localizado sob o acoplamento (que nos HCs de menor porte, também serve de base) e o envia para a câmara de trabalho e para lubrificação. O óleo destinado à lubrificação dos mancais passa antes por filtros duplos. Tanto o sistema de trabalho, quanto o sistema de lubrificação, após saírem do tanque passam pelo trocador de calor (VOITH, 2007).

O calor gerado neste processo é dissipado através de um trocador de calor externo. O meio refrigerante pode ser água ou ar, dependendo das condições e disponibilidades logísticas do local de operação (VST COUPLING, 2010).



### 3.6.5 - Acoplamentos hidrodinâmicos tipos túnel

Os acoplamentos de construção tipo túnel, Figuras 3.29 e 3.30, têm um projeto auto-sustentável em uma carcaça tipo túnel com desmontagem através de tampo axial. Os rotores são apoiados na carcaça mediante mancais lubrificados. O motor elétrico e a máquina acionada são interconectados ao variador através de conexões mecânicas do tipo elementos elásticos (borracha, dentadas ou lâminas) (PEIKERT, 2000).

O tanque de óleo é integrado à carcaça. A bomba de óleo de trabalho é diretamente acionada pelo eixo principal de entrada. Os eixos são apoiados em mancais de rolamento de esfera lubrificados por uma bomba mecanicamente incorporada ao acoplamento hidrodinâmico, bomba essa que é acionada diretamente pelo eixo primário do HC (PEIKERT, 2000).

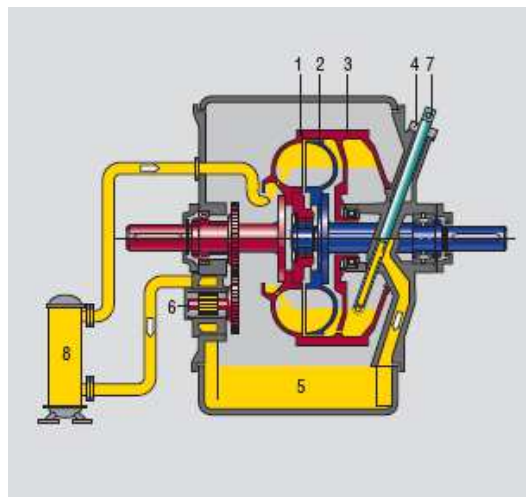


Figura 3.29: Seção transversal de HC tipo túnel. Fonte: HPT Engineering 1988.

1 – Rotor bomba, ou primário; 2 – Rotor turbina, ou secundário; 3 – Concha; 4 – Carcaça do tubo captador; 5 – Tanque de óleo ; 6 – Bombas de circulação de óleo; 7 – Tubo captador ; 8 - Trocador de calor (óleo de trabalho e lubrificação).



Figura 3.30: Acoplamento tipo túnel. Fonte: VST Coupling, 2010.

### 3.6.6 - Características gerais dos acoplamentos hidrodinâmicos

Segundo Ernestberger, 1998; Fechner, 1997; Peikert, 1992 e Voith, 2007, as características e benefícios proporcionados pelos HCs são:

- Aceleração suave de grandes inércias durante a partida e em operação, sem a necessidade de motor superdimensionado ou especiais.
- O motor só precisa acelerar a própria inércia e a do rotor primário do HC.
- Ausência de harmônicos gerados pelos acionadores.
- Amortecimento de choques (*shockes* e vibrações torsionais).
- Transmissão de torque sem desgaste e sem trancos. Redução do *stress* mecânico em todo o conjunto motobomba.
- Baixo nível de ruído devido ao fato de não haver contato mecânico direto.
- Possibilidade de limitar o torque transferido para o equipamento acionado.
- Larga faixa de variação de velocidade com controlabilidade e precisão.
- Acionamento por motores de indução, mais simples e econômicos.
- Possibilidade de interrupção de transmissão de potência sem paralisação do motor. Funcionado como uma embreagem.
- Eliminação dos elementos de restrição, sujeitos a desgaste (ex. válvulas).
- Lubrificação integrada do conjunto motobomba (motor, HC e bomba) através do tanque de óleo do HC, eliminando o uso de unidade externa.

- Como desvantagem, há o fato de que o pico de corrente de partida atingido pelo motor elétrico na partida não é reduzido, apesar de o tempo de duração ser menor.
- A variação de rotação através do emprego de acoplamento hidrodinâmico é individualizada, ou seja, cada conjunto motobomba precisa de um HC específico.

### **3.6.7 - Dimensionamento de acoplamentos hidrodinâmicos**

Principais dados a serem considerados na especificação de um turboacoplamento de velocidade variável: A) Consumo máximo de potência da máquina acionada em kW e potência / velocidade motoras; B) Rotação máxima da máquina acionada em rpm; C) Disponibilidade de sistema para refrigeração (Água ou Ar); D) Tipo de instalação (abrigada ou ao tempo); E) Se o sistema será instalado em área classificada (em caso de área de risco).

Além do exposto, há os seguintes tópicos a considerar:

- Máquina acionada (curva característica de performance).
- Temperaturas: ambiente, máxima e mínima.
- Faixa de regulagem necessária, ou seja, variação de rpm demandada.
- Sentido de giro do eixo da máquina.
- Posição do eixo do motor (horizontal ou vertical).

Exemplo de seleção de HCs está representado na Figura 3.31.

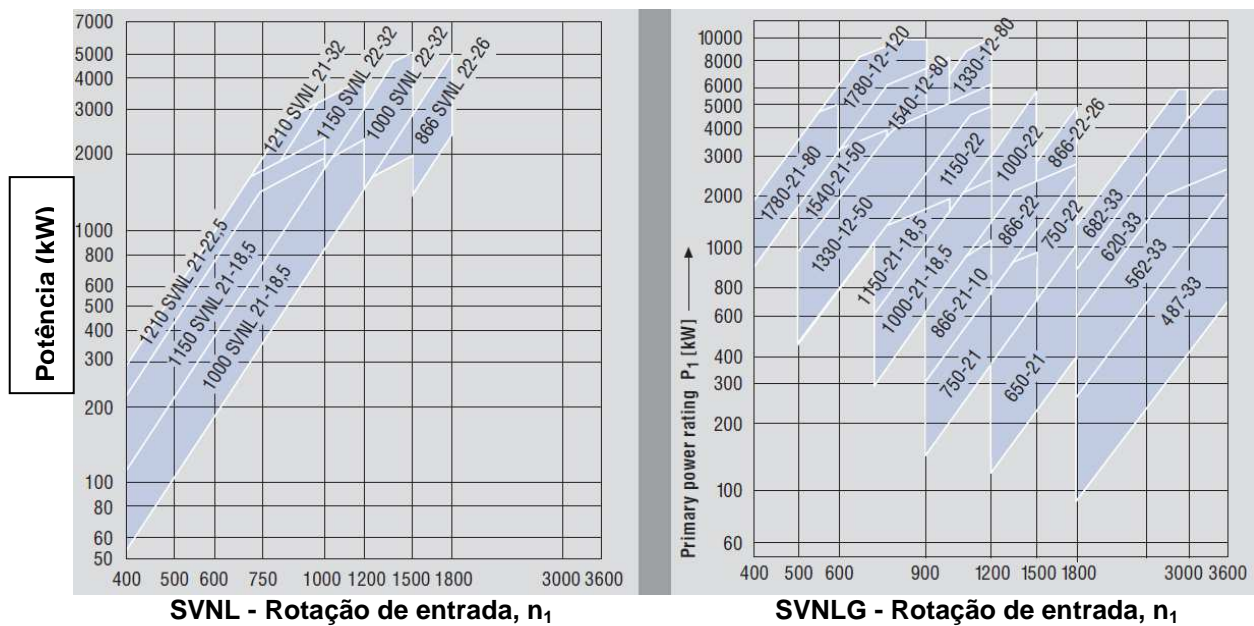


Figura 3.31: Diagrama de seleção de HCs. Fonte: VOITH TURBO, 2010.

### 3.6.8 - Sistema de lubrificação de HCs

Em funcionamento normal dos HCs, a lubrificação é feita automaticamente, mesmo no período de transição entre o desligamento do motor elétrico e a parada completa do conjunto motobomba. Em caso de parada prolongada, a bomba de óleo deve ser acionada pelo menos uma vez por mês para lubrificação das partes rotativas. O óleo de lubrificação e de trabalho recomendado segue o padrão ISO VG 32. O fabricante recomenda que a revisão geral do acoplamento hidrodinâmico tipo túnel seja realizada, em média, a cada 6 anos de operação. (VOITH, 2007).

### 3.6.9 - Sistema de controle e considerações sobre o HCs.

Ao longo das últimas décadas, os HCs experimentaram diversas modificações internas para aumento de performance e, conforme a tecnologia disponível em cada época, passaram por diversos sistemas de atuação do tubo captador de óleo, ou seja: hidráulico, eletro-pneumático, eletro-hidráulico. Atualmente, o sistema de atuação do tubo captador é eletro-mecânico, podendo ser controlado de três modos distintos, a saber: remoto via PLC (sinal de 4-20mA), local através de botoeiras ou potenciômetro, e manual através de volante (VOITH, 2010).

### 3.7 - Descrição do *software* EPANET

O simulador hidráulico usado nesta dissertação foi o modelo EPANET 2.0 desenvolvido pela Agência para Proteção do Ambiente dos Estados Unidos da América, EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) e disponibilizado **gratuitamente** através da Internet. O simulador EPANET compreende um conjunto de funções que permite efetuar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade de água em sistemas de distribuição de água em pressão. Este modelo utiliza o método híbrido nó-malha para resolver as equações da continuidade, da conservação de energia e a lei de resistência ao escoamento, que caracterizam as condições de equilíbrio hidráulico da rede em um dado instante.

O EPANET modela um sistema de distribuição de água como sendo um conjunto de elementos ligados aos nós, elementos estes que representam as tubulações, bombas e válvulas de controle, e os nós representam ligações entre os diversos elementos, assim como reservatórios de nível fixo (RNF) e de nível variável (RNV). Apresenta um ambiente gráfico integrado para edição do modelo hidráulico e dos cenários a serem simulados. Permite a execução de simulações hidráulicas e de qualidade da água, e possibilita a visualização dos resultados em vários formatos, inclusive compatíveis com a utilização em ambientes de edição de texto. Sua interface gráfica permite examinar mapas de rede com auxílio de códigos de cores, além de apresentar desenhos gráficos de séries temporais, perfis de tubulação, mapas de pressões, freqüências e outros.

Além de muitas outras características do pertinentes ao módulo de simulação hidráulica do *software* EPANET, é possível citar as seguintes listadas a seguir:

- Dimensão ilimitada da rede em termos de números de elementos.

- Cálculo da perda de carga contínua na tubulação de acordo com a fórmula de Hazen-Williams, de Chezy-Manning ou da fórmula de Darcy-Wiesbach.
- Considerações a respeito da perda de carga localizada em peças, como por exemplo, perdas em curvas ampliações, reduções, entre outras.
- Modelação de bombas de velocidade constante e variável.
- Cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo.
- Modelação dos principais tipos de válvulas, tais como, de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de vazão.
- Modelação de reservatórios de armazenagem de nível variável.
- Configuração das condições de operação do sistema em controle simples, dependendo de uma só condição (por exemplo, período do dia, altura de água em um reservatório de nível variável), ou em controles com condições múltiplas (por exemplo, ligar / desligar a bomba e abrir / fechar a tubulação de *by-pass*, quando a altura de água no reservatório de nível está acima / abaixo de determinado valor previamente especificado, respectivamente).
- Utilização de uma imagem de fundo no esquema de rede, como por exemplo, uma base cartográfica, em escala, evitando a digitação do comprimento dos trechos.

### **3.8 - Índices de Confiabilidade, MTBF e Disponibilidade**

Confiabilidade é a capacidade de atender a especificação, dentro de condições definidas durante certo período de funcionamento, condicionado a estar operacional no início do período. É uma medida probabilística, pois falhas são fenômenos aleatórios. Confiabilidade não pode ser confundida com disponibilidade. Um sistema pode ser altamente disponível mesmo apresentando períodos de inoperabilidade, desde que esses períodos sejam curtos e não comprometam a qualidade do serviço (WEBER, 2006).

Confiabilidade, segundo King & Magid (1979), é “a probabilidade de que parte de um equipamento ou componente desempenhe uma função como pretendido por um dado período de tempo em um determinado ambiente” (*apud* RAPOSO, 2004).

As medidas de confiabilidade mais usadas na prática são: taxa de falhas, MTTF, MTTR, MTBF. Os fabricantes devem fornecer essas medidas para os seus produtos, que são determinadas estatisticamente, observando o comportamento dos componentes e dispositivos fabricados (WEBER, 2006).

A taxa de falhas ( $\lambda$ ) é o número esperado de defeitos em um dado período de tempo. (WEBER, 2006).

O MTTF (do inglês *mean time to failure*) é tempo esperado até a primeira ocorrência de defeito e o MTTR (do inglês *mean time to repair*) é o tempo médio para reparo do sistema. O MTBF (do inglês *mean time between failure*) é tempo médio entre as falhas do sistema.

A taxa de falhas ( $\lambda$ ) de um componente é dada pelo número de falhas por unidade de tempo e varia ao longo da vida do componente, de acordo com o perfil representado pela Figura 3.32:

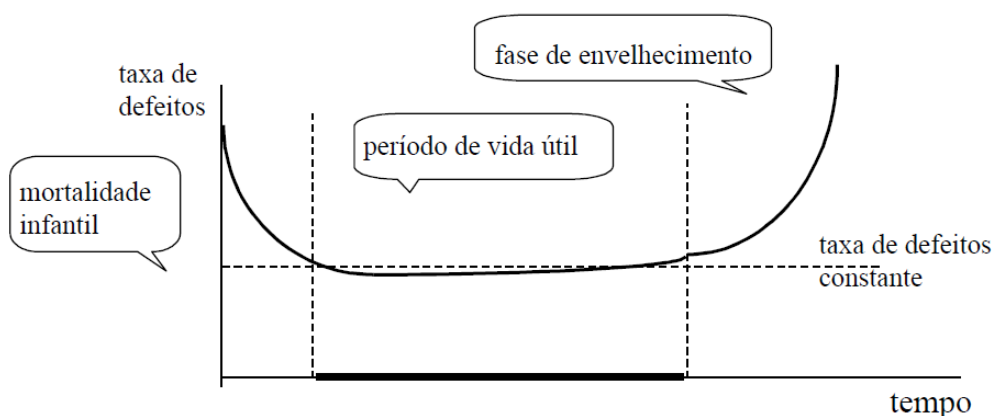


Figura: 3.32: Curva da banheira. Fonte: Weber, 2006

Uma representação usual para a taxa de defeitos de componentes é dada pela curva da banheira (Figura 3.32), que apresenta 3 fases distintas, a saber: A) mortalidade infantil: componentes fracos e mal fabricados. B) vida útil: taxa de falhas (defeitos) constante e C) envelhecimento: taxa de falhas crescente.

Para o período de vida útil, a taxa de falha ( $\lambda$ ) constante pode ser calculada da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{1}{\text{MTTF}}, \text{ se } \text{MTTF} = \text{MTBF}$$

Como mencionado, a taxa de falha corresponde à razão entre o número de falhas (f) por tempo de operação (t), a relação anterior pode ser definida como:

$$\text{MTBF} = \frac{1}{f/t}, \text{ logo: } \text{MTBF} = \frac{t}{f}$$

Com relação a disponibilidade (D), segundo Souza (2004), esta é a fração do tempo (percentual) em que o sistema opera normalmente. Representa a probabilidade de um sistema estar operando no instante “t” e pode ser expressa como segue:

$$D = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTBF}}$$



## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a realização desta dissertação, foram desenvolvidos dois estudos de casos reais. O primeiro foi na estação de bombeamento de esgoto da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), em São Paulo, e o segundo nas estações de bombeamento de água da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), no Alto Recalque do Guandu (ARG), Rio de Janeiro.

### **4.1 - ESTUDO DE CASO I - EE Final - ETE ABC / SABESP**

#### **4.1.1 - Estudo realizado**

Foram realizados estudos comparativos entre conjuntos motobombas existentes, que estão em operação desde junho de 1998, com um conjunto teórico, supostamente operando com rotação fixa durante o mesmo período, ou seja, sem variação de velocidade.

A proposta desta análise é avaliar e quantificar o quanto a SABESP efetivamente economizou ao longo destes últimos 12 anos com eficiência energética, ao decidir, na fase de projeto, pela especificação técnica de motobombas dotadas de variação de velocidade em média tensão com emprego de acoplamentos hidrodinâmicos.

Sendo assim, a análise do caso I será a seguinte:

- Uso de HC (caso real) x rotação fixa via controle por válvula (teórico).

#### **4.1.2 - Descrição da estação de tratamento ETE ABC**

A ETE ABC tem capacidade para atender a uma população equivalente a 1.400.000 habitantes, com vazão máxima de projeto de 3.000 l/s e vazão média de projeto de 1.900 l/s. O tratamento é do tipo lodo ativado convencional em nível secundário, cujo processo, tem um grau de eficiência de 90% de remoção de carga orgânica medida em DBO. Quanto ao sistema de esgotamento sanitário (Figura 4.1), o esgoto é transportado para a

estação por meio de uma rede constituída por interceptores, sifões e emissários, totalizando 28 Km de extensão, com diâmetros variando de 0,7 m a 2,5 m. A ETE ABC está localizada no município de São Paulo. Atende os municípios de Santo André, São Bernardo, Diadema, São Caetano do Sul, Mauá, parte da cidade de São Paulo e às reversões das Bacias de Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Santo André (Indústrias), São Bernardo do Campo e Diadema.

