BRENO BOTELHO FERRAZ DO AMARAL GURGEL

**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 apresentada ao Departamento de
Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção de Título de Mestre em Engenharia

**São Paulo
2006**

BRENO BOTELHO FERRAZ DO AMARAL GURGEL

**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 apresentada ao Departamento de
Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção de Título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica e Sanitária

Orientador:
Prof. Dr. Milton Tomoyuki Tsutiya

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de novembro de 2006.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Gurgel, Breno Botelho Ferraz do Amaral
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 / B.B.F. do A. Gurgel. -- ed.rev. -- São Paulo, 2006.
130 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sani-
tária.

1.Bombas centrífugas 2.Inversores de frequência 3.Motores
elétricos 4.Estações elevatórias I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e
Sanitária II.t.

Dedico este trabalho a minha esposa Ana Lucia pela paciência e grande incentivo e a minha filha Gisele pelo estímulo e apoio na sua realização.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Profº Dr. Milton Tomoyuki Tsutiya pela orientação segura, com diretrizes firmes e apoio total durante a elaboração do trabalho.

Aos Mestres em Hidráulica, Engenheiros Fernando Lourenço de Oliveira e Luiz Antonio Barretti, colegas do mestrado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, pelas dicas que abreviaram caminhos.

Ao amigo Msc Mário Pero Tinoco pelo aconselhamento de quem já fez e o apoio espiritual nos momentos difíceis.

Aos amigos da SABESP, Msc Jorge Luiz Monteiro, Tec. Antonio Basílio dos Santos, Msc Tony Youssif Garido, Tec. João Raymundo dos Santos Júnior, Analista Francisco Tarcísio Cavalcanti, Analista Eliane Pereira Lopes e Tec. Levi Bento do Couto, pelo apoio, incentivo e ajuda direta na execução deste trabalho.

Aos amigos da sala de apoio em São Paulo, Damildo José Torlai e José Paulo Kosmiskas, pela ajuda, estímulo e defesa deste mestrando.

Um agradecimento especial aos amigos Renato Veneziani, Leila Dias, Renata Trench e Rosangela Araújo pela torcida dos momentos difíceis.

RESUMO

Este trabalho avalia a aplicação de inversores de frequência realizada em estações elevatórias de água tratada da cidade de São José dos Campos que são monitoradas pelo Centro de Controle Operacional da Sabesp. Foram estudadas as características técnicas de quatro sistemas de bombeamento que operam com velocidade variável. O trabalho apresenta uma proposta de metodologia para a seleção de inversores de frequência, com base na metodologia recomendada pelo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) aplicada em quatro sistemas da cidade de São José dos Campos. Essa proposta de metodologia foi executada através da avaliação seqüencial de um fluxograma e da análise gráfica das informações instantâneas e históricas dos parâmetros de vazão, pressão e frequência de rotação, existentes no banco de dados dos servidores de supervisão e controle do Centro de Controle Operacional de São José dos Campos. Após a aplicação dessa metodologia, conclui-se que, a aplicação de inversores de frequência nos sistemas estudados estava adequada e recomenda-se a sua aplicação em sistemas de bombeamento semelhantes.

ABSTRACT

The main purpose of this work is to evaluate the application of Variable Frequency Drives – VFD, carried out in water pumping stations managed by SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, located in the city of São José dos Campos that are monitored by the Operational Control Center – O.C.C. Technical characteristics of four pumping systems were studied, mainly those operating with fixed or changeable speed. It proposes a new methodology for VFD selection, based on the methodology recommended by EUROPUMP and HYDRAULIC INSTITUTE (2004), used on the systems mentioned before. This proposal of methodology were done using instantaneous and historical information of flow, pressure and rotation frequency parameters stored on data base installed on supervision and control servers installed. After this application, we also concluded that the use of VFD on the evaluated systems was correct and through this we recommend its use on similar pumping systems.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Introdução	4
3.2 Estações elevatórias de água	5
3.2.1 Tipos de estações elevatórias	5
3.2.2 Bombas centrífugas	9
3.2.3 Motores elétricos	30
3.3 Inversores de frequência	36
3.3.1 Tipos de equipamentos de velocidade variável	42
3.3.2 Uso de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água	47
3.3.3 Métodos de controle de vazão	50
3.3.4 Redução de custos com aplicação de inversores de frequência	56
3.4 Estudos de casos de aplicações de inversores de frequência	58
4. MATERIAIS E MÉTODOS	64
4.1 Sistema de abastecimento de água de São José dos Campos	64
4.1.1 Subsistema Paraíba	65
4.1.2 Subsistema Eugênio de Melo	70
4.1.3 Subsistema Buquirinha	70
4.1.4 Subsistema Costinha	71
4.1.5 Subsistema São Francisco Xavier	71
4.2 Área de pesquisa	71
4.2.1 Característica da área	71

4.2.2 Subsistema Eugênio de Melo	73
4.2.3 Subsistema Paraíba	75
4.3 Coleta de dados	80
4.4 Fluxograma de avaliação da aplicação de inversores de frequência	87
4.5 Método de análise gráfica para avaliação dos inversores de frequência	91
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	93
5.1 Resultados da aplicação de fluxograma de avaliação de inversores de frequência	93
5.2 Resultados da análise gráfica para avaliação dos inversores de frequência	94
5.2.1 Análise gráfica dos dados do sistema Galo Branco	97
5.2.2 Análise gráfica dos dados do sistema Campo dos Alemães	100
5.2.3 Análise gráfica dos dados do sistema Jardim Morumbi.....	104
5.2.4 Análise gráfica dos dados do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II	106
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXOS	115
Anexo A – Esquema hidráulico do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Componentes de uma estação elevatória.	5
Figura 3.2	Estação elevatória de poço seco e conjunto motor-bomba de eixo horizontal.	7
Figura 3.3	Estação elevatória de poço úmido e conjunto motor-bomba de eixo vertical.	7
Figura 3.4	Estação elevatória de poço úmido e conjunto motor-bomba submerso.	8
Figura 3.5	Estação pressurizadora de conjunto motor-bomba submerso.	8
Figura 3.6	Vista geral de uma estação pressurizadora tipo Q.	9
Figura 3.7	Classificação geral de bombas.	10
Figura 3.8	Classificação detalhada de bombas.	11
Figura 3.9	Classificação das bombas centrífugas segundo a trajetória do líquido no rotor.	12
Figura 3.10	Classificação de bombas pela rotação específica dos rotores em função da potência hidráulica.	14
Figura 3.11	Classificação de bombas pela rotação específica dos rotores em função da vazão de recalque.	15
Figura 3.12	Curvas características de bombas centrífugas.	16
Figura 3.13	Curvas características da bomba submersa BHS 813 Ebara.	17
Figura 3.14	Ponto de trabalho de uma bomba centrífuga.	18
Figura 3.15	Relações características de bombas centrífugas.	20
Figura 3.16	Efeito da variação de velocidade em bombas centrífugas.	21
Figura 3.17	Efeito da variação de velocidade em bombas centrífugas em função da troca de diâmetro do rotor.	22

Figura 3.18	Gráfico para estudo da cavitação com NPSHr desconhecido	26
Figura 3.19	Associação de bombas iguais em paralelo.	28
Figura 3.20	Associação de bombas centrífugas em série.	29
Figura 3.21	Classificação de motores elétricos.	30
Figura 3.22	Detalhes de um motor de indução trifásico.	32
Figura 3.23	Gráfico de variação de conjugado em função da rotação.	35
Figura 3.24	Esquema elétrico dos componentes de um inversor de frequência.	37
Figura 3.25	Principais componentes de um inversor de frequência.	38
Figura 3.26	Curva de torque constante.	40
Figura 3.27	Curva de torque variável.	40
Figura 3.28	Classificação de acionadores de velocidade de rotação variável.	42
Figura 3.29	Sistema de modulação de tensão tipo PWM.	45
Figura 3.30	Bombeamento direto para a rede de distribuição e reservatório a jusante.	48
Figura 3.31	Bombeamento direto para a rede de distribuição e reservatório elevado a jusante.	48
Figura 3.32	Bombeamento direto para a rede de distribuição localizada em área elevada.	49
Figura 3.33	Bombeamento tipo booster.	49
Figura 3.34	Bombeamento direto na rede de distribuição sem reservatórios de jusante.	49
Figura 3.35	Controle de vazão por estrangulamento de válvula.	51
Figura 3.36	Controle de vazão por by-pass na saída da bomba.	52
Figura 3.37	Controle por variação de velocidade do motor com aplicação de inversor de frequência.	53

Figura 3.38	Comparativo de redução de consumo de energia.	54
Figura 3.39	Variação do consumo de energia por vários métodos de controle de vazão.	55
Figura 3.40	Gráfico de faixas de operação recomendadas para bombas e inversores de frequência.	56
Figura 3.41	Esquema operacional do setor Santana na situação inicial.	59
Figura 3.42	Esquema operacional do setor Santana na situação final.	60
Figura 3.43	Gráfico de pressões com rotação constante.	61
Figura 3.44	Gráfico de pressões com rotação variável.	62
Figura 4.1	Vista geral da estação elevatória de água bruta de São José dos Campos.	66
Figura 4.2	Vista geral do poço, cavalete e quadro de comando do Poço P-104.	66
Figura 4.3	Vista geral dos floculadores e decantadores da ETA II.	67
Figura 4.4	Vista geral do reservatório semi-enterrado R34.	68
Figura 4.5	Vista geral dos reservatórios T25 – elevado e R33 - apoiado	68
Figura 4.6	Vista geral da estação pressurizadora - Booster – EPV / Hawai.	69
Figura 4.7	Esquema geral do sistema Galo Branco dentro do subsistema Eugênio de Melo.	73
Figura 4.8	Vista geral do sistema Galo Branco com a estação pressurizadora tipo Q e o reservatório apoiado R82.	74
Figura 4.9	Vista do painel de comando do inversor de frequência do sistema Galo Branco.	75
Figura 4.10	Esquema geral do sistema R49/65 do Jardim Morumbi.	76
Figura 4.11	Vista geral da estação pressurizadora tipo Q do Campo dos Alemães.	77

Figura 4.12	Vista do painel de comando do inversor de freqüência do sistema Campo dos Alemães.	77
Figura 4.13	Vista geral da estação pressurizadora tipo Q do Jd. Morumbi.	78
Figura 4.14	Vista do painel de comando do inversor de freqüência do sistema Jd. Morumbi.	79
Figura 4.15	Vista geral da estação pressurizadora com conjunto motor-bomba horizontal do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.	79
Figura 4.16	Vista do painel de comando do inversor de freqüência do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.	80
Figura 4.17	Vista geral da mesa de controle operacional com operador, monitores dos microcomputadores e sistema de rádio comunicação.	81
Figura 4.18	Esquema do sistema de supervisão ELIPSE E3.	82
Figura 4.19	Tela de operação de um sistema construída com ELIPSE E3 Studio.	84
Figura 4.20	Gráficos de dados históricos de um sistema supervisionado pelo Centro de Controle Operacional.	85
Figura 4.21	Tela de dados exportados para planilha Excel® a partir do ELIPSE E3®.	86
Figura 4.22	Fluxograma de avaliação do uso adequado dos inversores de freqüência.	88
Figura 4.23	Exemplo de método de análise gráfica.	92
Figura 5.1	Curvas de variação de freqüência, vazão e pressão do sistema R3\R4 – Centro.	95
Figura 5.2	Curvas de variação de freqüência, vazão e pressão do Sistema R82 – Galo Branco.	96

Figura 5.3	Curvas de variação de frequência, vazão e pressão do Sistema R49/R65 – Jardim Morumbi.	96
Figura 5.4	Curvas de variação de frequência do sistema Galo Branco com início da operação em 58 Hz.	98
Figura 5.5	Curvas de variação de frequência do sistema Galo Branco por períodos superiores a 10 horas de operação com frequência média 58 Hz.	99
Figura 5.6	Curvas de variação de frequência sem ajuste, dados sem tratamento do sistema Campo dos Alemães.	101
Figura 5.7	Curvas de variação de frequência, dados ajustados do sistema Campo dos Alemães.	102
Figura 5.8	Curva padrão de variação de frequência, vazão e pressão do sistema Campo dos Alemães.	103
Figura 5.9	Curvas de variação de frequência, vazão e pressão do sistema Jardim Morumbi.	105
Figura 5.10	Curvas de variação de frequência, vazão e pressão, dados sem tratamento do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparação entre conjunto motor-bomba de rotação constante e variável.	63
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAB	Adutora de água bruta
CCO	Centro de Controle Operacional
CLP	Controlador Lógico Programável
EBH	Elevatória de água bruta, conjunto motor-bomba de eixo horizontal
EBV	Elevatória de água bruta, conjunto motor-bomba de eixo vertical
EEAB	Estação Elevatória de Água Bruta
EPH	Elevatória pressurizadora de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo horizontal, alimenta um reservatório
EPV	Elevatória (pressurizadora) de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo vertical, alimenta um reservatório
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETH	Elevatória de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo horizontal, alimenta rede e reservatório
ETV	Elevatória de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo vertical, alimenta rede e reservatório
Excel	Aplicativo computacional com planilhas de cálculo
IEEE	Institute of Electrical and Eletronic Engineers
IPDt	Índice de perdas totais por ramal na distribuição
RES	Reservatório de abastecimento
RV	Unidade de Negócio do Vale do Paraíba
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
TAU	Tanque de Amortecimento Unidirecional
WaterCAD	Aplicativo computacional de simulação hidráulica

LISTA DE SÍMBOLOS

cv	cavalo vapor
H	altura manométrica total
mca	metro de coluna de água
N	rotação da bomba
N_q	rotação específica de uma bomba centrífuga em função de vazão
N_s	rotação específica de uma bomba centrífuga em função de potência
P	potência da bomba
Q	vazão
rpm	rotações por minuto

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica dos inversores de frequência para a variação da rotação dos equipamentos de bombeamento, ocorrida a partir de 1980, em função do desenvolvimento dos semicondutores de potência com excelentes características de desempenho, confiabilidade e baixo custo, têm ocasionado alteração no sistema tradicional de abastecimento de água.