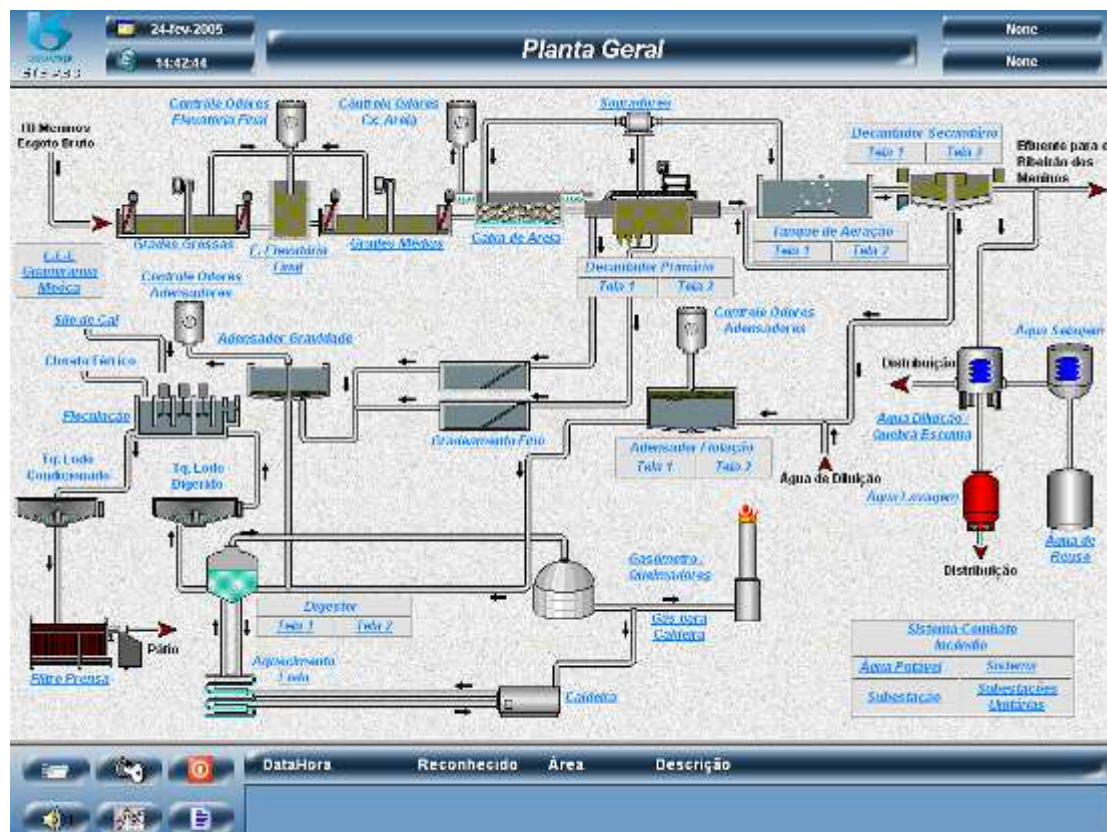


Figura 4.1: Processo simplificado de tratamento da ETE ABC. Fonte: SABESP, 2011

### 4.1.3 - Processo de Tratamento de Esgoto da ETE ABC

#### 1 - Gradeamento Grosso Mecanizado e Estação Elevatória Final

Na entrada da estação é realizado o gradeamento dos materiais grosseiros presentes nos esgotos, com o objetivo de proteção das bombas da Estação Elevatória Final (EEF), localizada através das seguintes coordenadas geográficas **23°36'44.14" Sul** e **46°34'55.43" Oeste**. São duas grades com espaçamento de 8 cm entre barras e o material retido é disposto em aterro sanitário. A EE Final conta com um poço seco de sucção de formato

retangular e com profundidade de 12 m, onde estão instaladas 3 motobombas centrífugas horizontais de rotação variável (Figura 4.2) com as seguintes características: vazão variando de 1.470 l/s a 2.550 l/s; altura manométrica entre 19,20 a 20,20 m CA, que elevam o esgoto até o canal de chegada da unidade de gradeamento médio. Os motores elétricos são de média tensão (6.900 V), com 940 CV de potência.



**Figura 4.2: Conjuntos motobombas com HCs na EE Final, ETE ABC**  
Fonte: Sabesp, 2011.

Após a passagem pela estação de bombeamento da elevatória final, onde estão instaladas as bombas objeto deste estudo, o processo de tratamento da ETE ABC consiste das seguintes etapas (Figuras 4.1 e 4.3):

**2 - Gradeamento Médio Mecanizado; 3 - Caixas de Areia; 4 - Decantadores Primários; 5 - Tanques de Aeração; 6 - Decantadores Secundários; 7 - Adensadores de Lodo por Gravidade; 8 - Adensadores de Lodo por Flotação; 9 - Digestores Anaeróbios; 10 - Condicionamento Químico dos Lodos; 11 - Desidratação Mecânica (Filtro Prensa); 12 - Sistemas de Apoio: 12.1 - Gasômetro/Queimadores; 12.2 - Edifício das Caldeiras; 12.3 - Sistema de Controle de Odores; 12.3 - Sistema de Supervisão e Controle (SSC); 12.4 -**

Sistema de Água de Utilidades; **13** - Subprodutos do Tratamento de Esgotos;  
**13.1** - Reuso de Água; **13.2** - Biossólido.



Figura 4.3: Fotografia aérea da ETE ABC. Fonte: SABESP, 2011.

#### 4.1.4 - Dados operacionais coletados - EE Final / ETE ABC

No âmbito do presente projeto em visita à Estação de Tratamento de Esgoto ETE ABC, foram coletados os seguintes dados operacionais e de manutenção:

- 1- Curva de operação da bomba (ANEXO 1).
- 2- Modelo da bomba.
- 3- Potência consumida pela bomba.
- 4- Vazão da bomba, nominal e máxima.
- 5- Rotação de saída da bomba.
- 6- Altura manométrica da bomba.
- 7- Modelo do motor elétrico.
- 8- Potência do motor elétrico.
- 9- Voltagem do motor elétrico.
- 10- Corrente do motor elétrico.
- 11- Rotação do motor elétrico.
- 12- Perfil de operação típico, ou variação de vazão ao longo de 6 meses (ANEXO 2).
- 13- Custo da energia elétrica consumida na estação de elevação final.
- 14- Número de paradas não programadas ocorridas.

## 4.2 - ESTUDO DE CASO II - EE Alto Recalque do Guandu, ARG / CEDAE

### 4.2.1 - Estudo realizado

Foram realizados estudos comparativos entre conjuntos motobombas existentes, que estão em operação desde junho de 1981 na estação elevatória ARG, com 2 métodos teóricos, supostamente operando com restrição por válvula e com variação de rotação por acoplamento hidrodinâmico durante o mesmo período.

A proposta desta análise é avaliar e quantificar os custos com energia elétrica da EE ARG ao longo dos últimos 20 anos e calcular os valores de energia elétrica para três condições operacionais simuladas.

- Rotação fixa (real - operação “liga-desliga”) x Variação hidráulica (teórico) x Variação com restrição por válvula (teórico).

### 4.2.2 - Descrição Geral do Sistema de Adução do Guandu

A ETA-Guandu é uma estação de tratamento de água do tipo convencional completa e é responsável pelo abastecimento de cerca de 9.000.000 de habitantes dos Municípios do Rio de Janeiro e da Baixada Fluminense. Está localizada na antiga estrada Rio-São Paulo, Km 19,5, Prados Verdes, Nova Iguaçu, RJ. Foi inaugurada no ano de 1955 a primeira etapa da Estação de Tratamento de Água do Guandu, que posteriormente foi ampliada em 1963, em 1965, em 1976 e em 1982, além de passar por sucessivas obras de melhorias e ampliações que transformaram a ETA-Guandu na **maior Estação de Tratamento de Água do Mundo, com vazão de 43.000  $\ell/s$**  (CEDAE, 2005).

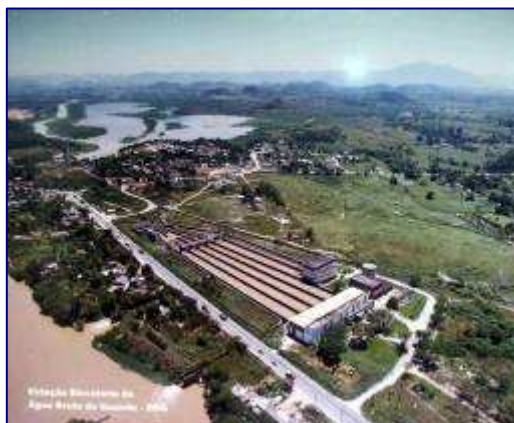
Após a captação através de duas tomadas de água, Figura 4.4, a adução de água bruta é feita por gravidade, através de dois túneis de 270 metros de extensão, até os canais desarenadores, Figura 4.5. Nestes canais, com a seção bastante aumentada, a água sofre grande redução de velocidade,



provocando a sedimentação das partículas mais pesadas, principalmente areia, contidas na água bruta (CEDAE, 2005).



**Figura 4.4: Tomadas de água, ETA Guandu**  
Fonte: CEDAE, 2011



**Figura 4.5: Desarenadores, BRG e NBRG**  
Fonte: CEDAE, 2011.

A água flui para poços de sucção das elevatórias de água bruta, Figura 4.6, com mais um sistema de gradeamento para proteção das bombas. As elevatórias de água bruta, denominadas BRG-Baixo Recalque do Guandu e NBRG-Novo Baixo Recalque do Guandu com 22 moto-bombas, 17 de 2.500  $\ell/s$  e 5 de 3.500  $\ell/s$ . Através das elevatórias, a água é elevada cerca de 15 metros, obtendo energia suficiente para chegar à Estação de Tratamento. Quatro adutoras com diâmetro de 2,5 metros e uma com diâmetro de 2,1 metros são responsáveis pela adução da água bruta por um percurso de 3,2 Km até a ETA Guandu, Figura 4.7.



**Figura 4.6 - Estações BRG e NBRG**  
Fonte: CEDAE, 2011.



**Figura 4.7 - ETA Guandu.**  
Fonte: CEDAE, 2011.

### 4.2.3 - Processo de tratamento de água da ETA Guandu

Para o transporte desse expressivo volume de água, são necessárias diversas elevatórias de água bruta e tratada, que somam 44 grupos motobombas com potências variando entre 700 e 9.000 HP, com consumo total de energia elétrica de 46.000 MWh, suficiente para suprir uma cidade com 460.000 habitantes. A ETA Guandu é responsável pelo abastecimento de 9 milhões de habitantes nos municípios do Rio de Janeiro, Nova Iguaçu, Duque de Caxias, São João de Miriti, Belford Roxo, Nilópolis e Itaguaí (CEDAE, 2005).

Após tratada, a água deixa a ETA através de dois subsistemas, o de Marapicu e Lameirão. No subsistema de Marapicu, a água é bombeada por três elevatórias de alto recalque para o reservatório do Marapicu, que tem capacidade de 20 milhões de litros. As três elevatórias são as seguintes:

- ARG - Alto Recalque do Guandu, objeto deste estudo (Figura 4.8), quando opera com os 4 grupos motobombas, representa 20% da vazão bombeada para o reservatório do Marapicu (CEDAE, 2005). A elevatória ARG está situada nas seguintes coordenadas geográficas **22°50'33.94" Sul** e **43°36'27.84" Oeste**, enquanto o reservatório do Marapicu está localizado nas seguintes coordenadas geográficas **22°50'43.20" Sul** e **43°36'6.09" Oeste**.



**Figura 4.8: Cinco conjuntos motobombas da EE ARG**  
Fonte: CEDAE, 2011.

A ARG tem cinco grupos motobombas com vazão de 1.050 l/seg (1.0 m<sup>3</sup>/s) cada. Potência de 1.800 HP cada bomba e rotação fixa de 1.184 rpm.

Tensão de alimentação de 2.300 Volts.

NARG - Novo Alto Recalque do Guandu, 5 grupos motobombas de 4.500 HP.

NEZR - Nova Elevatória da Zona Rural, 5 grupos motobombas de 3.500 HP.

As três Elevatórias bombeiam água tratada a uma altura manométrica de 110 metros de coluna d'água para o reservatório do Marapicu, de onde partem seis adutoras do macro-sistema de adução. Aproximadamente 50% da água tratada é bombeada para o reservatório do Marapicu, do qual partem seis adutoras com diâmetros variando entre 800 a 2.500 mm para aduzir água para a Zona Oeste e Zona Norte da Cidade do Rio de Janeiro e para a Baixada Fluminense (CEDAE, 2005).

No subsistema Lameirão, a água deixa a ETA Guandu por gravidade, através de um túnel subterrâneo de 11 Km de extensão até a elevatória do Lameirão, no Bairro de Santíssimo. Esta elevatória é toda escavada em rocha, com a sala de bombas situada a 60 metros abaixo do nível natural do terreno (CEDAE, 2005).

Na Estação do Alto Recalque do Guandu (ARG), foram realizados estudos comparativos entre conjuntos motobombas existentes, que estão em operação desde 1982 em regime de rotação fixa controlado através de operação "liga-desliga", com um conjunto teórico supostamente operando com rotação variável acionado por acoplamento hidrodinâmico (HC) durante o mesmo período e acionado por motor elétrico horizontal de indução de média tensão (2.300 V) e potência de 1.800 HP. Rotação motora de 1.200 rpm (6 pólos).

#### **4.2.4 - Dados operacionais coletados - EE ARG / GUANDU**

Para o presente estudo, com relação à estação elevatória EE ARG/Guandu, foram coletados os seguintes dados operacionais e de manutenção:

1- Curva de operação da bomba (ANEXO 3).



- 2- Modelo da bomba
- 3- Potência consumida pela bomba
- 4- Vazão média da bomba, nominal e máxima.
- 5- Rotação de saída da bomba.
- 6- Altura manométrica da bomba.
- 7- Modelo do motor elétrico.
- 8- Potência do motor elétrico.
- 9- Voltagem do motor elétrico.
- 10- Corrente do motor elétrico.
- 11- Rotação do motor elétrico.
- 12- Perfil de operação típico, ou variação de rotação ao longo de 24 horas.
- 13- Custo da energia elétrica consumida na estação ARG.

### **4.3 - Processamento dos dados gerados**

#### **4.3.1 - EE Final - ETE ABC**

De posse dos dados coletados (item 4.1.4) foi desenvolvido um estudo comparando dados reais entre os sistemas de bombeamento dotados de variação de velocidade com HC, com sistemas teóricos similares dotados de rotação fixa com controle por válvulas.

Foi feito um levantamento das vazões médias ao longo do tempo, e traçado um perfil de operação médio típico ao longo de 24 horas, porém com base em relatórios de operação dos últimos seis (6) meses (ANEXO 2) a ser lançado como dados de entrada no cálculo comparativo. Foram avaliados aspectos como, I) eficiência energética, II) preservação do conjunto mecânico, III) produtividade, IV) questões relativas à manutenção e V) flexibilidade operacional.

O estudo comparativo foi realizado através da utilização do software EPANET e planilha MS Excel, que alimentado com dados de vazões médias (perfil médio da demanda ao longo de 24 horas) e parâmetros extraídos da curva característica da bombas, tais como, alturas manométricas (AMT), eficiências e potência consumida, permite calcular a potência e a energia economizada

ao longo dos últimos 12 anos de operação com variador hidrodinâmico na EE final da ETE ABC, além de calcular também o tempo para o retorno do investimento realizado.

A metodologia utilizada nesta dissertação seguirá os seguintes passos: (a) modelagem do sistema existente, através do software EPANET; (b) calibração do mesmo, (c) determinação do sistema existente, através de simulações dinâmicas do sistema, baseadas no perfil de operação padrão médio levantado junto a SABESP; e (d) a emissão de relatórios e curvas apresentando a economia realizada ao longo dos últimos anos de operação com variação de velocidade pelo emprego de HC em motobomba de média tensão, comparada a uma situação hipotética, caso a ETE ABC operasse em rotação fixa ao longo de todo esse tempo, desde o início de operação da ETE, em 1998.

a) A primeira fase (modelagem do sistema) consiste na reunião de todos os dados relativos ao presente estudo, seguido da inclusão destes dados no simulador EPANET. Nesta fase, foram lançados todas as unidades que compõem o sistema, tais como: linha adutora, estação elevatória, válvulas, reservatórios, bombas, linhas de sucção, incluindo as características das mesmas necessárias à simulação, curvas das bombas, diâmetro de rede e capacidade dos reservatórios.

b) Na fase de calibração foram requeridos, da SABESP, os dados tais como medições de vazões, de pressões em pontos específicos e cotas de terrenos, que serão necessários para calibrar o sistema.

c) Na fase de diagnóstico, utiliza-se o modelo do sistema de calibração da fase anterior, para efetuar a simulação em um período de 24 horas. Nesta fase, os dados fornecidos pela SABESP foram utilizados visando retratar a situação operacional média, conforme perfil levantado após dados do históricos fornecidos pela área de manutenção da ETE. Nesta fase, será efetuada uma análise operacional do sistema, conhecendo-se as suas características. d) Os relatórios do EPANET encontram-se no item 5.1.4.

O conhecimento da realidade operacional do sistema, permite avaliar e mensurar de maneira realista os ganhos com a utilização de variação de velocidade proporcionada pelo uso de HC em motobombas de média tensão. Em uma última etapa, poderão ser sugeridas ações com alternativas técnicas que ajudem a melhorar ainda mais a performance e os ganhos, a fim de melhorar ainda mais a eficiência energética.

#### **4.3.2 - EE ARG - ETA GUANDU**

De posse dos dados obtidos (item 4.2.4), foi desenvolvido um estudo comparando dados reais entre os sistemas de bombeamento em regime de rotação fixa pela operação “liga-desliga”, com sistema teórico supostamente operando com variação de rotação.

A partir de um perfil médio típico de operação de 24 horas informado pela CEDAE com base em dados históricos, foi feito um levantamento das vazões médias ao longo do tempo, sendo lançadas como dados de entrada no cálculo comparativo. Foram avaliados aspectos como, I) eficiência energética, II) preservação do conjunto mecânico, III) produtividade, IV) questões relativas à manutenção e V) flexibilidade operacional.