A variação da rotação dos equipamentos de bombeamento através de inversores de frequência revelou-se a solução para a redução dos custos de implantação de sistemas tradicionais de abastecimento, pois permitem o bombeamento direto ao consumidor, portanto, com o uso do inversor de frequência poderá ser eliminado o tradicional reservatório elevado.

O controle de vazão pela aplicação de variadores de rotação sempre produziu um consumo menor de energia elétrica, em comparação com os métodos tradicionais de controle de vazão. Os inversores de frequência por apresentarem melhor rendimento, surgem então como a evolução da tecnologia da variação de rotação da bomba em substituição aos tradicionais variadores de tensão, variadores eletromagnéticos, variadores hidráulicos e variadores de resistência.

A Sabesp em 2004 consumiu 2.042 GWh correspondendo a 2,1% do consumo total de energia do Estado de São Paulo (HAGUIUDA, 2005). Na Unidade de Negócio do Vale do Paraíba da Sabesp, que compreende a operação de 24 municípios verifica-se que a despesa de energia elétrica no ano de 2004 foi de 19,67% da despesa total

dessa Unidade de Negócio e a operação de bombas corresponde a 95% dessa despesa com um consumo médio mensal de 3.325 MWh. As aplicações de inversores de frequência passaram assim a ter importância estratégica nas ações operacionais, pois permitem a redução de custos pela redução do consumo de energia e permitem o controle das pressões nas redes de distribuição de água.

O uso de inversores de frequência elimina os bombeamentos com pressões excessivas, que provocam arrebentamentos de redes e vazamentos de água. Os controles de perdas são fundamentais para o gerenciamento da operação dos sistemas de abastecimento de água, sendo o gerenciamento de pressões o principal objetivo na cidade de São José dos Campos.

Para avaliar a eficiência da aplicação de inversores de frequência, este trabalho estuda quatro estações de bombeamento da cidade de São José dos Campos, aplicando uma adaptação da metodologia de avaliação recomendada pelo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004), complementada com a análise gráfica dos parâmetros de acompanhamento operacional, utilizados no Centro de Controle Operacional da cidade.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- Verificar a eficiência da aplicação de inversores de frequência em estações elevatórias de água utilizadas em sistemas de bombeamento na cidade de São José dos Campos.
- Avaliar a aplicação de metodologia proposta neste trabalho para a escolha de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água. Essas metodologias compõem-se de um fluxograma e da análise gráfica dos dados de sistemas estudados

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução

O bombeamento de água pode constituir um método econômico de se levar água a todos os pontos de uma cidade onde a topografia não permite escoamento por gravidade. Em muitos casos é mais econômico substituir o reservatório elevado por estações de bombeamento. Segundo YASSUDA (1966), o problema está em planejar adequadamente esse sistema de abastecimento, e poder tomar decisões criteriosas sobre quando, onde e como fazer esse bombeamento.

As bombas geralmente são utilizadas para captar água bruta, na lavagem de filtros em estações de tratamento de água (ETA), para abastecer reservatórios elevados, para o abastecimento direto na rede ou reforço de pressão em setores críticos de abastecimento de água.

Para o EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004), quando se projeta um sistema de bombeamento, os requisitos de vazão e pressão têm que ser bem estabelecidos, pois esses requisitos definem a seleção de bombas e motores.

Segundo HAESTED et al (2004), para evitar a pressurização constante das redes de um sistema de distribuição de água em que a reservação não flutue, uma bomba de velocidade variável pode ser razoavelmente eficiente no bombeamento direto de água aos consumidores, embora não tão eficiente como uma bomba de velocidade constante e um reservatório elevado corretamente dimensionado.

3.2 Estações elevatórias de água

Para TSUTIYA (2004), as estações elevatórias são partes essenciais dos sistemas públicos de abastecimento de água, sendo utilizadas durante todo o processo de captação, tratamento, reservação e distribuição da água.

Segundo CHIARA (1968), a estação elevatória compreende o conjunto de edifícios, máquinas, equipamentos e aparelhos necessários para elevação de água, bruta ou tratada, de um ponto para outro, com pressão e em quantidade adequada, a qualquer momento.

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

Figura 3.1 Componentes de uma estação elevatória.
Fonte: TSUTIYA (2004).

3.2.1 Tipos de estações elevatórias

Para TSUTIYA (2004), as estações elevatórias que recalcam água sem tratamento são denominadas de estações elevatórias de água bruta e quando recalcam água após tratamento são denominadas estações elevatórias de água tratada. Quando são utilizadas para reforço da adução ou aumento da pressão na rede de distribuição, as elevatórias são denominadas de “booster” ou estação pressurizadora.

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” não dispõem de poço de sucção, sendo instaladas diretamente nas adutoras ou redes principais de abastecimento de água.

Os tipos de conjunto motor-bomba para cada tipo de poço são:

(A) Estação elevatória de poço seco:

Conjunto motor-bomba de eixo horizontal (Figura 3.2).

Conjunto motor-bomba de eixo prolongado, bomba não submersa.

Conjunto motor-bomba de eixo vertical, bomba não submersa.

Conjunto motor-bomba auto escorvante.

(B) Estação elevatória de poço úmido:

Conjunto motor-bomba de eixo vertical, bomba submersa (Figura 3.3).

Conjunto motor-bomba submerso (Figura 3.4).

(C) Estação pressurizadora ou “booster”:

Conjunto motor-bomba de eixo horizontal.

Conjunto motor-bomba submerso (Figura 3.5).

Figura 3.2 Estação elevatória de poço seco e conjunto motor-bomba de eixo horizontal.

Fonte: TSUTIYA (2004).

Figura 3.3 Estação elevatória de poço úmido e conjunto motor-bomba de eixo vertical.

Fonte: TSUTIYA (2004).

Fonte: TSUTIYA (2004).

Figura 3.5 Estação pressurizadora de conjunto motor-bomba submerso.
Fonte: Sabesp (2006).

Este estudo avaliou sistemas com características de estações pressurizadoras ou “boosters”, desenvolvidos em tubulões fechados com diâmetros pouco superiores ao das bombas submersas utilizadas e denominadas estações pressurizadoras tipo “Q” (Figura 3.6).

Figura 3.6 Vista geral de uma estação pressurizadora tipo Q.

Segundo TSUTIYA (2004), inicialmente essas estações apesar de terem custo de implantação menor tinham custo de manutenção maior (principalmente por queima de motor), vindo a sofrer uma grande melhoria operacional com o uso de inversores de frequência.

3.2.2 Bombas centrífugas

• **Classificação das bombas**

As bombas são classificadas em cinéticas ou de deslocamento positivo, conforme se observa na Figura 3.7. As bombas cinéticas fornecem energia à água sob a forma de velocidade, transformando essa velocidade do fluido dentro das bombas em energia de pressão, fazendo com que esse fluido atinja cotas mais elevadas.