O estudo comparativo foi realizado através da utilização do *software* EPANET e planilha MS Excel, que alimentado com dados de vazões médias (Perfil médio de demanda ao longo de 24 horas) e da curva característica das bombas, alturas manométricas (AMT), eficiências e potência consumida, permite que se calculem a potência e os diferentes consumos energéticos das três formas de operação simuladas ao longo de últimos 20 anos de operação da EE ARG.

A metodologia utilizada nesta dissertação seguirá os seguintes passos: (a) modelagem do sistema existente, através do *software* EPANET; (b) calibração do mesmo, (c) determinação do sistema existente, através de simulações dinâmicas do sistema, baseadas no perfil de operação padrão levantado junto a CEDAE; e (d) a emissão de relatórios e curvas

apresentando a operação com 2, 3 ou 4 bombas em paralelo, conforme situação real, estudando-se, assim, a viabilidade de inclusão de HC.

Posteriormente será feita uma comparação com uma situação hipotética, qual seja, o caso de a EE ARG operar com rotação variável ao longo de 20 anos de operação, de 1990 a 2010. Será analisado um outro cenário de rotação fixa e controle de capacidade através da restrição por válvulas.

Com o auxílio do Google Earth, foi feita a localização geográfica exata dos principais pontos da EE ARG a serem estudados nesta dissertação. Em seguida foi feito um congelamento da foto da estação elevatória, bem como do ponto de final de destino da água tratada a ser recalçada, ao reservatório do Marapicu.

a) A primeira fase (modelação do sistema) consiste na reunião de todos os dados relativos ao presente estudo, seguido da inclusão destes dados no simulador EPANET. Nesta fase, tendo ao fundo a foto de satélite das instalações elevatórias, linhas e reservatório, foram lançadas todas as unidades que compõem o sistema, tais como, linha adutora, estações elevatórias, válvulas, barriletes, reservatórios, bombas, linhas de sucção, incluindo as características das mesmas necessárias à simulação, curvas das bombas, diâmetro de rede e capacidade dos reservatórios.

b) Na fase de calibração foram requeridos da CEDAE os dados tais como medições de vazões, de pressões em pontos específicos, cotas de terrenos que serão necessários para calibrar o sistema.

c) Na fase de diagnóstico do sistema, utiliza-se o modelo do sistema de calibração da fase anterior para efetuar a simulação em um período estendido. Nesta fase, os dados fornecidos pela CEDAE foram utilizados visando retratar a situação operacional média conforme perfil levantado após dados de operação fornecidos pela mesma. Nesta fase, será efetuada uma análise operacional do sistema, conhecendo-se as suas características.

O conhecimento da realidade operacional do sistema, permitiu avaliar e mensurar, de maneira realista, os ganhos com a utilização de variação de velocidade proporcionada pelo uso de HC. Em uma última etapa, poderão ser sugeridas ações com alternativas técnicas que ajudem a melhorar ainda mais a performance e os ganhos, a fim de melhorar ainda mais a eficiência energética. d) A emissão de relatórios EPANET encontram-se no item 5.3.4.

#### **4.4 - Cálculo dos índices de Confiabilidade, MTBF e Disponibilidade**

Serão determinados os índices de confiabilidade, MTBF e disponibilidade segundo padrão de cálculo efetuado pelo fabricante do acoplamento hidrodinâmico.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 - ESTUDO DE CASO I - EE Final - ETE ABC**

Uma das razões pelas quais o estudo de caso da EE Final da ETE ABC foi selecionado para ser avaliado nesta dissertação, foi justamente o retrospecto histórico em termos de manutenção requerida pelos equipamentos que compõem o conjunto motobomba, em especial o acoplamento hidrodinâmico, cujas intervenções ao longo desses 12 anos de operação estão relacionadas no item 5.1.2.

A Estação de Tratamento de Esgoto do ABC (ETE ABC) possui, em seu sistema de tratamento de esgoto, três conjuntos motobombas operando com acoplamento hidrodinâmico desde 1998. O sistema em que esta bomba está inserida apresenta uma considerável demanda por variação de vazão de processo. Com isso, conforme perfil médio de operação ao longo de 24 horas, a bomba opera em quatro regimes de rotações diferentes.

Tendo em vista que para bombeamento em ETE's, o controle com restrição por válvula não é uma opção técnica recomendável devido ao excessivo desgaste da válvula por atrito, para a operação das motobombas da EE final da ETE ABC, foi especificado, sistema com acoplamentos hidrodinâmicos.

O objetivo específico do estudo deste caso foi comparar, do ponto de vista técnico-econômico, a operação com HC com uma situação de operação hipotética, na qual a escolha tivesse sido pela restrição por válvulas, e verificar o quanto foi economizado ao longo de 12 anos de operação da ETE ABC, além de calcular o tempo de retorno do investimento.

#### **5.1.1 - Calibração do sistema**

O primeiro passo do estudo foi modelar o sistema da EE final no *software* EPANET, conforme o perfil do funcionamento do sistema. Quatro diferentes vazões de processo foram determinadas após análise dos dados históricos

(ANEXO 1) e avaliação junto aos técnicos da ETE. Foi definido o perfil médio operacional de uma bomba, a saber: 679 rpm (velocidade nominal) operando por 4 horas, 506 rpm (75% da rotação nominal) operando por 8 horas, 453 rpm (67% da rotação nominal) operando por 8 horas e 400 rpm (59% da rotação nominal) operando por 4 horas, de acordo com o gráfico do perfil médio de operação, como demonstrado na Figura 5.4.

Após a definição do perfil do conjunto motobomba, foram inseridas no software EPANET, todas as informações do sistema, tais como: reservatório de captação (sucção com bomba afogada), válvula de gaveta na sucção, bomba a ser utilizada e a tubulação de aço com diâmetro de 1.200 mm. A tubulação de recalque tem uma extensão horizontal de 20 metros a jusante da bomba estendendo-se em seguida, ao longo de uma elevação vertical de 19 metros, como demonstrado pela Figura 5.1 que representa a configuração esquemática do sistema modelado no EPANET.

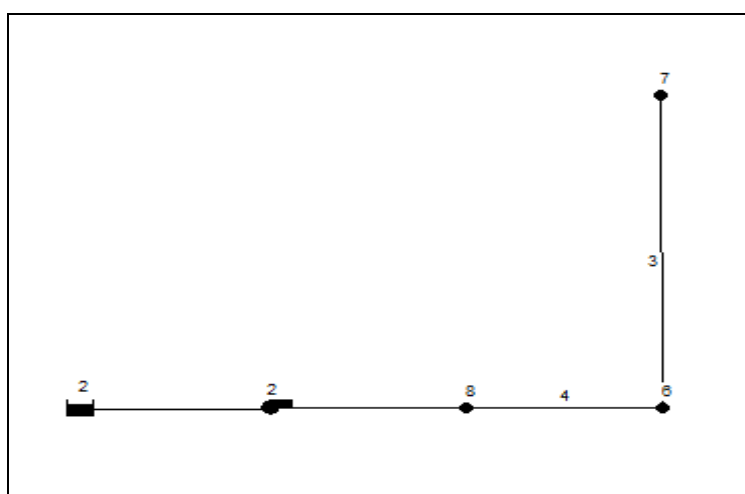


Figura 5.1: Configuração dos componentes do sistema de recalque, ETE ABC.

### 5.1.2 - Dados coletados

Conforme item 4.1.4 do capítulo Materiais e Métodos, dados operacionais foram coletados. A Figura 5.2 representa a curva característica da bomba para a rotação de 679 rpm, que é a velocidade nominal (100%). A Figura 5.3

apresenta o desenho esquemático do sistema de recalque da EE final da ETE ABC.

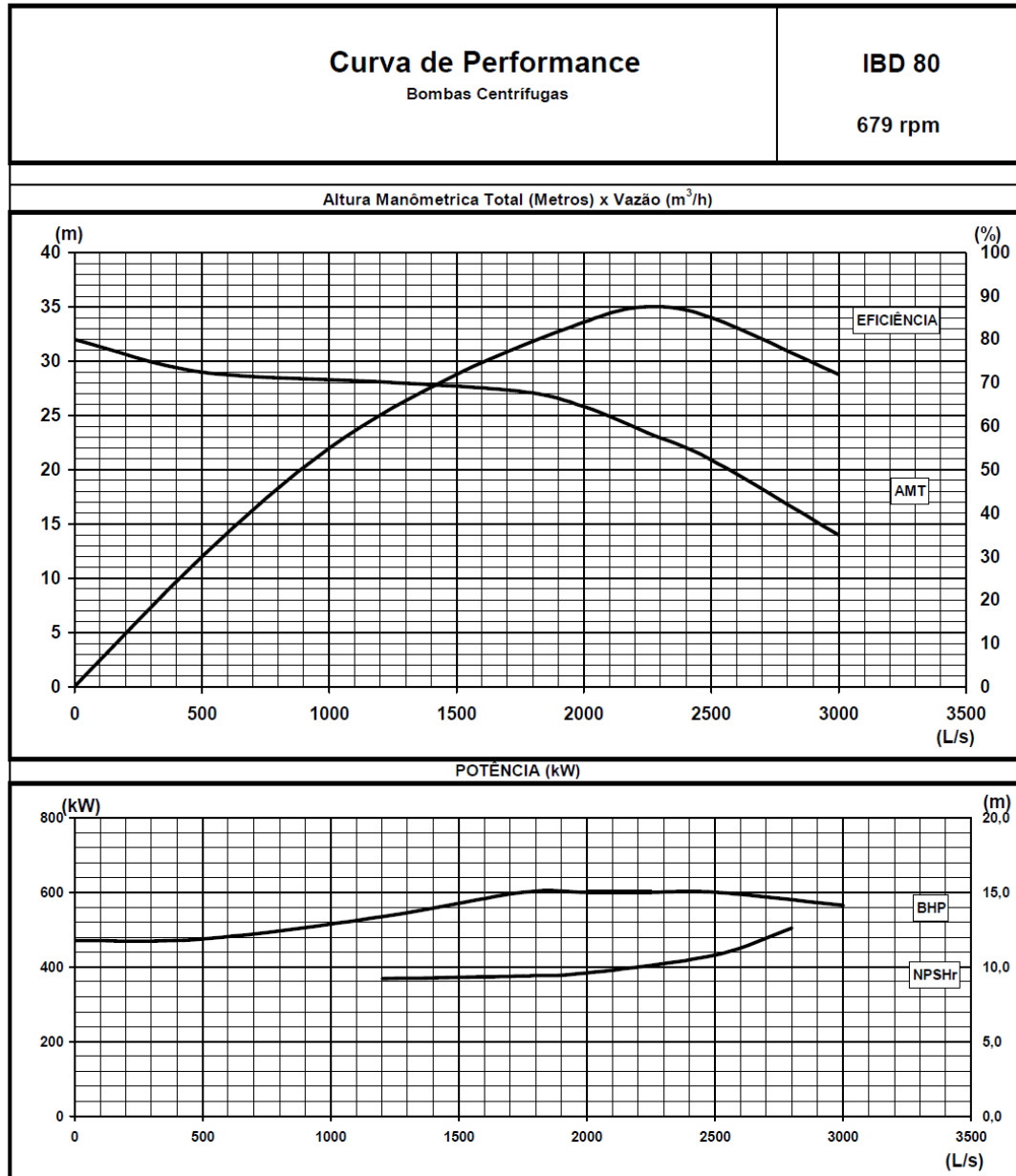


Figura 5.2: Curva da bomba da EE final, ETE ABC. Fonte: SABESP



### Arranjo físico do sistema da EE final da ETE ABC:

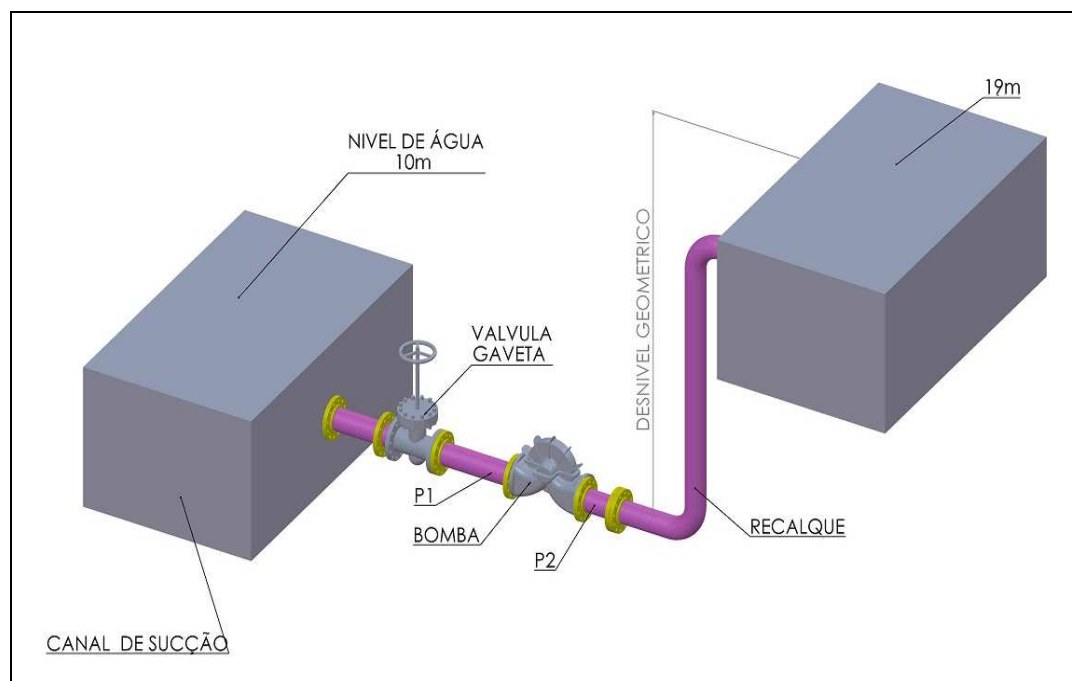


Figura 5.3: Arranjo esquemático do recalque da EE final, ETE ABC.

As especificações técnicas do conjunto motor bomba da EE final, ETE ABC são apresentadas na Tabela 05:

**Tabela 05.** Dados das bombas da EE final, ETE ABC.

<b>BOMBA</b>	
Fabricante:	Bergeron-Rateau
Modelo:	IBD 80 - Horizontal – Centrífuga
Quantidade:	03
Vazão Q (ℓ/s)	2.550
AMT (m)	19,6
Pressão de descarga (m CA)	19,6 m
Pressão de sucção (m CA)	10 m (Afogada).
Ø Rotor (mm)	720
Rotação (rpm)	673
Ano de Fabricação:	1983

A Tabela 06 contém os dados principais do motor elétrico. Na Tabela 07 estão apresentados os dados dos HCs e na Tabela 08, os dados dos redutores.

**Tabela 06.** Dados dos motores elétricos da EE final, ETE ABC.

<b>MOTOR</b>	
Fabricante:	GEC Alsthom
Motor de indução	Assíncrono
Potência (kW):	700
Tensão (V):	6.900
Corrente nominal, $I_n$ (A):	80
Frequência (Hz):	60
Rotação (rpm)	1.746
Lubrificação:	Graxa
Proteção:	IP 23
Fator de serviço:	1
Ano de Fabricação	1983

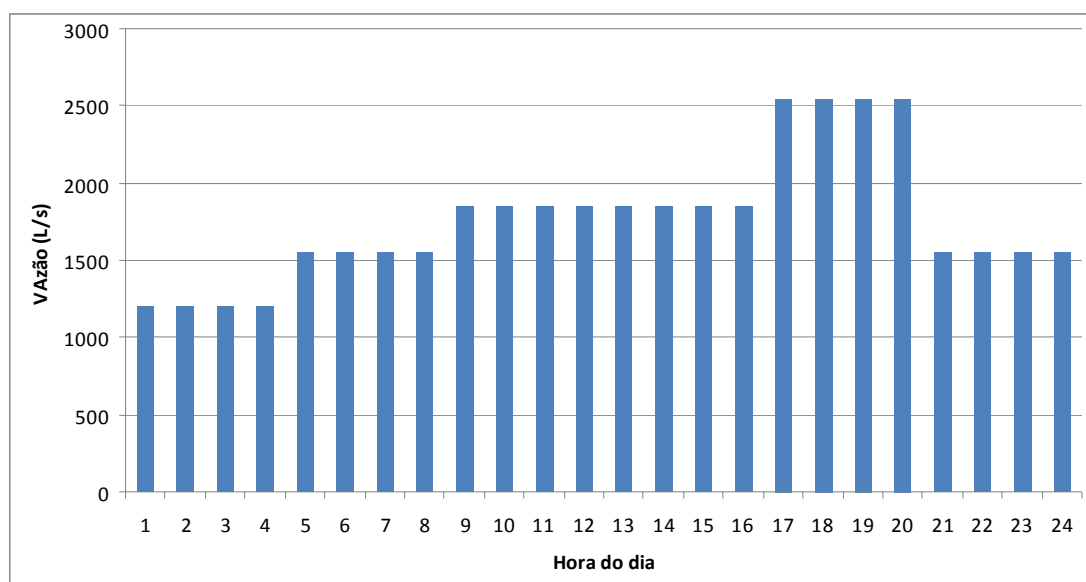
**Tabela 07 -** Dados dos HCs da EE final, ETE ABC.