Nas bombas de deslocamento positivo não há troca de energia interna na massa líquida. O líquido sofre uma pressão interna e por estar confinado desloca-se de uma posição estática para outra mais elevada. A vazão é proporcional à velocidade do acionador da máquina. Essas bombas, não são utilizadas no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos, e por isso, não serão objeto deste estudo. As bombas estudadas neste trabalho são bombas centrífugas de fluxo radial ou fluxo misto.

Figura 3.7 Classificação geral de bombas.
Fonte: TSUTIYA (2004).

A Figura 3.8 apresenta a classificação mais detalhada de bombas centrífugas e bombas de deslocamento positivo.

Figura 3.8 Classificação detalhada de bombas.
Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

• **Classificação das bombas centrífugas**

As bombas centrífugas classificam-se segundo a trajetória do líquido no rotor, de acordo com a disposição do conjunto motor-bomba e em função da sua rotação específica.

Pelo critério da trajetória do líquido no rotor, classificam-se em bombas centrífugas de fluxo radial, de fluxo axial e de fluxo misto. A Figura 3.9 apresenta a classificação das bombas centrífugas segundo a trajetória do líquido no rotor.

Figura 3.9 Classificação das bombas centrífugas segundo a trajetória do líquido no rotor.

Fonte: TSUTIYA (2004).

As bombas de fluxo radial são aquelas em que o formato do rotor impõe um escoamento do líquido, preponderantemente, no sentido centrífugo radial. Os rotores

podem ser de sucção simples ou de dupla sucção. Essas bombas são empregadas onde se exige grande altura de elevação e vazão relativamente pequena.

Nas bombas de fluxo axial o formato do rotor impõe um escoamento no sentido axial e são empregadas para recalcar grandes vazões e pequena altura de elevação.

Quando o formato do rotor impõe um escoamento simultâneo nos sentidos axial e radial tem-se bombas de fluxo misto, que são empregadas nos casos em que a altura de elevação seja relativamente baixa e a vazão elevada.

Na classificação conforme a disposição do conjunto motor-bomba, tem-se o conjunto motor-bomba de eixo horizontal, o conjunto motor-bomba de eixo vertical (bombas submersas e bombas não submersas) e o conjunto motor-bomba submerso.

PORTO (2004) e TSUTIYA (2004) definem rotação específica como a rotação (em rpm) em que uma bomba, de uma dada geometria, produz uma vazão unitária ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) contra uma altura manométrica unitária (1 m), nas condições de máximo rendimento e expressa de forma geral pela equação (1):

$$N_q = \frac{N \times Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

sendo: N_q = rotação específica, rpm;

N = rotação da bomba, rpm;

Q = vazão, m^3/s ;

H = altura manométrica total, m.

PORTO (2004) também define a rotação específica como a rotação (em rpm) em que uma bomba de uma dada geometria desenvolve uma unidade de potência (1cv) sob uma altura manométrica unitária (1m), nas condições de máximo rendimento e expressa de forma geral pela equação (2).

$$N_s = \frac{N \times P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (2)$$

sendo N_s = rotação específica, rpm;

N = rotação da bomba, rpm;

P = potência, cv;

H = altura manométrica total, m.

As classificações das bombas em função da rotação específica de seus rotores são apresentadas nas Figuras 3.10 e 3.11.

Figura 3.10 Classificação de bombas pela rotação específica dos rotores em função da potência hidráulica.

Fonte: PORTO (2004).

Figura 3.11 Classificação de bombas pela rotação específica dos rotores em função da vazão de recalque.

Fonte: TSUTIYA (2004).

• *Curvas características de bombas*

As bombas centrífugas são máquinas projetadas e construídas para trabalhar na mesma rotação, sob diferentes condições de vazão e de altura manométrica. Essas condições são representadas em curvas características conforme a Figura 3.12.

Existe, entretanto, uma interdependência bem definida entre esses valores de vazão e altura manométrica, que é obtida através de ensaios feitos nos laboratórios dos fabricantes.

Figura 3.12 Curvas características de bombas centrífugas.
Fonte: TSUTIYA (2004).

É comum o fabricante fornecer as curvas características de seus produtos para diversos diâmetros de rotor, relacionando altura manométrica (H), a potência necessária (P) e o rendimento (η) em função da vazão (Q), conforme se observa na Figura 3.13,

O conhecimento das curvas características é de fundamental importância, pois cada bomba é projetada basicamente para elevar uma determinada vazão (Q) a uma altura manométrica total (H) em condições de máximo rendimento. O ponto de operação de uma bomba centrífuga é a intersecção da curva da bomba com a curva do sistema (Figura 3.14).

BHS 813 - Poços de 8"

MODELO	EST	HP	D mm	Ø POL	L mm	VAZÃO E ALTURA ELEVATÓRIA							
						Q*	30*	50	70	90	110	130	(m³/h)
BHS813-1	1	12,5	190	5	1250	36	33,3	30	26,5	24,5	21	15	m
BHS813-2	2	25	190	5	1825	72	65,5	60	54,5	49,5	42	31,5	m
BHS813-3	3	40	190	5	1893	108	99	92	84,5	77	67	52	m
BHS813-4	4	50	190	5	2060	144	134	123	113	102	89,5	69,5	m
BHS813-5	5	65	190	5	2473	180	165,5	154	141	128	112	87	m
BHS813-6	6	80	190	5	2618	216	198	186	172	159	138	109	m
BHS813-7	7	90	190	5	2763	252	232	215	198	179	156	121	m
BHS813-8	8	100	190	5	2908	288	264	246	226	205	179	139	m
BHS813-9	9	115	190	5	3180	324	300	278	252	232	201,5	156	m
BHS813-10	10	125	190	5	3325	360	336	310	281,5	260	224	174,4	m

OBS: as faixas em destaque representam os pontos ideais de operação.

CT-036-02-05

Figura 3.13 Curvas características da bomba submersa BHS 813 Ebara.
Fonte: EBARA (2006).

Figura 3.14 Ponto de trabalho de uma bomba centrífuga.
Fonte: TSUTIYA (2004).

• Relações características de bombas centrífugas

Existem certas relações que permitem obter as curvas características das bombas para uma rotação diferente daquela cujas curvas características são conhecidas. Outras relações permitem prever as novas curvas características de uma bomba se for reduzido o diâmetro do rotor, dentro de limites que dependem do tipo da bomba (TSUTIYA 2004).

a) Variação da rotação da bomba

Segundo MACINTYRE (1987), SANKS (1998) e TSUTIYA (2004) para uma bomba centrífuga com um mesmo rotor, girando com velocidades diferentes, são válidas as seguintes relações:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (5)$$

sendo N_1 e N_2 = velocidade de rotação da bomba;

Q_1 e Q_2 = vazão relativa a rotação da bomba;

H_1 e H_2 = altura manométrica total relativa a rotação da bomba;

P_1 e P_2 = potência consumida da bomba relativa a rotação da bomba.

Essas relações, conhecidas como leis da semelhança, são utilizadas para se determinar o efeito da variação da rotação na vazão, altura e potência de uma bomba (TSUTIYA 2004).