<b>ACOPLAMENTO HIDRODINÂMICO</b>	
Fabricante:	VOITH TURBO
Modelo:	650 SVTL 21
Potência motora (kW)	700
Potência consumida (kW):	600
Rotação do motor:	1.746 rpm
Faixa de variação de rpm:	de 25% a 100%
Lubrificação:	Integrada
Ano de Fabricação	1988

**Tabela 08.** Dados dos redutores da EE final, ETE ABC.

REDUTOR	
Fabricante:	VOITH TURBO
Modelo:	VCG 028 A 111
Potência dissipada (kW)	2 kW
Taxa de redução:	$1.746/679= 2,57$

A curva, Figura 5.4, representa o perfil de operação típico da EE Final ao longo de 24 horas.



**Figura 5.4:** Perfil médio de operação ao longo de 24 horas da EE final, ETE ABC.

A análise da curva expressa na Figura 5.4, permite a obtenção dos seguintes indicadores operacionais:

- 04 horas do dia operando a 100 % da rotação nominal, vazão 2.550 l/s.
- 08 horas do dia operando a 75% da rotação nominal, vazão 1.850 l/s.
- 08 horas do dia operando a 67% da rotação nominal, vazão 1.550 l/s.
- 04 horas do dia operando a 59% da rotação nominal, vazão 1.200 l/s.

Para a estimativa do custo da energia elétrica consumida na estação EE final da ETE ABC, foi adotada uma tarifa única tendo em vista a grande variação de valores das tarifas cobradas pelas concessionárias de energia elétrica.

Essa tarifa média foi estimada tendo como base o valor da tarifa informada pela gerência da ETE ABC para o mês de setembro de 2011. Portanto, para este estudo, foi adotada uma tarifa média de: R\$ 0,20/kWh.

De acordo com informações históricas coletadas junto a equipe de manutenção da EE final da ETE ABC, o número de intervenções de manutenção no acoplamento hidrodinâmico do conjunto No. 2 a partir do ano de 2002 até fevereiro de 2011 foi o seguinte:

Trocas programadas de rolamentos do acoplamento hidrodinâmico em 2002, 2006 e 2010, que levaram de 10 a 15 dias em média para conclusão.

Foram realizadas as seguintes intervenções preventivas programadas com duração estimada de 1,5 de trabalho cada uma:

Em 27/12/2004

- Retirado filtro para limpeza.
- Constatado excesso de sujeira, que resultou em pressão elevada.

Em 13/05/2004

- Trocado óleo - ÓLEO ISO VG 32.
- Capacidade aproximada 300 l.
- Verificado nível de óleo pelo visor.

O acoplamento hidrodinâmico No. 2 foi submetido a uma intervenções não programadas em 23/02/2007, para correção de um vazamento na conexão de instrumento, limpeza de filtro de óleo e substituição da vedação, com indisponibilidade de 1 dia.

### **5.1.3 - Dados gerados**

Foi feito um estudo comparativo entre o gasto de energia da operação com emprego do acoplamento hidrodinâmico, com uma operação hipotética do controle de vazão por comando de válvula. Os resultados apresentados na

Tabela 09, ilustram os custos de energia diária e mensal que a bomba consome com o uso de acoplamento hidrodinâmico para atender à demanda do sistema. A Figura 5.5 mostra a curva do sistema e a variação de rotações com uso de acoplamento hidrodinâmico.

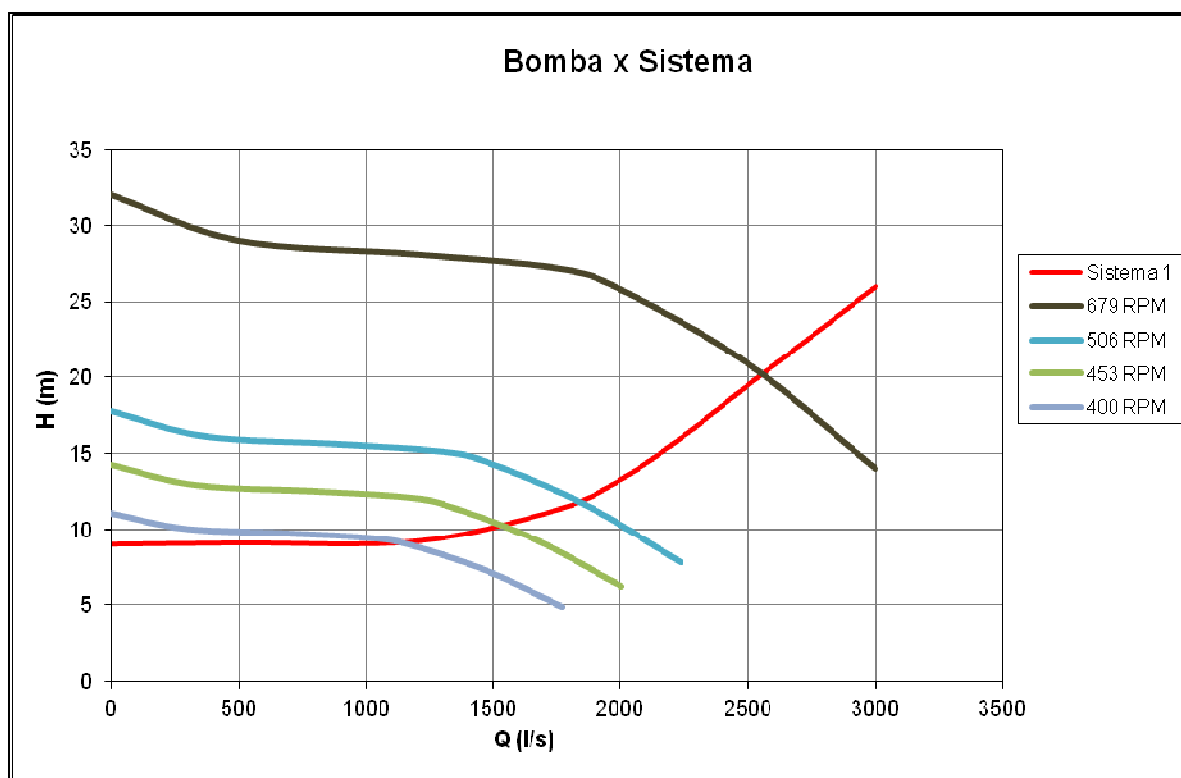


Figura 5.5: Curva do sistema com controle de rotação por HC, EEF, ETE ABC.

Através do gráfico demonstrado na Figura 5.5, foram traçadas as curvas referentes às rotações de 679 rpm, de 506 rpm, de 453 rpm e de 400 rpm, correspondentes às vazões de 2.550 l/s, de 1.850 l/s, de 1.550 l/s e de 1.200 l/s, respectivamente. Para atender aos 2.550 l/s do sistema, as bombas irão operar com a velocidade nominal de 679 rpm.

**Tabela 09** - Dados obtidos após simulação no EPANET de uma bomba operando com HC em diferentes rotações e tempo.

<b>Operando com 400 rpm, durante 4 horas</b>						
<b>Bombas</b>	<b>(%) utilização</b>	<b>Rendimento médio do sistema</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kWmédio</b>	<b>R\$/kWh</b>	<b>Custo/tempo de uso</b>
B2	100	44,3	0,06	350,4	0,20	280,31
<b>Operando com 453 rpm, durante 8 horas</b>						
<b>Bombas</b>	<b>(%) utilização</b>	<b>Rendimento médio do sistema</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kWmédio</b>	<b>R\$/kWh</b>	<b>Custo/tempo de uso</b>
B2	100	57,4	0,05	268,9	0,20	430,34
<b>Operando com 506 rpm, durante 8 horas</b>						
<b>Bombas</b>	<b>(%) utilização</b>	<b>Rendimento médio do sistema</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kWmédio</b>	<b>R\$/kWh</b>	<b>Custo/tempo de uso</b>
B2	100	63,8	0,05	332,5	0,20	531,97
<b>Operando com 679rpm, durante 4 horas</b>						
<b>Bombas</b>	<b>(%) utilização</b>	<b>Rendimento médio do sistema</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kWmédio</b>	<b>R\$/kWh</b>	<b>Custo/tempo de uso</b>
B2	100	82,0	0,07	618,6	0,20	494,86
<b>Resultado médio do sistema</b>						
<b>Bombas</b>	<b>(%) utilização</b>	<b>Rendimento médio do sistema</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kWmédio</b>	<b>R\$/kWh</b>	<b>Custo/dia</b>
B2	100	61,9	0,06	392,6	0,20	1.737,48

Somando-se os custos de operação em cada regime simulado na Tabela 09, chega-se a um custo diário total de R\$ 1.737,48.

De forma semelhante à análise anterior com variação de rotação, foi realizada uma simulação de forma a atender a demanda com o comando por válvula, variando a curva do sistema. O resultado obtido através do software EPANET está representado na Tabela 10:

**Tabela 10** - Dados obtidos após simulação no EPANET de operação com restrição por válvula.

Bombas	Utilização (%)	Rendimento médio do sistema	kWh/m <sup>3</sup>	KWmédio	R\$/kWh	Custo/dia
B1	100	66,1	0,11	618,46	0,20	2.968,58

A diferença do gasto diário com energia entre os dois regimes de operação, foi de R\$ 1.231,10. Portanto, quando se considera o período de um mês (30 dias), o ganho com energia elétrica é de R\$ 36.933,11.

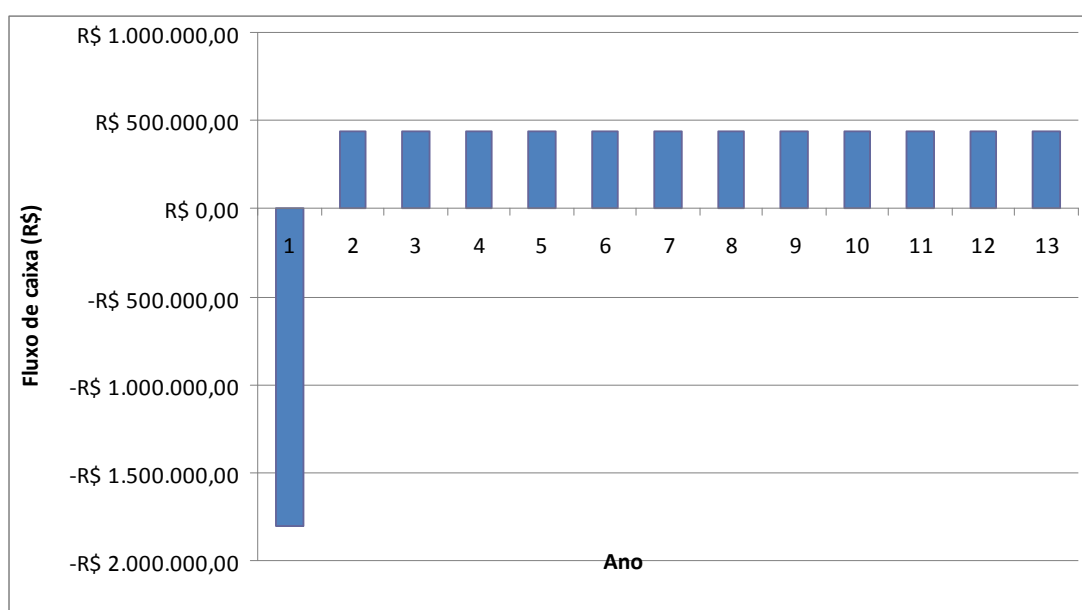
Para estudo de Caso I, EE Final da ETE ABC, foi considerado um investimento inicial, a valores atualizados, de R\$ 360 mil com aquisição do acoplamento hidráulico modelo 650 SVTL 21, de R\$ 140 mil estimado para o redutor, mais o valor aproximado de R\$ 50 mil para a instalação. Considerando que foram instalados três conjuntos motobombas, visando aumento de demanda futura e redundância operacional, o valor total do investimento foi de R\$ 1,65 milhões, que somado ao custo estimado de R\$ 150 mil com manutenção, resulta em um investimento de R\$ 1,8 milhões.

Conforme anteriormente informado, o uso do HC na EE Final da ETE ABC resulta em considerável economia de energia elétrica. Este ganho foi extraído de simulação realizada pelo *software* EPANET, quando comparado com uma possível operação de restrição através do comando por válvulas.

Este valor de energia economizado, foi considerado como parte do fluxo de caixa da ETE ABC. Para efetuar o cálculo de valor presente líquido, vale lembrar que as seguintes premissas foram consideradas como verdadeiras:

- A taxa de juros adotada para o cálculo foi de 12% ao ano;
- Os valores considerados estão em reais, não sendo estes afetados por variação cambial;
- O valor do investimento inicial foi de R\$ 1.800.000,00
- A economia de energia mensal foi de R\$ 36.933,11 e anual de R\$ 443.197,30.
- O tempo de operação considerado foi de 12 anos (1999 a 2011).

A Figura 5.6 expressa o fluxo de caixa dos ganhos com energia elétrica pelo fato da EE final operar com variação de velocidade:



**Figura 5.6: Fluxo de caixa do estudo de caso I, EEF, ETE ABC**

O valor presente líquido e o retorno do investimento estão apresentados na Tabela 11. Vale lembrar que foram inclusos no investimento inicial, os custos de aquisição dos três acoplamentos hidrodinâmicos, bem como dos redutores. Portanto, o retorno do investimento calculado a seguir, com a operação de apenas um HC, contempla todo o investimento com a aquisição dos acoplamentos:



**Tabela 11 - Fluxo de caixa com VPL para o estudo de caso I, ETE ABC**

<b>Ano</b>	<b>Fluxo de Caixa</b>	<b>VP</b>	<b>VPL</b>
0	-R\$ 1.800.000,00	-	0
1	R\$ 443.197,30	R\$ 395.711,88	- R\$ 1.404.288,13
2	R\$ 443.197,30	R\$ 353.314,17	- R\$ 1.050.973,95
3	R\$ 443.197,30	R\$ 315.459,08	- R\$ 735.514,87
4	R\$ 443.197,30	R\$ 281.659,90	- R\$ 453.854,97
5	R\$ 443.197,30	R\$ 251.482,05	- R\$ 202.372,92
6	R\$ 443.197,30	R\$ 224.537,55	R\$ 22.164,62
7	R\$ 443.197,30	R\$ 200.479,95	R\$ 222.644,58
8	R\$ 443.197,30	R\$ 178.999,96	R\$ 401.644,53
9	R\$ 443.197,30	R\$ 159.821,39	R\$ 561.465,92
10	R\$ 443.197,30	R\$ 142.697,67	R\$ 704.163,59
11	R\$ 443.197,30	R\$ 127.408,63	R\$ 831.572,22
12	R\$ 443.197,30	R\$ 113.757,71	R\$ 945.329,93
Valor presente do		R\$ 2.745.329,93	
Fluxo de caixa de 12 anos			
VPL		R\$ 945.329,93	
(Valor presente das receitas ou redução de custo de 12 anos			
Subtraído o valor do investimento inicial)			

Conforme demonstrado pela Tabela 11, o retorno do investimento ocorreu após o quinto ano, desde o início de operação da ETE ABC.

#### **5.1.4 - EPANET - EEF / ETE ABC:**

De posse das dimensões das tubulações informadas pela SABESP, bem como do arranjo de montagem dos componentes das mesmas, foram

inseridos no *software* EPANET o reservatório de sucção, a bomba em operação, as tubulações, e o reservatório de recalque.

Os dados de cada item estão apresentados nos quadros abaixo:

- **Quadro 1** - Reservatório de sucção - ETE ABC

TAG:	T2
Elevação:	10 m
Tipo de reservatório:	Aberto

- Bombas

As curvas AMT x Vazão e Eficiência x Vazão, fornecidas pelo fabricante, foram inseridas no EPANET.

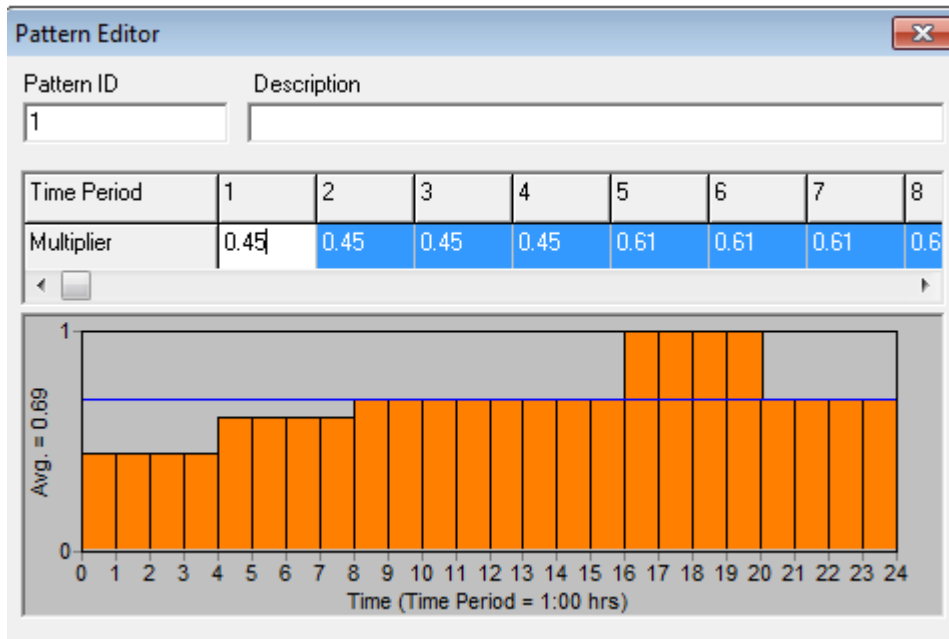
- **Quadro 2** - Tubulações - ETE ABC

TAG:	P
Comprimento:	Varia conforme trecho
Rugosidade:	100
Diâmetro:	1.500 mm

- **Quadro 3** - Reservatório de recalque - ETE ABC

TAG:	T1
Elevação:	19 m
Tipo de reservatório:	Aberto
Consumo:	2.550 l/s

Foi inserido no EPANET o perfil de operação, definido no *software* como padrão de consumo. Esse padrão de consumo é um fator que irá multiplicar o consumo informado no reservatório de recalque, estabelecendo o consumo para aquele determinado horário. Para esse padrão, adotou-se o número identificador "1", para que no campo de configuração de consumo, seja possível correlacioná-los adequadamente (Figura 5.7).