A Figura 3.15, apresenta as leis de semelhança num sistema cuja bomba varia suas características pela variação de sua velocidade de rotação. Essa figura apresenta a interseção das curvas características da bomba com curvas características do sistema, para rotações N_1 , N_2 e N_3 , resultando nos pontos: A_1 , A_2 , A_3 , B_1 , B_2 , B_3 , C_1 , C_2 , C_3 , D_1 , D_2 e D_3 .

TSUTIYA (2004) verificou que o rendimento (η) tende a decrescer com a diminuição da rotação, mas em uma faixa de $\pm 20\%$ da rotação inicial (η_1, η_2, η_3), praticamente não se observam alterações significativas do rendimento (η).

Figura 3.15 Relações características de bombas centrífugas.
Fonte: TSUTIYA (2004).

Segundo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) os relacionamentos quadráticos e cúbicos da altura manométrica total e da potência consumida implicam em que pequenas mudanças na velocidade geram significativas mudanças nesses parâmetros.

A Figura 3.16 mostra o efeito da variação da velocidade no desempenho de uma bomba centrífuga. Conforme se observa nessa figura, para cada mudança de rotação o rendimento da bomba permanece constante.

Figura 3.16 Efeito da variação de velocidade em bombas centrífugas.
Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

b) Com variação do diâmetro do rotor

A troca de rotores com a diminuição dos seus diâmetros, também segue as leis de semelhança, conforme apresentado a seguir:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_{R1}}{D_{R2}} \quad (6)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_{R1}}{D_{R2}} \right)^2 \quad (7)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_{R1}}{D_{R2}} \right)^3 \quad (8)$$

onde: Q_1 e Q_2 = vazão relativa aos diâmetros do rotor;

D_{R1} e D_{R2} = diâmetros do rotor inicial e final;

H_1 e H_2 = altura manométrica total relativa aos diâmetros do rotor;

P_1 e P_2 = potência consumida da bomba relativa aos diâmetros do rotor.

Segundo a EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) o rendimento das bombas varia com a alteração do diâmetro do rotor usando a mesma carcaça da bomba. As mudanças no diâmetro dos rotores geralmente se limitam a uma redução máxima de até 75% do diâmetro original, correspondendo a uma redução aproximada de 50% da altura manométrica total. A Figura 3.17 apresenta o efeito de variação dos diâmetros dos rotores no desempenho de uma bomba centrífuga.

Figura 3.17 Efeito da variação de velocidade em bombas centrífugas em função da troca de diâmetro do rotor.

Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

- **Cavitação**

Para TSUTIYA (2004), cavitação constitui um fenômeno universal em hidráulica, que pode ocorrer tanto em estruturas fixas (válvulas, orifícios, bocais, etc.), como em máquinas hidráulicas (bombas e turbinas). O perigo potencial da cavitação ocorre quando as bombas operam com altas velocidades de rotação e capacidade superior àquela relativa ao seu ponto ótimo de funcionamento.

Quando a pressão absoluta, à entrada do rotor, é menor que a pressão do vapor do líquido em bombeamento, tem-se a formação de bolhas de vapor e essas bolhas, ao entrarem em uma zona de maior pressão, implodem abruptamente ocasionando espaços vazios dentro do líquido. Isto ocasiona o aparecimento de microjatos de água com grande quantidade de energia que vão ocupar esses espaços. Se os vazios estiverem muito próximos às paredes do rotor, os microjatos de água chocam-se violentamente com essas paredes, causando danos ao rotor (TSUTIYA, 1989).

Para verificar ou não a ocorrência da cavitação, determina-se o $NPSH_d$ (disponível) no sistema e o $NPSH_r$ (requerido) pela bomba. PORTO (2004) define que o $NPSH_d$ (disponível) é a energia que o líquido possui em um ponto imediatamente antes do flange de sucção da bomba, acima de sua pressão de vapor e o $NPSH_r$ (requerido) é a energia requerida pelo líquido para chegar a partir do flange de sucção e vencendo as perdas de carga dentro da bomba, ao ponto onde ganhará energia e será recalcado.

O $NPSH_d$ pode ser determinado pela equação (9):

$$NPSH_d = H_{g,s} - \sum \Delta H_s + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vapor}}{\gamma} \quad (9)$$

onde : $NPSH_d$ = carga de sucção positiva disponível, m;

$H_{g,s}$ = altura estática de sucção: positiva quando a bomba está afogada e negativa em caso contrário, m;

$\sum \Delta H_s$ = somatória de todas as perdas de carga até o flange de sucção, m;

P_{atm} = pressão atmosférica, N/m^2 ;

P_{vapor} = pressão de vapor de água, N/m^2 ;

γ = peso específico da água, N/m^3 .

As leis de semelhança também podem ser aplicadas ao $NPSH_r$ da bomba, cujas relações são apresentadas nas equações (10) e (11).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (10)$$

$$\frac{NPSH_{r_1}}{NPSH_{r_2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (11)$$

onde N_1 e N_2 = velocidade de rotação da bomba;

Q_1 e Q_2 = vazão relativa a rotação da bomba;

$NPSH_{r_1}$ e $NPSH_{r_2}$ = energia requerida pela bomba.

Para PORTO (2004), com um mesmo diâmetro, comprimento e rugosidade do material da instalação, o $NPSH_d$ (disponível) é uma função decrescente com a vazão, enquanto que, o $NPSH_r$ (requerido) pela bomba é uma função crescente com a vazão.

TSUTIYA (2004) recomenda uma folga entre o $NPSH_r$ e o $NPSH_d$ de 0,50 m ou uma diferença de 20% entre os dois. SANKS (1998) conclui que, para eliminar inteiramente a possibilidade da cavitação, o $NPSH_d$ deve ser duas a cinco vezes superior ao $NPSH_r$.

Como o $NPSH_r$ depende de elementos do projeto da bomba e de sua vazão, pode-se deparar com situações em que se desconhece esses valores. Para essa situação, TSUTIYA (2004) recomenda o cálculo do coeficiente de cavitação ou coeficiente de Thoma (σ) definida equação (12).

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H} \quad (12)$$

onde (H) é a altura manométrica total do sistema. O valor de (σ) depende principalmente da rotação específica da bomba (N_q). Na Figura 3.18 pode-se efetuar a verificação no gráfico de Thoma (σ) em função da rotação específica (N_q).

Figura 3.18 Gráfico para estudo da cavitação com NPSHr desconhecido
Fonte: TSUTIYA 2004

• Seleção de bombas

Em projetos de abastecimento urbano geralmente a demanda prevista cresce ao longo do tempo e a vazão no final do projeto será a sua vazão máxima. Nesses casos, para PORTO (2004), é antieconômico dimensionar bombas centrífugas para a situação de vazão máxima, devendo recorrer à associação de duas ou mais bombas em série ou em paralelo. TSUTIYA (2004) recomenda utilizar períodos de projetos de 20 anos e estabelecer as etapas de implantação das bombas centrífugas previstas nos projetos.