**Figura 5.7 - Perfil "1" de operação ao longo de 24 horas (EPANET)**

Para a simulação com controle de válvulas, o *software* EPANET executa a abertura e fechamento das válvulas, de forma direta, atribuindo igualmente a vazão requerida pelo padrão de consumo para as 04 bombas em funcionamento.

A simulação de variação de velocidade exige que se realize um comando de padrão para a velocidade. A curva da bomba que o fornecedor da bomba disponibilizou e que foi inserida no EPANET é relativa à uma determinada rotação (679rpm). Foi inserido um novo padrão com o identificador "2". As rotações usadas foram 400 rpm, 453 rpm e 506 rpm. Os fatores foram definidos como 0,589; 0,667 e 0,745 respectivamente (Figura 5.8). Tais fatores foram utilizados pelo EPANET para variar a velocidade e, através das leis de semelhança, variar a curva da bomba informada.

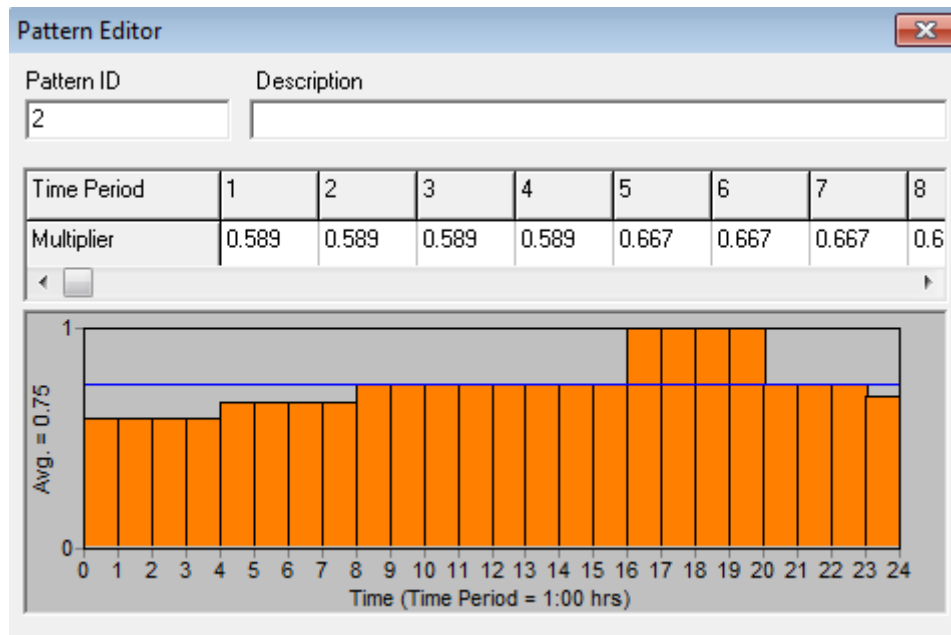


Figura 5.8 - Perfil “2” de operação ao longo de 24 horas (EPANET)

Os cálculos de energia consumida são feitos diretamente pelo software EPANET, levando em consideração a rotação, vazão, AMT e eficiência em que a bomba está operando.

O software EPANET emprega a seguinte fórmula no cálculo da potência:

**P =  $\frac{9,81 \times Q \times H}{\eta}$**  , onde:

$\eta$

**Q** = vazão de projeto, em m<sup>3</sup>/s; **H** = altura manométrica de bombeamento em metros de coluna d’água obtida pela soma do desnível geométrico entre o nível mínimo do reservatório de montante e o máximo do reservatório de jusante, mais as perdas totais no sistema (por atrito e localizadas) e  $\eta$  = rendimento global do conjunto elevatório, em decimais, resultante do produto entre o rendimento do motor e da bomba.

## 5.2 - Cálculo de confiabilidade, MTBF e disponibilidade da performance do acoplamento hidrodinâmico 650 SVTL 21 instalado na EE final, ETE ABC:

Conforme dados históricos do fabricante, nas Figuras 5.9 e 5.10, são apresentados os modelos de cálculo, bem como os índices de confiabilidade, disponibilidade e MTBF esperados para acoplamentos os hidrodinâmicos:

<b>Tipo:</b>	<b>SVNLG</b>
<b>Potência:</b>	<b>de 400 kW / 535 HP até 6.000 kW / 8.050 HP</b>
<b>Velocidade de saída:</b>	<b>500 a 3.600 rpm</b>
<b>No. de unidades:</b>	<b>52</b>
<b>No de horas de operação:</b>	<b>434.000</b>
<b>1. Confiabilidade baseada em falhas</b>	
<b>No de falhas registradas:</b>	<b>2</b>
<b>Média de tempo indisponível por falha:</b>	<b>48 horas</b>
<b>Tempo de indisponibilidade:</b>	<b>2 x 48 h = 96 horas</b>
<b>Confiabilidade:</b>	<b><math>\frac{\text{Horas de operação} - \text{Tempo de indisponibilidade}}{\text{Horas de operação}}</math></b>
	<b><math>\frac{434.000 - 96}{434.000} = 0,9998 = 99,98\%</math></b>

Figura 5.9: Confiabilidade de acoplamentos hidrodinâmicos. Fonte: VOITH, 2007.

<b>2. Tempo médio entre falhas (MTBF)</b>	
<b>MTBF:</b>	<b><math>\frac{\text{Horas de operação}}{\text{No. de falhas registradas}}</math></b>
	<b><math>\frac{434.000}{2} = 217.000 \text{ horas}</math></b>
<b>3. Disponibilidade baseado em inspeção</b>	
<b>Intervalo recomendado de inspeção:</b>	<b>8 anos/unidade</b>
<b>Tempo médio de inspeção por unidade:</b>	<b>3 dias</b>
<b>Tempo de indisponibilidade:</b>	<b>3 D x 24h = 72 horas</b>
<b>Disponibilidade:</b>	<b><math>\frac{\text{Intervalo recomendado de inspeção} - \text{Tempo de indisponibilidade}}{\text{Horas de operação entre inspeções}}</math></b>
	<b><math>\frac{8 \times 8.700 - 72}{8 \times 8.700} = 0,9989 = 99,89\%</math></b>

Figura 5.10: Cálculo de MTBF e disponibilidade de acoplamentos hidrodinâmicos. Fonte: VOITH, 2007.

Uma vez que, na média, a EE final da ETE ABC opera com um conjunto motobomba, a análise dos índice referentes à performance do acoplamento Modelo 650 SVTL 21, só considera a performance de uma unidade, TAG 02.

A análise que segue, se baseou em dados históricos operacionais fornecidos pela gerência de manutenção da EE final, ETE ABC.

**Tipo de unidades:** Acoplamento hidrodinâmico, 650 SVTL 21, TAG 02.

Para o cálculo da quantidade total de horas de operação de um dos conjuntos motobombas, foi considerado que os três conjunto motobombas têm tempos de operação iguais ao longo dos 12,5 anos de operação da ETE ABC.

**No. de unidades reportadas:** 03 (revezando operação ao longo do tempo total de operação da ETE ABC).

**Horas de operação:**  $\frac{12,5 \text{ anos}}{3 \text{ HCs}} = 4,1 \text{ anos por HC}$ , ou 36.500 horas por HC.

Diferente do modelo calculado pelo fabricante, foi considerado um ano com 8.760 horas.

**Número de paradas não programadas reportadas:** 01.

- (Ocorreram 2 paradas programadas para troca preventiva de rolamentos).

**Tempo de indisponibilidade por parada não programada:** 2 dias (48 horas).

$$\mathbf{A - Confiabilidade} = \frac{36.500 - 48}{36.500} = \boxed{99,87 \%}$$

De acordo com o exposto no item 4.4, o MTBF pode ser calculado pela divisão do tempo total de operação, pelo número de falhas, ou seja:

$$\mathbf{B - MTBF} \text{ (Tempo médio entre falhas)} = \frac{36.500}{1} = 36.500 \text{ horas ou } \boxed{4,1 \text{ anos}}$$

1

**C - Disponibilidade:**

Para o cálculo da disponibilidade (D), leva-se em conta o MTTF (tempo médio esperado até a 1ª ocorrência de falhas) informado pelo fabricante e o MTTR (tempo médio para a realização do reparo), como descrito:

- Intervalos recomendado para revisão geral (MTTF): 6 anos por unidade.

$$\text{MTTF} = 6 \times 8.760 \Rightarrow \boxed{\text{MTTF} = 52.560 \text{ horas}}$$

- Tempo médio para realizar a revisão por unidade (MTTR): 10 dias.

- Tempo não disponível em horas = 10 dias x 24 hs  $\Rightarrow$   $\boxed{\text{MTTR} = 240 \text{ horas}}$

$$\frac{6 \times 8.760}{(6 \times 8.760) + 240} = \frac{52.560}{52.800} = 99,54 \% \rightarrow \boxed{D = 99,54\%}$$

Os resultados calculados para um (01) HC da EEF, ETE ABC, nos mostra que, tanto o índice de confiabilidade, quanto o de disponibilidade, estão coerentes com os índices esperados, calculado pelo fabricante. A ligeira diferença, pode ser explicada pelo fato de que, o estudo desenvolvido pelo fabricante considerou um tipo de acoplamento mais sofisticado do que aqueles efetivamente instalados na ETE ABC, cujo projeto é mais simples e não conta, por exemplo, com mancais de deslizamento.

Portanto, índices superiores poderão ser obtidos, caso o número de unidades e o número de horas considerados sejam maiores. Contudo, isso não impede o desenvolvimento desse tipo de análise no estágio atual de operação, nos levando a sugerir, que futuramente seja feito um novo cálculo destes índices para acompanhamento do bom desempenho dos HCs instalados na EEF da ETE ABC.

Em relação ao MTBF, a grande diferença entre os tempos médios entre revisões, calculado e esperado, pode ser justificada em função do pequeno número de unidades avaliada e pelo baixo período anual de operação considerado, devido a operação de apenas um conjunto motobomba, em regime de revezamento entre os três conjuntos existentes.

Os números acima, além de revelarem os altos índices de confiabilidade dos HCs instalados na ETE ABC, podem sugerir que o planejamento e a execução das atividades de manutenção na ETE ABC, são feitos com rigor e cuidado, por profissionais experientes para garantir a qualidade dos serviços prestados à população.

### **5.3 - ESTUDO DE CASO II - EE ARG / ETA GUANDU**

O que motivou o estudo de viabilidade da utilização de variação de rotação na estação elevatória, EE ARG, foi o fato de a operação em regime de controle através de processo “liga-desliga” diário dos 4 conjuntos motobombas estar acarretando considerável desgaste aos equipamentos, em especial aos motores elétricos acionadores. Desta forma, conforme reportado pelos técnicos de manutenção da EE ARG, o emprego de variação de velocidade poderia trazer os seguintes benefícios listadas abaixo:

- a- Reduzir o número de partidas e paradas do motor elétrico, resultando em uma operação contínua.
- b- Reduzir o excessivo desgaste do conjunto motobomba, devido ao tipo de operação “liga-desliga”, sujeita a frequentes torques de partida, que pelo impacto causado, comprometem a vida útil dos equipamentos rotodinâmicos.
- c- Reduzir o número de intervenções para manutenção por queima de motores, que em média é superior a 8 falhas por motor nos últimos 15 anos, com uma elevada indisponibilidade média anual na EE ARG.
- d- Evitar o rápido desgaste e altas temperaturas nos contatos dos painéis de controle, em consequência do tipo de operação diária “liga-desliga”.
- e- Aumentar o ciclo de vida dos motores elétricos através da redução da temperatura a que os isolamentos das bobinas internas dos motores ficam expostos.
- f- Gerar menos harmônicos na rede.
- g- Possibilitar controle automático da operação através do monitoramento pelo nível do reservatório.
- h- Reduzir o consumo de energia elétrica, com conseqüente aumento de eficiência.

#### **5.3.1 - Calibração do sistema**

Para calibrar o sistema, foram inseridos os dados fornecidos pela EE ARG, tais como a vazão média da estação ao longo de 24 horas, conforme



descrito no item 4.2.4, as linhas de recalque para o reservatório do Marapicu, as unidades que compõem o sistema de bombeamento da EE ARG.

A foto aérea da Figura 5.11, com o traçado da rede de recalque da EE ARG, serviu de pano de fundo para que fossem inseridos todos os elementos relativos ao sistema de bombeamento, tais como: bombas, válvulas, barriletes, tubos, reservatórios de captação e de recalque, informados pela EE ARG / CEDAE.

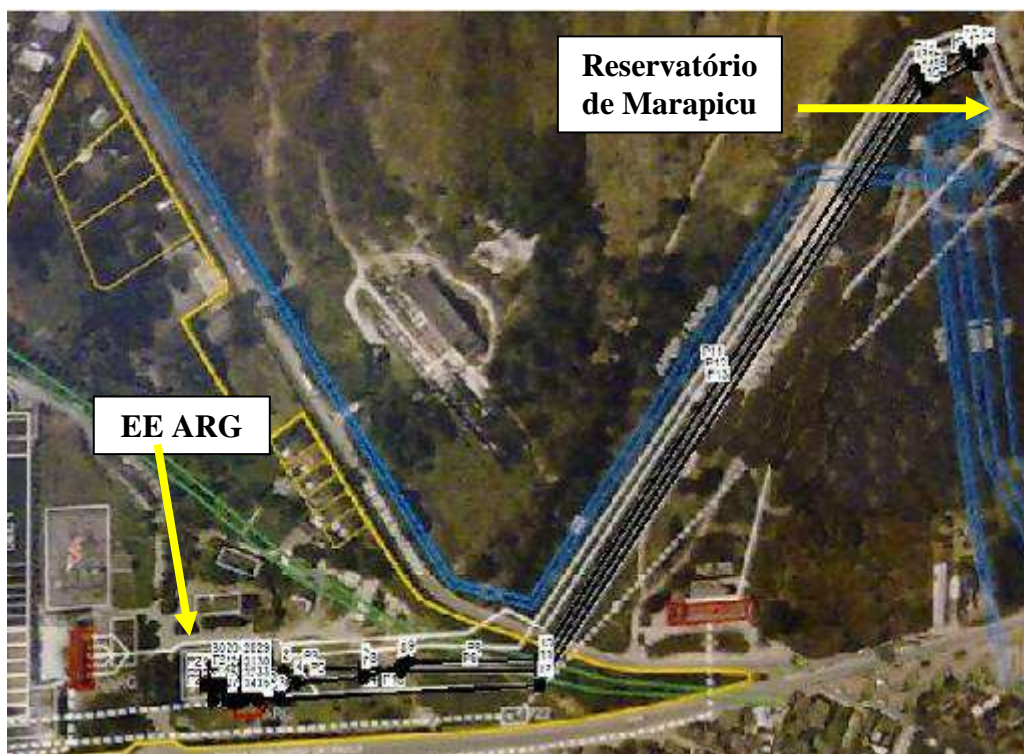
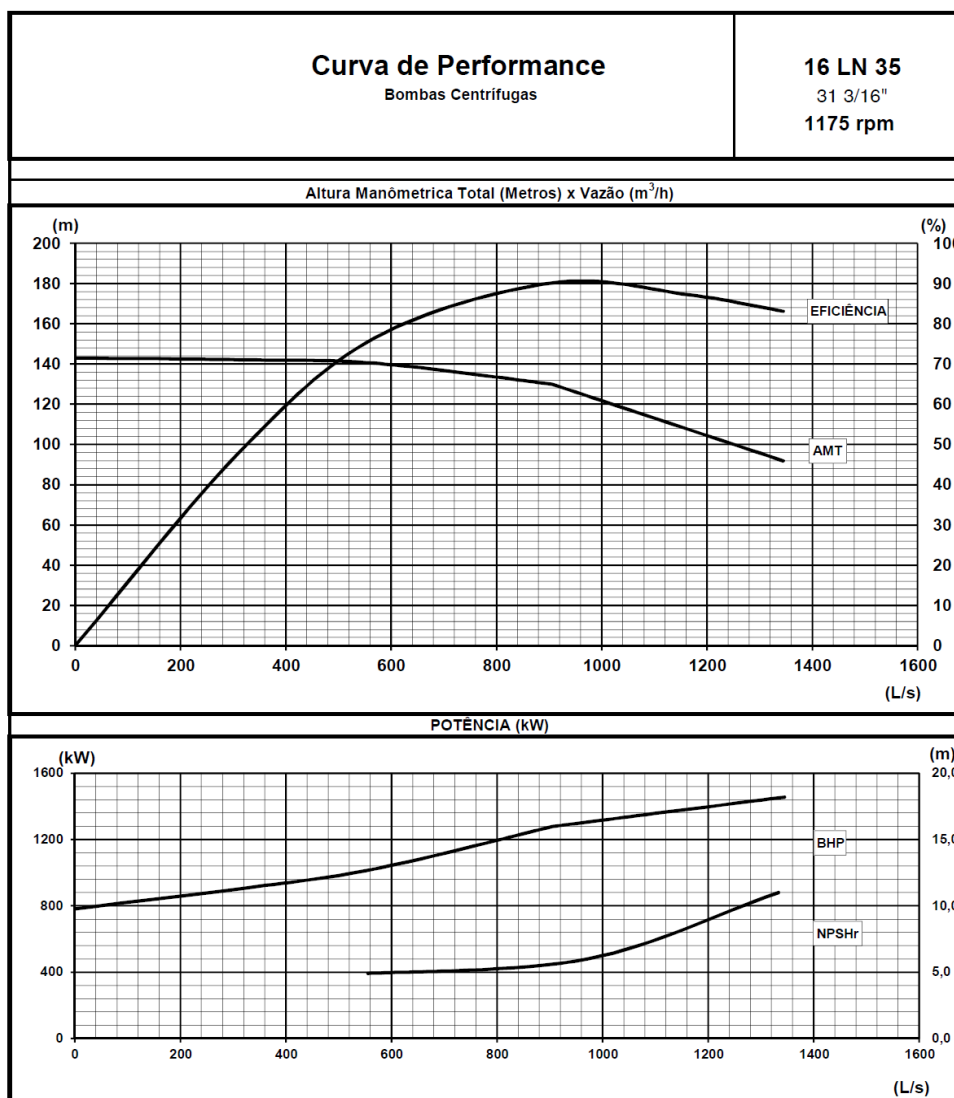