Para a seleção dos conjuntos motor-bomba é necessária a análise das curvas do sistema elevatório, o tipo de operação do sistema de bombeamento e as bombas disponíveis no mercado. Os tipos de operação considerados em relação às etapas de implantação podem ser com uma única bomba, com bombas em série ou com bombas em paralelo.

a) operação com uma única bomba

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

Para TSUTIYA (2004), com as possíveis variações de nível dos poços de sucção e, em alguns casos, da variação das perdas de carga ao longo do tempo por envelhecimento da tubulação, a análise do sistema elevatório para uma única bomba, deve ser feita com famílias de curvas que levem em conta esses fatores.

b) operação com duas ou mais bombas em paralelo

Em elevatórias, geralmente tem-se duas bombas ou mais bombas operando individualmente ou em paralelo, enviando o líquido bombeado através de uma única tubulação de recalque.

Na associação em paralelo de duas bombas iguais, cada bomba será responsável por uma parcela da vazão total recalçada conforme mostra a Figura 3.19.

Figura 3.19 Associação de bombas iguais em paralelo.
Fonte: Adaptado de MACINTYRE (1987).

O ponto de intersecção da curva $H \times Q$ das bombas com a curva $H \times Q$ do sistema elevatório, definem os pontos de operação das bombas, estabelecendo as vazões e as alturas manométricas de recalque.

A escolha das bombas deve então ser feita pesquisando nas curvas características das bombas disponíveis, aquela bomba que eleva a parcela de vazão total a ser recalçada à altura manométrica do sistema elevatório, correspondente a vazão total de projeto, operando próximo de seu ponto de melhor rendimento.

Considerando que em um sistema com várias bombas em paralelo, suas condições de operação podem variar sensivelmente em função do número de bombas em operação simultânea, fazendo com que o ponto de operação de cada uma delas se afaste de seu ponto de melhor rendimento, TSUTIYA (2004) recomenda que, o projeto do sistema deve ser feito de tal modo 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.

c) operação com duas ou mais bombas em série

Para TSUTIYA (2004), a associação de duas ou mais bombas centrífugas em série, pode ser instalada em uma única estação elevatória ou em pontos escolhidos ao longo da linha de recalque.

Nessa associação, cada uma das bombas centrífugas será responsável por uma parcela da altura manométrica total para uma mesma vazão total de recalque. A Figura 3.20 apresenta a associação de bombas em série, onde a altura manométrica total (H) é a somatória das alturas parciais (H_A) e (H_B) das bombas A e B para a mesma vazão (Q_P).

Figura 3.20 Associação de bombas centrífugas em série.
Fonte: MACINTYRE (1987).

3.2.3 Motores elétricos

• Classificação de motores elétricos

Os motores elétricos são máquinas destinadas a transformar energia elétrica em energia mecânica. Os tipos mais comuns são os motores de corrente contínua e os de corrente alternada. A Figura 3.21 apresenta a classificação de motores segundo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

Figura 3.21 Classificação de motores elétricos.
Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

Os motores de corrente contínua são utilizados em aplicações que exigem ajuste fino e controle preciso de velocidade. Para seu funcionamento utilizam uma fonte de corrente contínua, ou um dispositivo que converta a corrente alternada comum em

corrente contínua. Devido ao seu alto custo sua aplicação é restrita a casos especiais e raramente utilizados em estações elevatórias de água.

Os motores de corrente alternada são mais comuns em função da distribuição de energia ser realizada em corrente alternada. No saneamento são os mais empregados e são divididos em dois tipos: os de indução ou assíncronos e os síncronos.

Para WEG (2006), os motores síncronos funcionam com velocidade fixa e são utilizados somente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos menores) ou quando se necessita de velocidade invariável. Já os motores de indução ou assíncronos funcionam com velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. Atualmente é possível controlar a velocidade dos motores de indução assíncronos com o auxílio de inversores de frequência.

Os motores assíncronos ou de indução são os mais usados, porque combinam as vantagens da utilização de energia elétrica com baixo custo, a facilidade de transporte, a limpeza e simplicidade de comando por sua construção simples, o seu custo reduzido, e sua grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (WEG, 2006).

Os motores de indução trifásicos podem ser de rotor em gaiola ou de rotor bobinado. Como os inversores de frequência são utilizados em motores de indução trifásico com rotor em gaiola, esse motor será apresentado com maiores detalhes a seguir.

• **Motor de indução com rotor em gaiola**

O motor de indução trifásico (Figura 3.22) é composto fundamentalmente de duas partes: estator e rotor. O que caracteriza o motor de indução é que só o estator é ligado à rede de alimentação. O rotor não é alimentado externamente e as correntes que circulam nele, são induzidas eletromagneticamente pelo estator, razão pela qual é denominado motor de indução.

Figura 3.22 Detalhes de um motor de indução trifásico.
Fonte: WEG (2006).

Segundo a WEG (2006), os motores de indução de gaiola ou de anel, de baixa e média tensão, encontram vasto campo de aplicação, notadamente nos setores de siderúrgica, mineração, papel e celulose, saneamento, químico e petroquímico, e de cimento. São os mais empregados em qualquer aplicação industrial, devido à sua construção robusta e simples, além de ser a solução mais econômica, tanto em termos de motores como de comando e proteção.

Atualmente, o uso desse tipo de motor com controle de rotação é bastante comum, sendo utilizado o inversor de frequência para a variação da rotação. Uma das vantagens da utilização do inversor é que mesmo em sistemas em operação, não há necessidade de troca de motor para sua instalação (TSUTIYA, 2004).

• ***Variação de rotação de motores de indução***

PUCCINELLI (1968) definiu que os motores síncronos são assim denominados porque sua velocidade está em sincronismo com a frequência da rede de alimentação, dependendo unicamente dessa frequência e do número de pólos e independendo da carga que deva vencer.

A rotação síncrona é obtida pela equação (13):

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \quad (13)$$

onde : N_s = rotação síncrona, rpm;

f = frequência, Hz;

p = número de pólos.

Segundo LOBOSCO e DIAS (1988) apud TSUTIYA(2004), em geral os motores síncronos são interessantes para potências acima de 300 cv e são quase exclusivos em potências superiores a 15.000 cv.

Segundo TSUTIYA (2004), os motores de indução apresentam velocidade de rotação com valores de 2% a 5% menores do que a rotação dos motores síncronos. A diferença entre a velocidade do motor (N_r) e a velocidade síncrona (N_s), chama-se escorregamento (s), que pode ser expresso em rpm, ou como fração da velocidade síncrona, ou como porcentagem desta. A equação (14) apresenta o escorregamento em porcentagem da rotação síncrona.

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (14)$$

onde : N_s = rotação síncrona, rpm;

N_r = rotação do motor, rpm;

s = escorregamento, % da rotação síncrona.

A equação (15) apresenta a relação entre rotação, frequência, número de pólos e escorregamento.

$$N_r = \frac{120f(1-s)}{p} = N_s(1-s) \quad (15)$$

WEG (2006) define que o motor de indução tem conjugado ou torque igual a zero à velocidade síncrona e à medida que a carga vai aumentando, a rotação do motor vai caindo gradativamente, até um ponto em que o conjugado atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação normal. Se o conjugado da carga aumentar mais, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o

rotor. A Figura 3.23 apresenta a variação do conjugado com a velocidade para um motor normal.