Figura 5.11: Vista aérea do recalque da ARG para o reservatório do Marapicu  
Fonte: CEDAE, 2012

### 5.3.2 - Dados coletados

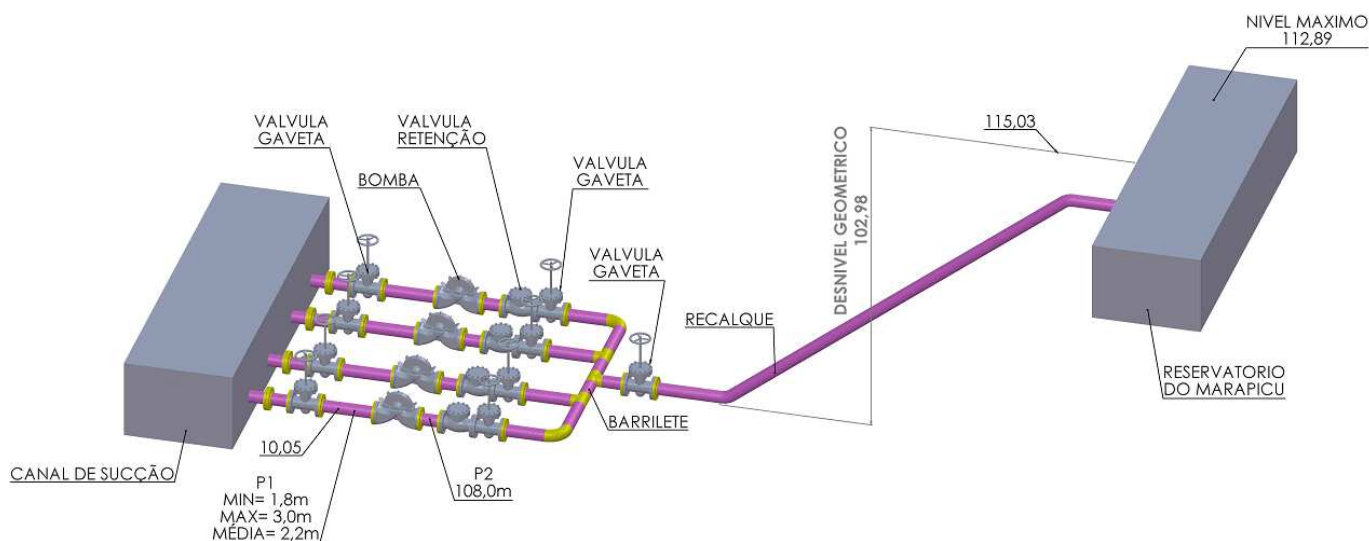
Enquanto a Figura 5.12 representa a curva característica da bomba, a Figura 5.13 apresenta o desenho esquemático do sistema de recalque da EE ARG.



**Figura 5.12: Curva de performance da bomba 16 LN 35, EE ARG. FLOWSERVE, 2011**

Pela análise da curva da bomba, é possível observar que, em casos de operação com vazão no limite máximo de vazão, a potência demandada pode chegar a ser superior a 1.900 CV, que está acima da potência nominal dos motores elétricos atualmente instalados, cuja a vida útil pode variar entre 15 a 20 anos, conforme informações de fabricantes (EHANTO, 2010). Portanto, conforme informado pelos técnicos da EE ARG, o aumento de potência dos motores poderá representar um benefício para o sistema como um todo, cabendo para tal, um estudo específico mais detalhado (NESBITT, 2001a; 2001b).

## Arranjo físico do sistema da ARG:



**Figura: 5.13 - Arranjo esquemático do recalque da EE ARG.**

As especificações técnicas do conjunto motor bomba da EE ARG são apresentadas na Tabela 12:

**Tabela 12 - Dados das bombas da EE ARG, ETA Guandu**

<b>BOMBA</b>	
Fabricante:	Worthington
Modelo:	16 LN 35
Quantidade:	5 conjuntos, sendo 1 reserva
Vazão Q (ℓ/s)	1.000
AMT (m)	103
Ø Rotor (polegadas)	31 3/16"
Rotação (rpm)	1.175
No. Série	BX 91671, 72, 73, 74, 75
Ano de Fabricação:	1980

A Tabela 13 contém os dados principais dos motores elétricos.

**Tabela 13** - Dados dos motores elétricos da EE ARG, ETA Guandu.

<b>MOTOR ELÉTRICO EE ARG</b>	
Motor:	Indução
Potência (HP):	1.800
Tensão (V):	2.300
Corrente nominal, $I_n$ (A):	392
I médio medido (A)	400
Frequência (Hz):	60
Rotação (rpm)	1.175
Lubrificação:	Graxa
Proteção:	IP 23
Fator de serviço	1,0
Ano de Fabricação	1983

A curva, Figura 5.14, representa o perfil de operação típico da EE ARG ao longo de 24 horas.

## PERFIL DE OPERAÇÃO AO LONGO DO TEMPO EE ARG

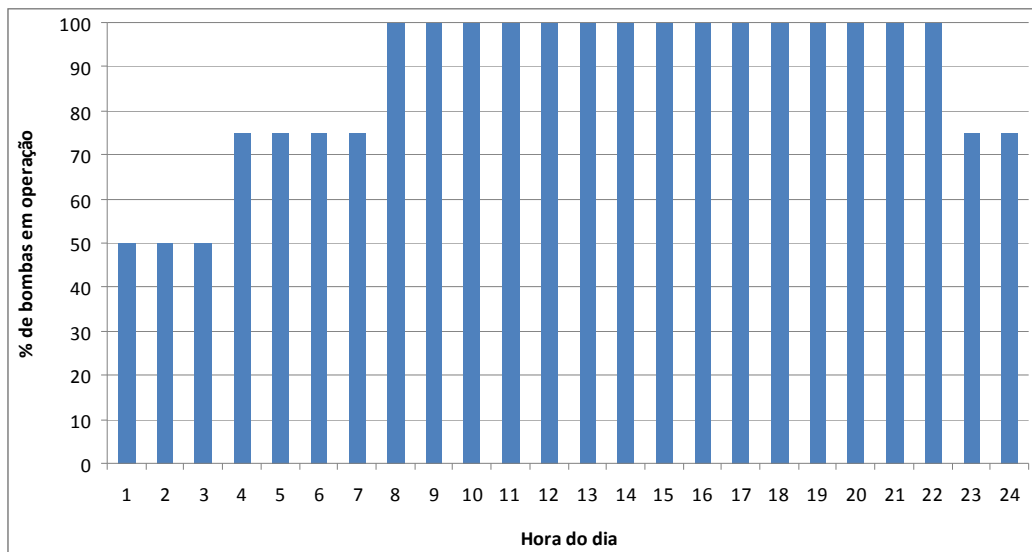


Figura 5.14: Perfil médio de operação ao longo de 24 horas.

A análise da curva expressa na Figura 5.14, permite a obtenção dos seguintes indicadores operacionais, também apresentados na Tabela 14:

- 15 horas do dia (62,5% do dia) com 4 bombas - 100% da rotação nominal.
- 06 horas do dia (25% do dia) com 3 bombas a 75% da rotação nominal.
- 03 horas do dia (12,5% do dia) com 2 bombas - 50% rotação nominal.

Tabela 14 - Parâmetros operacionais da EE ARG ao longo de 24 horas.

Q (ℓ/s)	H (m)	Eficiência (%)	(%) Operação no tempo	% RPM	RPM
500	136	80	12,5	85	1.000
750	128	85	25	88,5	1.040
1.000	114	86,5	62,5	100	1.175

Para a estimativa do custo da energia elétrica consumida na estação EE ARG, foi adotada uma tarifa única tendo em vista a grande variação de valores cobrados pelas concessionárias de energia elétrica. Conforme informado pela CEDAE/EE ARG, o valor das tarifas de consumo pagas atualmente são as seguintes: horário fora de ponta, R\$ 0,13228974/kWh e no

horário de ponta, R\$ 0,20552400/kWh. Portanto, para este estudo, foi adotada uma tarifa média de R\$ 0,16/kWh.

### **5.3.3 - Dados gerados:**

O trabalho desenvolvido visa analisar o comportamento da operação da EE ARG, que possui 5 conjuntos motobombas, sendo um reserva “*stand-by*”, ou seja, um arranjo de máquinas 5 x 25%. A operação da EE ARG é variável conforme a demanda exigida durante o dia e em diferentes épocas do ano. Para o presente trabalho foi considerado um padrão médio de consumo para um período de 24 horas, com no máximo, quatro bombas principais em operação.

O sistema de bombeamento da EE ARG foi modelado no *software* EPANET, para demonstrar 3 diferentes tipos de operações:

- A) Operação com 4 bombas, variando a vazão através do controle de restrição por válvula.
- B) Funcionamento como é de fato na EE ARG, isto é, operação “liga-desliga” das bombas, conforme demanda exigida.
- C) Emprego de operação com variação hidrodinâmica de velocidade, que é a proposta por esse trabalho.

Através da simulação destas 3 operações, os dados obtidos podem revelar diferenças quanto à eficiência dos sistemas estudados.

A - Sistema com 04 bombas funcionando com variação de vazão através de restrição por válvula:

Foi simulado no *software* EPANET a condição de 04 bombas, configuradas em paralelo, de forma a elevar a água até o reservatório, variando a vazão por controle de válvulas, a fim de atender à demanda necessária. Foi também utilizada a planilha MS Excel para a construção de gráficos de performance e da potência consumida pelas bombas.

Para balizar a variação de vazão, foram definidas 3 diferentes demandas para o estudo. As vazões definidas para o sistema foram 2.000 l/s, 3.000 l/s e 4.000 l/s para 2, 3 ou 4 bombas associadas em paralelo (Figura 5.14).

Após inserir todos os parâmetros do sistema e da bomba (curva de performance) obtivemos os resultados apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15** - Dados obtidos após simulação de restrição por válvula.

Bombas	(%) utilização	Rendimento médio do sistema	kWh/m <sup>3</sup>	kWmédio	R\$/kWh	Custo/dia
B1	100	84,9	0,41	1.262,2	0,16	4.846,87
B2	100	84,9	0,41	1.262,2	0,16	4.846,87
B3	100	84,9	0,41	1.262,2	0,16	4.846,87
B4	100	84,9	0,41	1.262,2	0,16	4.846,87

O consumo total de energia demandado por este sistema durante 24 horas de operação foi de R\$ 19.387,48.

B - Funcionamento com 04 bombas operando em regime “liga-desliga”.

Para essa segunda simulação, as vazões demandadas pelo sistema foram as mesmas definidas para a condição de controle de restrição por válvula.

Para obter os 4.000 l/s, 4 bombas permaneceram operação, para 3.000 l/s, 3 bombas e para 2.000 l/s, somente 2 bombas em operação.

Com essas considerações feitas e inseridas no *software* EPANET, os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16** - Dados obtidos após simulação de operação “liga-desliga”.

<b>Bombas</b>	<b>(%) utilização</b>	<b>Rendimento médio do sistema</b>	<b>kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>kWmédio</b>	<b>R\$/kWh</b>	<b>Custo/dia</b>
B1	62,5	88,5	0,37	1.349,37	0,16	3.238,48
B2	87,5	88,5	0,37	1.349,4	0,16	4.534,00
B3	100	88,5	0,37	1.349,4	0,16	5.181,76
B4	100	88,5	0,37	1.349,4	0,16	5.181,76

O gasto total de energia demandada por este sistema em operação “liga-desliga” durante 24 horas de operação é de R\$ 18.136,00 por dia. Este resultado comprova a confiabilidade nas simulações do EPANET, uma vez que este resultado corresponde exatamente ao valor efetivamente gasto para operação da EE ARG neste regime de operação, de acordo com as informações coletadas.

#### C - Sistema com 04 bombas funcionando com HC

O sistema funcionando com variação hidrodinâmica de velocidade demandou uma análise mais elaborada. O primeiro passo foi conseguir a curva de performance da bomba. A curva fornecida foi gerada para a velocidade 1.175 rpm (Figura 5.12).

Aplicando no Excel a curva da bomba na rotação nominal e a curva do sistema, desenvolveram-se através das leis de semelhança, duas novas curvas para a bomba, e através de método iterativo, foram aplicados diferentes valores para a rotação, de forma a se obter uma curva da bomba que fizesse a interseção com a curva do sistema na vazão de 3.000 l/s e depois para a vazão de 2.000 l/s, para atender às condições do sistema da EE ARG.



Com isso, para as novas rotações é possível ter a vazão demandada pelo sistema com a correta AMT (*head H*), conforme apresentado na Figura 5.15.

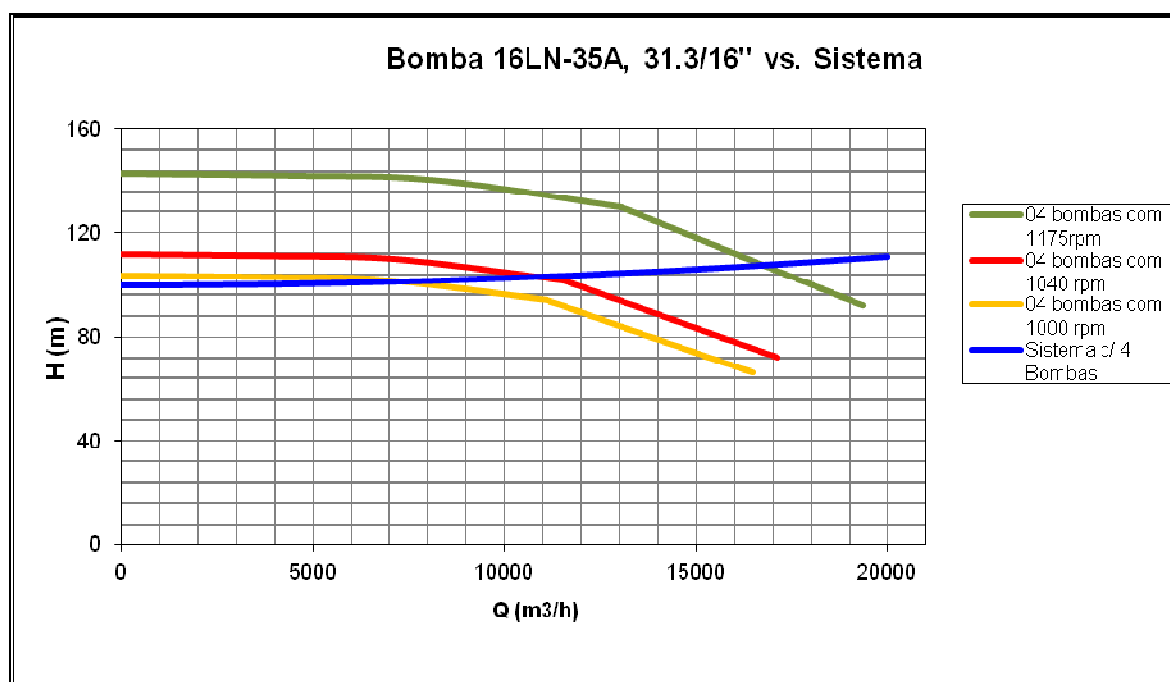


Figura 5.15: Curva do sistema com controle de rotação por HC, EE ARG.

A Figura 5.15 demonstra que, pelo fato da EE ARG ter um alto *head* estático, a curva do sistema é muito plana; portanto em rotações mais baixas, é possível que o cruzamento da curva da bomba com a curva do sistema não esteja bem definido em um ponto, o que pode gerar instabilidade nos sistemas de controle. Nessa condição, é recomendado que a faixa de variação de rotação fique entre 85% e 100% em relação à rotação nominal.

Através do gráfico demonstrado na Figura 5.12, foram traçadas as curvas referentes às rotações de 1.040 rpm e de 1.000 rpm, correspondentes às vazões de 3.000 *l/s* e 2.000 *l/s*, respectivamente. Para atender aos 4.000 *l/s* do sistema, as bombas irão funcionar com a velocidade nominal de 1.175 rpm.

Com as curvas geradas nas novas rotações, foram feitas 3 novas configurações no *software* EPANET, informando, para cada uma delas, uma

curva da bomba em cada rotação. Somando o resultado obtido para cada uma das rotações, foi possível obter o consumo total diário.

O resultado apresentado na Tabela 17 se aplica para 15 horas de funcionamento das 4 bombas operando com velocidade nominal (1.175 rpm) e fornecendo vazão de 4.000 l/s demandados pelo sistema.

**Tabela 17** - Dados obtidos após simulação com HC a 1.175 rpm com vazão de 4.000 l/s por 15 horas.

Bombas	(%) utilização	Rendimento médio do sistema	kWh/m <sup>3</sup>	kWmédio	R\$/kWh	Custo/tempo de uso
B1	100	86,7	0,38	1.377,0	0,16	3.304,80
B2	100	86,7	0,38	1.377,0	0,16	3.304,80
B3	100	86,7	0,38	1.377,0	0,16	3.304,80
B4	100	86,7	0,38	1.377,0	0,16	3.304,80

O resultado apresentado na Tabela 18 se aplica para 6 horas de funcionamento das 4 bombas operando com velocidade de 1.040 rpm e fornecendo os 3.000 l/s demandados pelo sistema.

**Tabela 18** - Dados obtidos após simulação com HC a 1.040 rpm com vazão de 3.000 l/s por 6 horas.

Bombas	(%) utilização	Rendimento médio do sistema	kWh/m <sup>3</sup>	kWmédio	R\$/kWh	Custo/tempo de uso
B1	100	77,74	0,37	1.004,03	0,16	925,53
B2	100	77,74	0,37	1.004,03	0,16	925,53
B3	100	77,74	0,37	1.004,03	0,16	925,53
B4	100	77,74	0,37	1.004,03	0,16	925,53

O resultado apresentado na Tabela 19 se aplica para 3 horas de funcionamento das 4 bombas operando com velocidade de 1.000 rpm e fornecendo os 2.000 l/s demandados pelo sistema.

**Tabela 19** - Dados obtidos após simulação com HC a 1.000 rpm com vazão de 2.000 l/s por 3 horas.

Bombas	(%) utilização	Rendimento médio do sistema	kWh/m <sup>3</sup>	kWmédio	R\$/kWh	Custo/tempo de uso
B1	100	65,5	0,44	793,53	0,16	380,89
B2	100	65,5	0,44	793,53	0,16	380,89
B3	100	65,5	0,44	793,53	0,16	380,89
B4	100	65,5	0,44	793,53	0,16	380,89

O consumo total de energia demandado por esse sistema durante 24 horas de operação foi de R\$ 18.444,91.

Pela Tabela 20, é possível observar a comparação de custo direto com energia elétrica entre os casos estudados (casos A, B e C).

**Tabela 20** - Comparação de consumo energético entre as simulações A, B e C (EE ARG).

	Custo/dia	Custo/Mês	Custo/Ano
A - Controle por válvula	R\$ 19.387,50	R\$ 581.624,89	R\$ 6.979.499,00
B - “Liga-Desliga”	R\$ 18.136,00	R\$ 544.080,00	R\$ 6.528.960,00
C - Acoplamento hidráulico	R\$ 18.444,91	R\$ 553.347,18	R\$ 6.640.166,19

Pelos dados apresentados na Tabela 20, é possível observar a diferença de custo entre as três formas de operação simuladas, ou seja, o emprego de acoplamentos hidrodinâmicos resultará em um aumento de 1,7% nos custos com energia elétrica na operação da EE ARG. É oportuno salientar que os custos em relação à manutenção dos equipamentos envolvidos no sistema

não foram aqui avaliados e que a redução com esse tipo de despesa tende a compensar a pequena diferença de 1,7% verificada.

**Tabela 21.** Comparativo de custos entre as simulações com HC na EE ARG.

Comparação	Diferença Anual
Variação de velocidade (com HC) x Válvula	R\$ 339.332,48 (4,9%)
Variação de velocidade (com HC) x “Liga-desliga”	- R\$ 111.206,19 (1,7%)

Considerando que a EE ARG opera na condição “liga-desliga” (perfil B) desde 1981, foram feitas análises de quanto tem sido economizado em função da operação “liga-desliga” nas últimas duas décadas, nos período compreendido entre 1991 a 2011.

Caso haja a opção pela aquisição de acoplamentos hidrodinâmicos visando reduzir as sucessivas falhas de motores e preservar o conjunto motobombas, de acordo com informação prestada pelo fabricante do HC, podem-se considerar, a seleção de um HC modelo 866 SVTL 22.

Comparando os custo com energia elétrica da EE ARG entre o regime de operação atual, “liga-desliga”. com operação dotada de HC, Tabela 21, a despesa atual com energia é menor em R\$ 111.206,19 por ano, ou seja, R\$ 2.224.123,80 durante os últimos 20 anos.

Do ponto de vista exclusivamente relacionado com eficiência energética, o sistema atualmente em operação mostrou-se ser o de menor custo com energia elétrica. Entretanto, o emprego de acoplamentos hidrodinâmicos poderá representar redução de custo para a EE ARG, uma vez que poderá trazer benefícios relacionados à redução de despesas com a operação das bombas, como já listado no item 5.2, exceto o tópico “h”, reduzir o consumo de energia elétrica, com conseqüente aumento de eficiência.

Ao fazermos a comparação entre operação com variação de rotação e o processo de “liga-desliga”, os gastos operacionais com variação de

velocidade tendem a ser expressivamente menores pela redução de despesas com manutenção dos equipamentos, tanto para as bombas, quanto para os motores elétricos. Além de não ser aconselhado, pelos fabricantes de motores, que sejam dadas várias partidas durante um determinado tempo, o pico de amperagem resultante da partida do motor elétrico causa um maior consumo de energia, não considerado neste estudo, e pode resultar em multa pela concessionária de energia elétrica, dependendo do horário em que isso ocorrer ou caso exceda o limite de demanda previamente contratado.

O emprego de variação de velocidade através do uso de acoplamentos hidrodinâmicos poderá se justificar, contribuindo positivamente para o sistema EE ARG na medida em que venha a ser empregado para proteção dos equipamentos e para operação como uma espécie de embreagem, apenas para permitir que o motor continue operando enquanto a bomba permanece com rotação nula, evitando dessa forma, picos de corrente, bem como impactos mecânicos no conjunto motobomba (TORREIRA, 1996).

Para o estudo de caso II, EE ARG, não foi realizado o levantamento dos índices de confiabilidade, MTBF e disponibilidade, tendo em vista que essa estação elevatória opera com rotação fixa em regime “liga-desliga” diário, sem o emprego de acoplamento hidrodinâmico, que foi o equipamento objeto de análise desta dissertação.

Segundo publicação da Aliança para Conservação da Energia, 2002, o consumo de energia na maioria dos sistemas de água em todo o mundo poderia ser reduzido em, pelo menos, 25% através de ações de efficientização com custo otimizado (ALIANÇA PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2002). As expectativas dos resultados do Programa Procel Sanear da Eletrobrás são positivas, apontando que o Brasil deverá ganhar, em termos de eficiência energética, 32,2 GWh de energia até 2021, ou 4,2% do consumo de eletricidade. Esse ganho representará uma redução de 4,5 mil MW médios (BRASIL ENERGIA, 2012). Aprimorar sistemas visando melhorias de performance e eficiência energética se encaixa nessa proposta.

### 5.3.4 - EPANET - EE ARG / ETA GUANDU

Com a finalidade de simular a operação dos componentes que compõem a tubulação e o sistema de bombeamento, a imagem de satélite da planta da ETA Guandu foi adicionada, como pano de fundo ao sistema inserido no EPANET, assim como os dados referentes ao reservatório de sucção, às 04 bombas (idênticas), tubulações, às válvulas de gaveta e ao reservatório de recalque.

Os dados de cada componente do sistema de bombeamento estão apresentados nos quadros abaixo:

- **Quadro 4** - Reservatório de sucção - EE ARG

TAG:	T2
Elevação:	2,2 m
Tipo de reservatório:	Aberto

- Bombas

As curvas AMT x Vazão e Eficiência x Vazão, fornecidas pelo fabricante, foram inseridas no EPANET.

- **Quadro 5** - Tubulações - EE ARG

TAG:	P
Comprimento:	Variável, conforme o trecho
Rugosidade:	100
Diâmetro:	1.500 mm

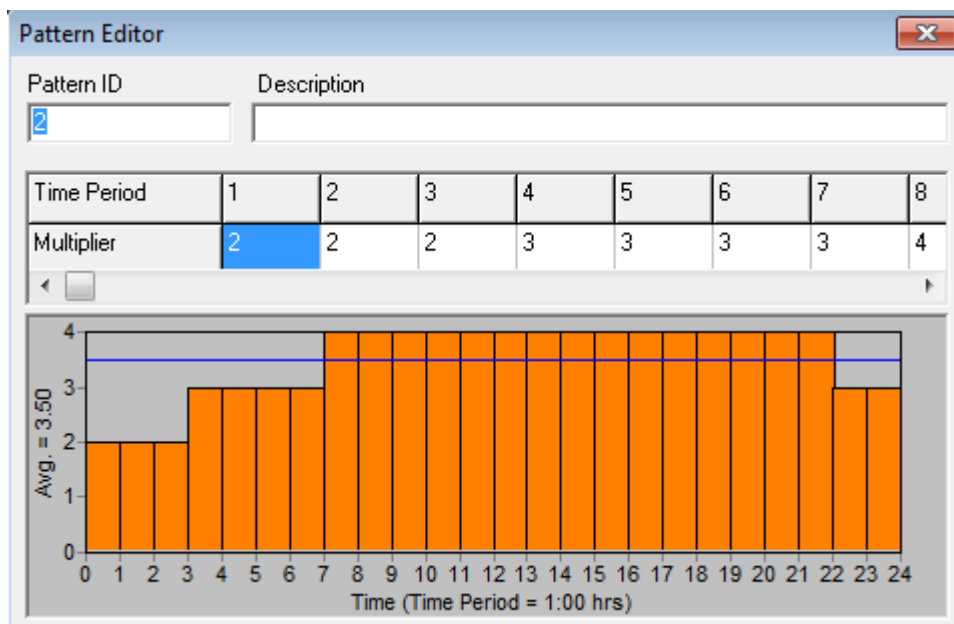
- **Quadro 6** - Válvulas de gaveta - EE ARG

TAG:	V
Tipo de Válvula:	Gaveta (FCV)
Diâmetro:	1.500 mm

- **Quadro 7** - Reservatório de recalque - EE ARG

TAG:	T1
Elevação:	108 m
Tipo de reservatório:	Aberto
Consumo:	1.000 l/s

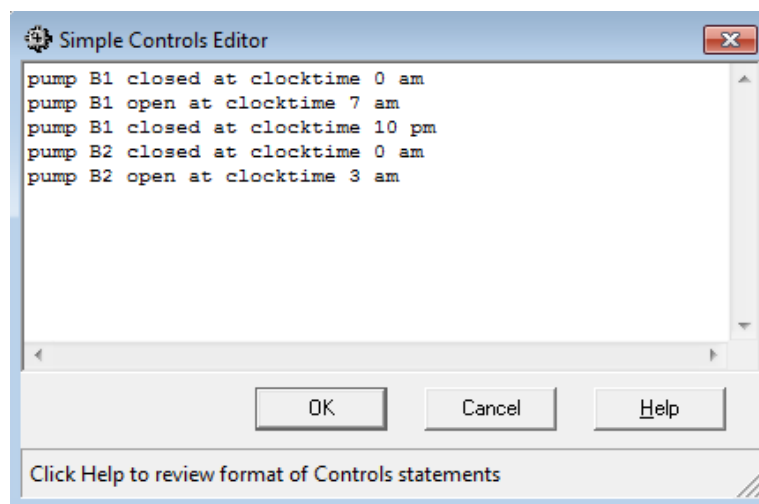
Foi inserido no EPANET o perfil de operação, definido no *software* como padrão de consumo. Esse padrão de consumo é um fator que irá multiplicar o consumo informado no reservatório de recalque, estabelecendo o consumo para aquele determinado horário. Para esse padrão, foi considerado o número identificador “2”, para que no campo de configuração de consumo, seja possível correlacioná-los adequadamente (Figura 5.16).



**Figura 5.16 - Perfil “2” de operação ao longo de 24 horas (EPANET)**

Para a simulação com controle de válvulas, o *software* EPANET executa a abertura e fechamento das válvulas, de forma direta, atribuindo igualmente a vazão requerida pelo padrão de consumo para as 04 bombas em funcionamento.

Para a simulação de “liga-desliga”, faz-se necessário uma programação especial para que o EPANET realize essa operação de forma ordenada, para um determinado horário ele irá desligar uma determinada bomba como ilustrado na Figura 5.17.



**Figura 5.17 - Programação do controle de válvulas (EPANET)**

Os comandos informados na janela acima, são escritos obrigatoriamente em inglês, por ser um *software* desenvolvido nos Estados Unidos (Figura 5.17).

A programação dos comandos foi realizada da seguinte forma:

- Bomba B1 fecha às 0 am
- Bomba B1 abre às 7 am
- Bomba B1 fecha às 10 pm
- Bomba B2 fecha às 0 am
- Bomba B2 abre às 3 am

A simulação de variação de velocidade exige que se realize um comando de padrão para a velocidade. A curva da bomba disponibilizada pelo fabricante da mesma, foi inserida no EPANET e é relativa à uma determinada rotação (1.175rpm). Foi Inserido um novo padrão, identificado como “3”. As rotações usadas foram 1.000 rpm e 1.040 rpm. Os fatores foram definidos como 0,851 e 0,885 (Figura 5.18). Tais fatores foram utilizados pelo EPANET para variar a velocidade e, através das leis de semelhança, variar a curva da bomba informada.



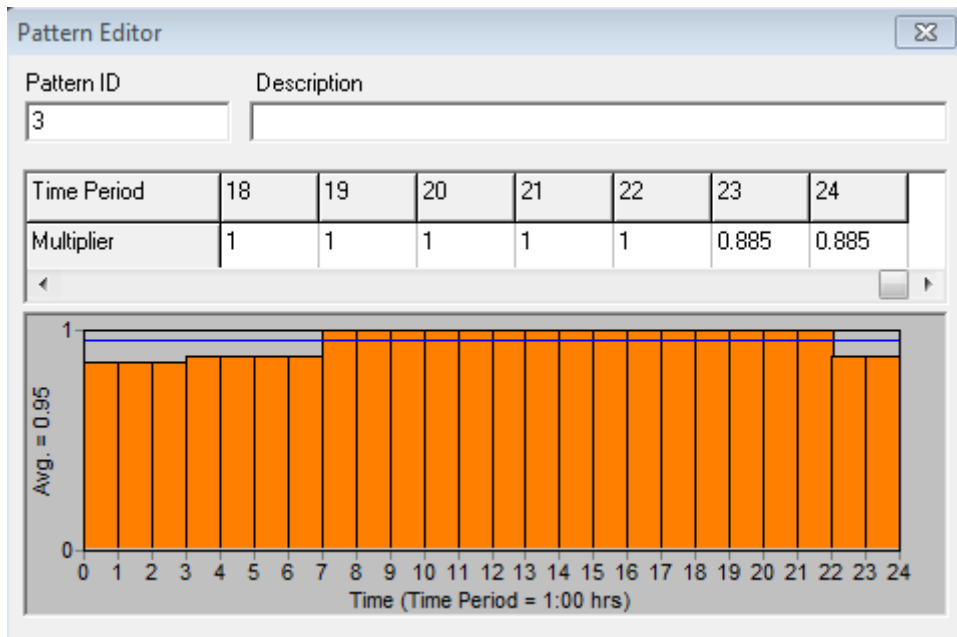


Figura 5.18 - Perfil “3” de operação ao longo de 24 horas (EPANET)

Os cálculos de energia consumida foram feitos diretamente pelo *software* EPANET, levando em consideração a rotação, vazão, AMT e eficiência em que a bomba está operando.

O *software* EPANET emprega a seguinte fórmula para o cálculo da potência:

$$P = \frac{9,81 \times Q \times H}{\eta}$$

**Q** = vazão de projeto, em m<sup>3</sup>/s; **H** = altura manométrica de bombeamento em metros de coluna d’água obtida pela soma do desnível geométrico entre o nível mínimo do reservatório de montante e o máximo do reservatório de jusante, mais as perdas totais no sistema (por atrito e localizadas) e **η** = rendimento global do conjunto elevatório, em decimais, resultante do produto entre o rendimento do motor e da bomba.

## 6 - CONCLUSÕES

1- A comparação de um sistema de bombeamento de uma estação elevatória de esgotamento sanitário de média tensão dotada de acoplamento hidrodinâmico a uma situação hipotética com rotação fixa e restrição por válvulas, utilizando como ferramenta o *software* EPANET, revelou a contribuição dos acoplamentos hidrodinâmicos quanto ao desempenho hidráulico e energético. Uma considerável redução no custo operacional foi observada, de aproximadamente R\$ 443 mil por ano.

2- Com relação às simulações para as condições de operação do tipo “liga-desliga” das motobombas de média tensão operando em uma EE (ARG / ETA Guandu), foi possível concluir que o investimento da implementação dos acoplamentos hidráulicos é tecnicamente viável, apesar de não representar uma redução de despesas com energia elétrica. Todavia, essa pode ser uma solução técnica e economicamente atrativa para o caso estudado, objetivando a redução de despesas de operação e manutenção.

3- Com relação aos índices de confiabilidade, MTBF e disponibilidade calculados no estudo do caso I (ETE ABC), para o acoplamento hidrodinâmico, foram detectados valores de 99,7%, 4,2 anos e 99,54% respectivamente. Os índices de desempenho informados pelo fabricante para a operação com acoplamento hidrodinâmico são de 99,98, 24,7 anos e 99,89%, respectivamente. A análise comparativa destes dados sugerem que a utilização do acoplamento hidrodinâmico na elevatória estudada, com acionamento em média tensão, caso 1, está próxima dos resultados esperados para operação com acoplamento hidrodinâmico, exceto para o MTBF, que pode ser justificado em função do pequeno número de unidades avaliadas, bem como pelo baixo tempo de uso por considerar-se a operação de apenas um conjunto motobomba, em regime de revezamento entre os três conjuntos existentes. O tempo de retorno do investimento foi de cinco anos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ALIANÇA PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA; Água e energia - Aproveitando as oportunidades de eficiência de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais; Editora Alliance, 2002.

ATLAS DE SANEAMENTO; IBGE, 2011.

BARRETO, M.P.; MENEZES, T.V.; CAPELLA, P.S.; OTERO, O.L.C.; PERRONE, F.P.D.; Aplicações de inversores de frequência em sistema de abastecimento de água. 37ª. Assembléia Nacional da ASSEMAE, Guarulhos/São Paulo, 2007.

BEST PRACTICE MANUAL; Electric Motor. Devki Energy Consultancy Pvt Ltd., Índia, 2006.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; MIERZWA, J.C.; BARROS, M.T.L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, M.; JULIANO, M.; EIGER, S.; Abastecimento de Água. In: Introdução à engenharia ambiental - O desafio do desenvolvimento sustentável; 2ª ed., Ed. Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL ENERGIA; Seção números em destaque; Vol. 375, p.13. janeiro, 2012.