Figura 3.23 Gráfico de variação de conjugado em função da rotação.
Fonte: WEG (2006).

• Potência de motores elétricos

TSUTIYA (2004) recomenda considerar quatro aspectos da potência de um motor elétrico: a puramente mecânica, a nominal, a absorvida da rede elétrica e a admissível. A potência puramente mecânica de um motor elétrico será sempre a potência mecânica no seu eixo porque depende de seu torque e da rotação correspondente. A potência nominal será a potência mecânica que pode ser fornecida continuamente sob condições de tensão e frequência nominais. A potência admissível é aquela que se pode solicitar continuamente do motor sem prejudicar seu isolamento por aumento da temperatura de operação. A potência absorvida da

rede é diferente da potência nominal e é função do rendimento do motor conforme equação (16):

$$P_e = \frac{P_m}{\eta_m} \quad (16)$$

sendo: P_e = potência elétrica absorvida da rede, W;

P_m = potência mecânica fornecida pelo motor no eixo, W;

η_m = rendimento do motor.

3.3 Inversores de frequência

No início da década de 70, os sistemas de variação de velocidade tradicionais eram os variadores mecânicos, os variadores hidráulicos e os variadores eletromagnéticos. Os variadores mecânicos utilizavam além dos motores de indução, outros dispositivos para efetivar a redução da velocidade, tais como, polias, correias ou correntes. Os variadores hidráulicos do tipo hidrocínético operavam através de acoplamentos hidráulicos. Os variadores eletromagnéticos mudaram os conceitos da variação exclusivamente mecânica utilizando um sistema de discos acoplados a bobinas que podiam ter seu campo magnético variável, e assim, variando-se o torque, variava-se também a velocidade na saída do variador (WEG, 2002).

O inversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação dos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação da sua rotação ou velocidade (TSUTIYA, 2004).

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se variar a tensão proporcionalmente com a variação da frequência mantendo desta forma o fluxo constante. A variação da tensão e da frequência é feita linearmente até a frequência base (nominal) do motor. Acima desta, a tensão que já é a nominal permanece constante e há então apenas a variação da frequência que é aplicada ao enrolamento do estator (WEG, 2006).

A WEG (2006) descreve o esquema de funcionamento de um inversor e de seus componentes principais conforme representado no esquema elétrico da Figura 3.24, sendo:

- I - Circuito Retificador (ponte retificadora a diodos);
- II - Circuito Intermediário (filtro capacitivo);
- III - Circuito Inversor (chave eletrônica, neste caso formada por transistores).

Figura 3.24 Esquema elétrico dos componentes de um inversor de frequência.
Fonte: WEG (2006).

O circuito retificador (I) transforma a tensão alternada de entrada (R, S, T) em tensão contínua que é filtrada no circuito intermediário (II). Esta tensão contínua alimenta o circuito inversor (III). Através de tiristores ou transistores, o circuito inversor fornece um sistema de corrente alternada (U, V, W) de frequência e tensão variáveis. Deste modo, um motor de indução trifásico acoplado pode ser operado com variação de velocidade. Na Figura 3.25 estão detalhados os seus principais componentes.

Figura 3.25 Principais componentes de um inversor de frequência.
Fonte: WEG (2006).

O uso de motores elétricos de indução alimentados por inversores de frequência para acionamentos de bomba tem crescido significativamente nos últimos anos em virtude das vantagens inerentes proporcionadas por esta aplicação, tais como, a facilidade de controle, a economia de energia, a redução no preço dos inversores e pelo desenvolvimento de componentes eletrônicos cada vez mais baratos.

As características construtivas de um motor de indução alimentado por uma rede senoidal são determinadas em função das características desta rede, das características da aplicação e das características do ambiente do local da instalação. No entanto, quando alimentado por inversor de frequência, também as

características próprias do inversor exercem significativa influência sobre o comportamento do motor, determinando-lhe novas características construtivas ou de operação.

A influência sobre as características construtivas do motor alimentado por inversor de frequência está relacionada com o tipo de aplicação, mais especificamente com a faixa de velocidade no qual o motor irá trabalhar. Portanto, existem diferenças na maneira de especificar um motor de indução sem variação de velocidade alimentado por uma rede senoidal e um motor com variação de velocidade alimentado por inversor de frequência.

TSUTIYA (2004) ressalta os cuidados que devem ser tomados com a escolha do motor que irá trabalhar com inversor de frequência. O inversor deverá ter sempre a sua corrente nominal igual ou maior que a corrente nominal do motor porque um mesmo inversor poderá ter várias correntes nominais diferentes em função do tipo de carga e da frequência de chaveamento.

WEG (2002) define que normalmente existem dois tipos de carga: torque constante e torque variável. A carga tipo torque constante é aquela onde o torque permanece constante ao longo de toda a faixa de variação de velocidade (Figura 3.26), como por exemplo, correias transportadoras, extrusoras, bombas de deslocamento positivo, elevação e translação de cargas. A carga tipo torque variável é aquela onde o torque aumenta com o aumento da velocidade (Figura 3.27), como é o caso de bombas e ventiladores centrífugos.

Figura 3.26 Curva de torque constante.
Fonte: WEG (2002).

Figura 3.27 Curva de torque variável.
Fonte: WEG (2002).

Segundo a WEG (2006), os inversores especificados para cargas com torque variável não necessitam de uma grande capacidade de sobrecarga (10% a 15% é suficiente) e por isso, a sua corrente nominal pode ser maior. Os mesmos inversores, se aplicados em uma carga com torque constante, necessitam de uma capacidade de sobrecarga maior (normalmente 50%) e, portanto, a sua corrente nominal será menor.

A frequência de chaveamento influi na corrente nominal do inversor, pois quanto maior a frequência de chaveamento do inversor, mais a corrente se aproxima de uma senóide perfeita e, por isso, o ruído acústico de origem magnética gerado pelo motor é menor. Por outro lado, as perdas no inversor são maiores devido ao aumento na frequência de operação dos transistores (perdas devido ao chaveamento). Normalmente, a corrente nominal é especificada para uma temperatura máxima de 40°C e uma altitude máxima de 1000 m. Acima destes valores deve-se aplicar um fator de redução na corrente nominal (WEG, 2006).

A tensão nominal do inversor é a mesma do motor e para uma alimentação trifásica deve-se cuidar para que o desbalanceamento entre fases não seja maior do que 2%, uma vez que um desbalanceamento maior pode provocar um grande desbalanceamento de corrente na entrada, danificando os diodos de entrada.

Para a WEG (2006), a questão das harmônicas na maioria dos casos é possível de se resolver atendendo à norma IEEE STD 519/92, desde que se coloque na entrada do inversor uma reatância de rede dimensionada para uma queda de tensão de 4%

em relação à tensão fase-neutro, com corrente nominal, e desde que a potência total dos inversores instalados não ultrapasse a 20% da potência total da instalação.

3.3.1 Tipos de equipamentos de velocidade variável

• Classificação

A Figura 3.28 apresenta os tipos de acionadores de velocidade de rotação variável.