CEDAE - Companhia Estadual de Águas e Esgotos; Estação de Tratamento de Água do Guandu, Rio de Janeiro, 2005.

CEDAE - Companhia Estadual de Águas e Esgotos; Rio de Janeiro, Disponível em: <http://www.cedae.com.br>; Acesso em 30 de maio, 2011.

EHANTO, O.; What to do with an old AC drive. World Pumps; p.24-26, junho, 2010.

ELETROBRÁS. PROCEL SANEAR; Rio de Janeiro; Disponível em: <http://www.eletronbras.gov.br/procel/site/areadeatuacao/saneamento>; Acesso em 20 outubro, 2011.

ERNESTBERGER, A.; Speed control of turbocompressors; Reprint VDI N°. 1425, p. 2-9, VT GmbH & Co. KG, Germany, 1998.

ESTNER, S.R.; Hydrodynamic variable speed couplings in the petrochemical industry, Voith Reprint 541, VT GmbH & Co. KG. Germany, 1998.

EUROPUMP; Variable speed pumping, a guide to successful applications - Executive summary. Reliability, Diagnostic end system control energy, Maintenance and life cycle costs - A way to lower life cycle costs; Hydraulic Institute; USA Department of energy; Efficiency and Renewable Energy, maio, 2004.

EVERHART, J.; SANCHEZ, K.; "Sensing" significant savings with VFD systems; World Pumps, p.18-21, março, 2004.

FECHNER, G.; Hydrodynamic variable speed couplings. Technical position, typical duties; Voith print, Cr 536, VT GmbH & Co, Germany, março, 1994.

FECHNER, G.; Variable speed turbo coupling - present development stage, application and characteristics (with emphasis on boiler feed pumps); Voith print, Cr 532, julho, 1997.

FLOWSERVE; Disponível em: [http://www.flowserve.com/pt\\_BR](http://www.flowserve.com/pt_BR); Acesso em 30 de novembro, 2011.

GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION, Engineering Data Book. Vol. 1; 10a. Edição, 1994.

GLASBRENNER, R.; WORSCH, H.; Speed regulation using hydrodynamic variable speed coupling in place of throttle regulation; Voith print, Cr 540, VT GmbH & Co, Germany, março, 1990.

GOMES, A. S.; Quanto custa a energia do saneamento?; Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente; p.40-41, abril/junho, 2008.

GOMES, H.P.; Sistemas de abastecimento de água. Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias; 3ª. Edição; Editora Universitária, UFPB, 2009a.

GOMES, H.P.; Sistemas de bombeamento - Eficiência energética; 1ª. Edição; Editora Universitária, UFPB, 2009b.

GURGEL, B.B.F.A.; Proposição de uma metodologia para avaliação de inversores de frequência em estações elevatórias de água. Estudo de casos no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos; Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

HÖFERT, R.; Variable speed turbo couplings used as pump drive in desalination plants; European conference on desalination and environment; Voith print, Cr 589, VT GmbH & Co, Germany, novembro, 1999.

HÖLLER, H.; Selection of operating fluids for hydrodynamic power transmitting equipment; Voith print, Cr 593, VT GmbH & Co, Germany, abril, 2002.

HÖLLER, H.; Hydrodynamics in drive technology, Special Issue "Voith power transmission – 100 Years of the Föttinger Principle"; Voith print, Cr 604, VT GmbH & Co, Germany, abril, 2008.

HYDRODYNAMICS IN POWER TRANSMISSION ENGINEERING, Couplings, Torque converters, converter transmissions; Voith print, VT GmbH & Co, Germany; Editor J.M. Voith GmbH; Editora C.F. Rees GmbH, 1988.

INSTITUTO TRATA BRASIL; Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br>;  
Acesso em 20 de dezembro, 2011.

KUNZ, U.; Tomorrow's pump control system; World Pumps, p.25-29, janeiro, 1995.

LARRALDE, E.; OCAMPO, R.; Centrifugal pump selection process; World Pumps, p.24-28; fevereiro, 2010.

MACINTYRE, A.J.; Equipamentos industriais e de processo; Editora LTC, 1997.

MATTOS, E.E; DE FALCO, R.; Bombas Industriais; Editora Interciência. 2ª Edição, 1998.

MESQUITA, A.L.A.; SILVA, L.J.S.; SILVA, L.J.S.; ABRAHIM Jr, O., PEREIRA, J.A.R.; SILVA, A.C.P.; Aspectos importantes na utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para a redução do consumo de energia; VI SEREA - Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água, João Pessoa, junho, 2006.

MESQUITA, A.L.A.; SILVA, L.J.S.; PEREIRA, J.A.R.; ABRAHIM Jr, O.; Utilização de bombas centrífugas em velocidade variável para redução do consumo de energia; **In:** Abastecimento de Água, o estado da arte e técnicas avançadas, Ed. Gomes, H.P.; Garcia, R.P. & Rey, P.L.I.; Editora Universitária. UFPB, p.122-140, 2007.

MONACHESI, M.G.; MONTEIRO, M.A.G.; ROCHA, C.R.; Eficiência energética em sistemas de bombeamento; Manual prático, ELETROBRÁS PROCEL SANEAR, 2005.

MONACHESI, M.G.; Eficiência energética em sistemas de bombeamento. Livro Técnico; ELETROBRÁS PROCEL SANEAR, 2005.

MOREIRA, M. A. R. G.; De olho no saneamento ambiental, Revista Brasil Energia 305, p.103, abril, 2006 a.

MOREIRA, M. A. R. G.; Potencial de mercado de eficiência energética no setor de água e esgoto no Brasil - Avaliação de estratégias segundo o modelo de Porter. Dissertação de Mestrado em Engenharia, em Ciências em Planejamento, UFRJ, 2006 b.

NESBITT, B.; Variable speed pumps. Are they worth the money? Part 1; World Pumps, p. 26-29, julho, 2001 a.

NESBITT, B.; Variable speed pumps. Are they worth the money? Part 2; World Pumps, p.50-54; agosto, 2001 b.

NOLTE, D.; Why efficiency matters; World Pumps, p.27-29; janeiro, 2004.

OLIVEIRA, G.; SCAZUFCA, P.; MARCATO, F.; Cenários e Condições para a Universalização do Saneamento no Brasil; Parte 1, Federação Instituto de Pesquisas Econômicas, Informações FIPE, 2011.

PEIKERT, G. H.; Variable speed fluid couplings driving centrifugal machinery. Voith Transmissions Inc.; Texas, USA: 13<sup>th</sup> TBM Symposium, Houston, Texas Voith print, Cr 551, 1992.

PEIKERT, G.H.; Hydrodynamic power transmission in the oil and gas industry; Voith print, Cr 578, VT GmbH & Co, Germany, 2000.

PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico; Edital 5; Conservação de água e energia em sistemas prediais e públicos de abastecimento de água; Editora ABES. Vitória, ES, 2009.

RAPOSO, J.; Manutenção centrada em confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: Uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão; Dissertação de Mestrado, UFBA, 2004.

SABESP; São Paulo. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br>; Acesso em 20 outubro, 2011.

SILVA, M.A.; Manual de Treinamento; Seleção e aplicação de bombas centrífugas; Centro de Treinamento do Produto KSB, 5ª Edição, maio, 2003.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. <http://www.snis.gov.br>; Diagnósticos dos Serviços de Água e Esgotos (2009), 2011.

SOUZA, B.; Confiabilidade de sistemas Digitais, 2003.

SZYCHTA, L.; System for optimizing pump station control; World Pumps. p.45 - 48; fevereiro, 2004.

TORREIRA, R.P.; Bombas, válvulas e acessórios; Editora EX Libris, Ed. MCT, 1996.

TRANSFLUID; Variable fill fluid couplings; Disponível em: <http://www.transfluid.eu> ; Acesso em 09 de dezembro, 2011.

TSUTIYA, T. M.; Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água; 1ª ed., São Paulo, ABES, 2001.

TSUTIYA, M.T.; Abastecimento de Água; 1ª Edição São Paulo; Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2004.

TSUTIYA, M. T.; Uso de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia em bombeamentos In: Abastecimento de Água, o estado



da arte e técnicas avançadas; Ed. Gomes, H.P.; Garcia, R.P. & Rey, P.L.I.; Editora Universitária. UFPB, p.105-120, 2007.

ULIANA, J.E.; Comando e motores elétricos. Apostila Técnica; Curso técnico em plásticos, 2006.

VALLILO, D.C. ; KUBOTA, H. ; TSUTIYA, M.T. ; UEDA, S. ; Utilização de bombas de rotação variável em obras sanitárias; Revista DAE, Vol. 41: p. 266-274, setembro, 1981.

VARIABLE SPEED PLANETARY GEAR; Voith Turbo print. Cr 168, Vorecon, VT GmbH & Co, Germany, 2005.

VOGELESANG, H.; Energy efficiency, Pump choice to optimize energy consumption; World Pumps; p. 20-24; dezembro, 2008.

VOITH; Operação e características, Turboacoplamentos hidrodinâmicos Voith. p.1-27; fevereiro, 2007.

VST (VARIABLE SPEED TURBO COUPLING); Voith print, Cr104, VT GmbH & Co, Germany, 2010.

WEBER, T.; Tolerância a falhas: Conceitos e exemplos, Programa de Pós-Graduação em Computação - Instituto de Informática - UFRGS, 2006.

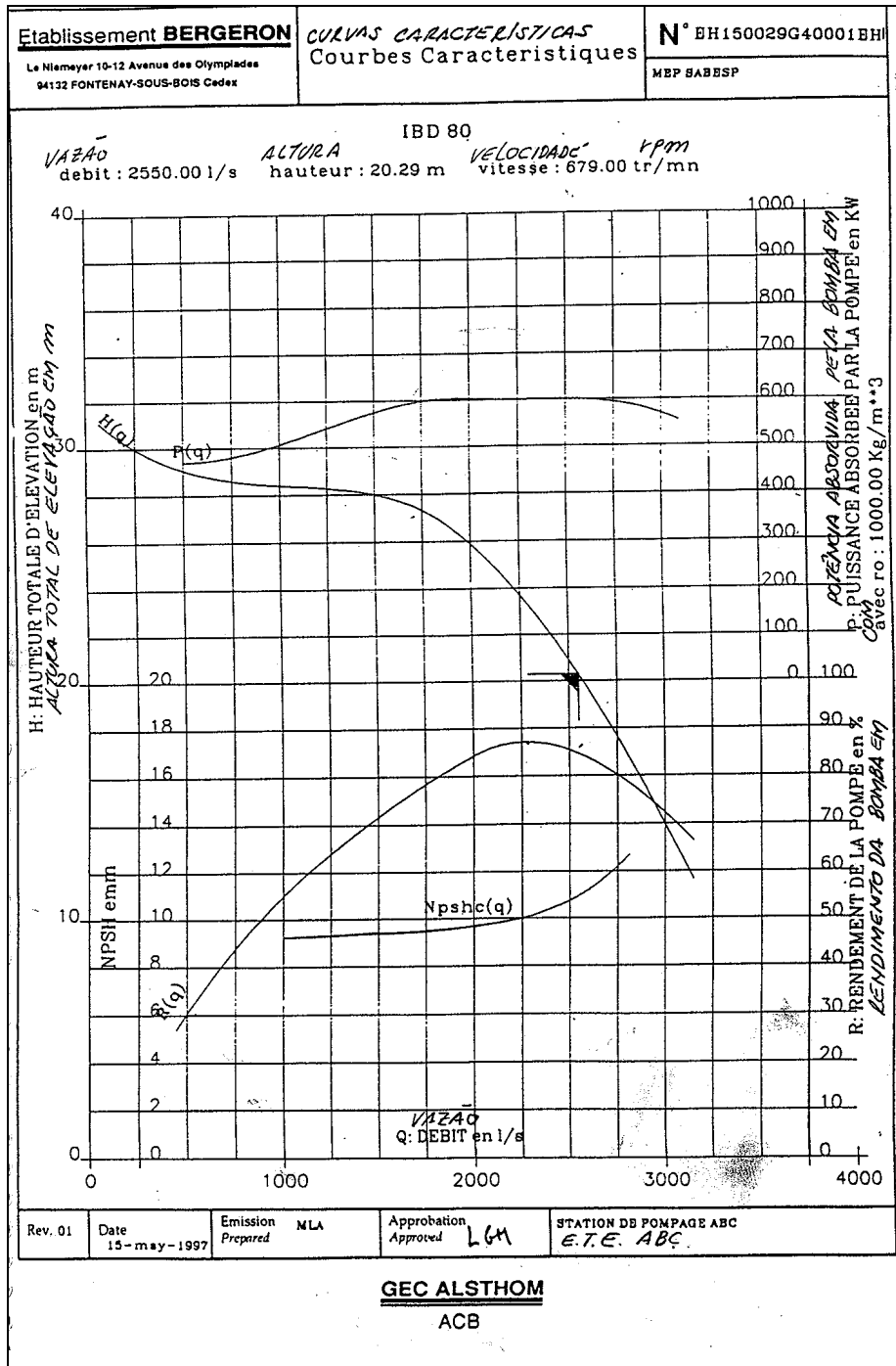
WEG; Motores Elétricos Assíncronos de Alta Tensão; DT-6; Curso, outubro, 2005.

WEG; Motores Elétricos - Características, Especificações, Instalações e Manutenção, Catálogo, 2006.

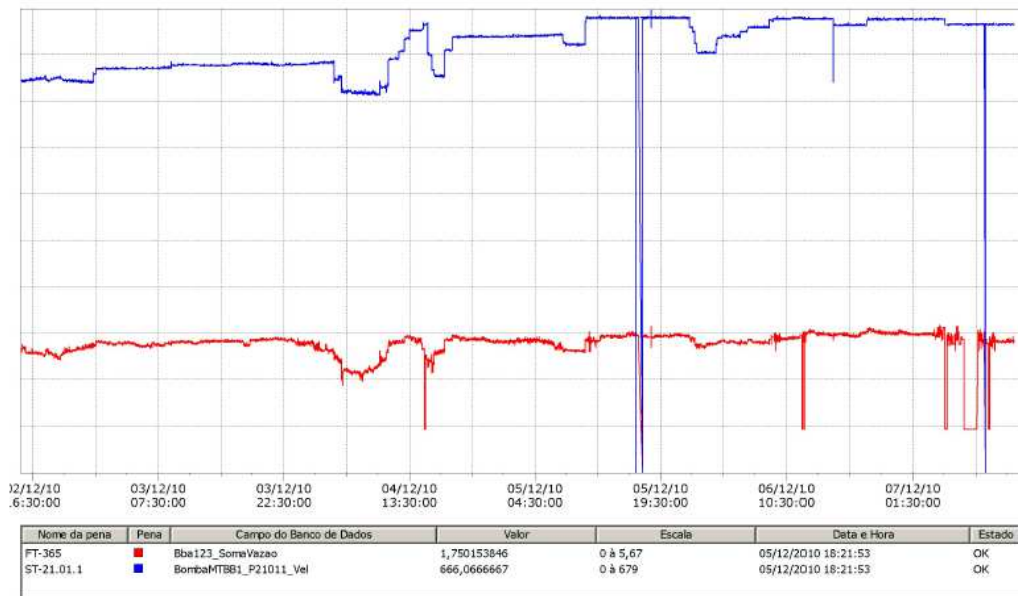
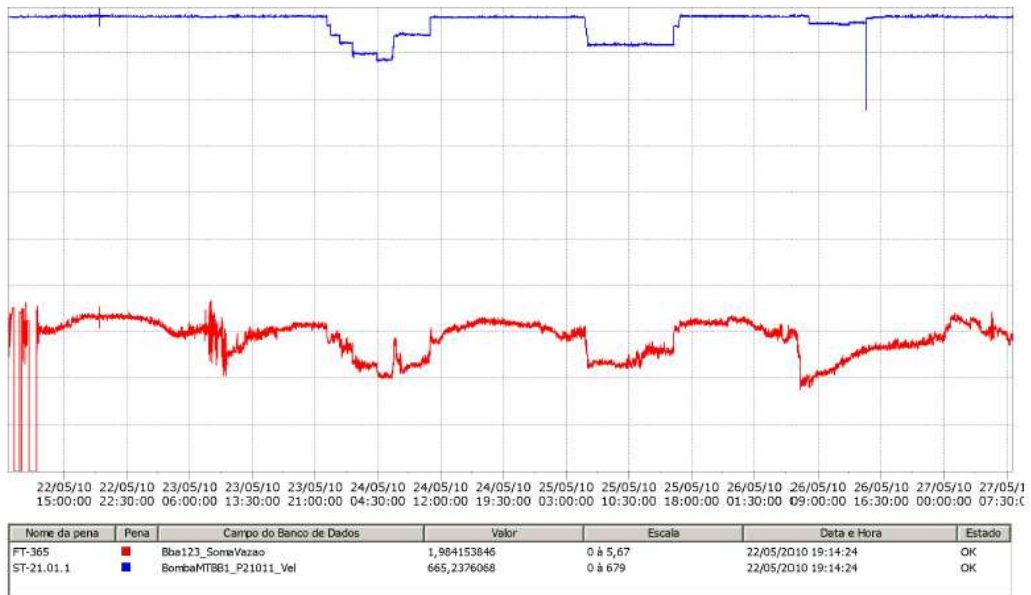
# ANEXOS

## INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA EE FINAL - ETE ABC - SABESP

### ANEXO 1 - Curva das bombas da EE Final da ETE ABC.



**ANEXO 2 - Perfil de operação, vazão e rotação levantados junto à ETE ABC, coletados durante um período de 6 meses.**



# INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA EE ARG - ETA GUANDU - CEDAE

## ANEXO 3 - Curva das bombas - EE ARG