Figura 3.28 Classificação de acionadores de velocidade de rotação variável.
 Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

Os inversores de frequência podem ser aplicados tanto em motores de corrente contínua como em motores de corrente alternada. Neste trabalho são detalhados os

inversores de frequência utilizados em motores de corrente alternada do tipo indução assíncrono com rotor de gaiola, pois compreendem a quase totalidade dos motores empregados em elevatórias de água e esgoto.

• ***Funcionamento de inversores de frequência***

De acordo com MATHEUS (2006), a grande maioria dos inversores de frequência usados pela indústria para controlar a velocidade de motores elétricos trifásicos de corrente alternada são desenvolvidos de acordo com dois princípios:

- a) sem um circuito intermediário conhecidos com conversores diretos e;
- b) com um circuito intermediário variável ou fixo.

Para MATHEUS (2006), os circuitos intermediários podem ser tanto em corrente contínua como em tensão contínua e são conhecidos como inversores com fonte de corrente ou inversores com fonte de tensão.

O inversor é o último componente do circuito intermediário antes da conexão ao motor. No circuito intermediário o inversor pode receber:

- corrente contínua variável;
- tensão contínua variável;
- tensão contínua constante.

Segundo MATHEUS (2006), em todos os casos o inversor assegura que a saída para o motor se torna variável. Em outras palavras, a frequência para o motor é

gerada no inversor. Se a corrente ou tensão são variáveis, o inversor gera apenas a frequência. Se a tensão é constante o inversor gera a tensão e a frequência.

MATHEUS (2006) descreve que, em inversores com circuitos intermediários de tensão constante ou variável, existem seis componentes chaveadores e independentemente do tipo de semicondutor utilizado. O circuito de controle chaveia os semicondutores utilizando técnicas de modulação, mudando dessa forma, a frequência de saída do inversor.

A primeira técnica de modulação trabalha com tensão ou corrente variável no circuito intermediário. Os intervalos em que os semicondutores individualmente são conduzidos são colocados numa seqüência que é usada para se obter as frequências de saída desejadas. Essa seqüência de chaveamento é controlada pela amplitude da tensão ou corrente do circuito intermediário. Utilizando-se um oscilador controlado por tensão, a frequência sempre obedece a amplitude da tensão. Esse tipo de inversor é chamado de PAM (Pulse Amplitude Modulation ou Modulação por Amplitude de Pulso).

A outra técnica usa um circuito intermediário de tensão constante. A tensão no motor é conseguida aplicando-se a tensão do circuito intermediário por períodos mais longos ou mais curtos.

A frequência é mudada através da variação dos pulsos de tensão ao longo do eixo do tempo, positivamente para meio período e, negativamente, para o outro meio período. Como a técnica muda a largura dos pulsos de tensão, é denominada de

PWM (Pulse Width Modulation ou Modulação por Largura de Pulso), sendo essa a técnica mais utilizada no controle dos inversores. A Figura 3.29 apresenta esquematicamente o sistema de modulação por pulso.

Figura 3.29 Sistema de modulação de tensão tipo PWM.
Fonte: WEG (2006).

WEG (2006) define que se pode dividir a forma de controle de um inversor em dois tipos: escalar e vetorial.

O controle escalar é aquele que impõe no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter essa relação tensão/frequência constante. A sua principal característica é a precisão da velocidade no motor em função do escorregamento, que varia em função da carga.

O controle vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle tanto do torque quanto da velocidade do motor. O nome vetorial advém do fato que para ser possível este controle, é feita uma de composição vetorial da corrente do motor nos vetores que representam o torque e o fluxo no motor, de forma a possibilitar a regulação independente do torque e do fluxo.

O controle vetorial pode ainda ser dividido em dois tipos: o normal e o sem sensor de velocidade. O controle vetorial normal necessita ter no motor um sensor de velocidade (por exemplo, um codificador incremental). Este tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive com o motor parado. No controle vetorial sem sensor de velocidade a precisão é quase tão boa quanto à do controle vetorial normal, mas com maiores limitações principalmente em baixíssimas rotações e velocidade zero.

Para motores de indução de rotor de gaiola há mais dois tipos de inversores, o de fonte de corrente CSI (Current Source Inverter) e o de Matriz. O inversor do tipo fonte de corrente CSI trabalha com o mesmo circuito do inversor de fonte de tensão PWM (Pulse Width Modulation) só que a modulação é feita a partir de uma fonte de corrente constante. Segundo a EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) esse inversor apresenta perdas maiores que o sistema PWM e não é muito utilizado.

Para a EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004), o inversor de matriz também produz a conversão direta de frequência constante ou tensão constante, para variar a frequência ou variar a tensão, só que em um único estágio sem o circuito intermediário com capacitor de armazenamento de potência. Trata-se de tecnologia

em desenvolvimento, entretanto, por princípio pode ser empregada onde já é utilizado o inversor PWM.

3.3.2 Uso de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água

Para MAYS (1999) a variação da velocidade em sistemas de bombeamento com utilização de inversores de frequência, pode ser empregada em todas as situações que se desejar modificar a operação dos equipamentos acionados por motores elétricos para controlar um sistema qualquer.

Em um sistema de abastecimento, quando o bombeamento de água é dirigido diretamente ao consumidor, torna-se necessário controlar a vazão em função da demanda. O objetivo do controle de vazão é manter a pressão constante ou em um valor preestabelecido (TSUTIYA, 1989).

Segundo ARIKAWA (2005) o controle de pressões dos sistemas de bombeamento, quando feito com aplicação de variadores de velocidade permite o aumento ou a diminuição gradual das vazões de bombeamento em função da variação de demanda.

Segundo WILLIAMS e KUBIK (1963) os variadores de velocidade são recomendados para sistemas em que a altura geométrica de recalque é menor que o somatório das perdas de carga ao longo da tubulação. Nos casos em que se tem altura geométrica elevada e pequena perda de carga, não se recomenda a utilização dos variadores de velocidade.

As Figuras 3.30, 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34, apresentam as possibilidades de emprego de inversores de frequência em elevatórias de água nas diversas situações de abastecimento.

Figura 3.30 Bombeamento direto para a rede de distribuição e reservatório a jusante.
Fonte: TSUTIYA (2001).

Figura 3.31 Bombeamento direto para a rede de distribuição e reservatório elevado a jusante.
Fonte: TSUTIYA (2001).

Figura 3.32 Bombeamento direto para a rede de distribuição localizada em área elevada.

Fonte: TSUTIYA (2001).

Figura 3.33 Bombeamento tipo booster.

Fonte: TSUTIYA (2001).

Figura 3.34 Bombeamento direto na rede de distribuição sem reservatórios de jusante.

Fonte: TSUTIYA (2001).

3.3.3 Métodos de controle de vazão

Para o controle de vazão podem ser utilizados os seguintes métodos:

- a) estrangulamento por válvula;
- b) by-pass na saída da bomba;
- c) variação de velocidade do motor com aplicação de inversor de frequência.

Para a EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) há outros métodos de controle de vazão, tais como, controle pelo número de bombas ou liga-desliga das bombas, entretanto, esses métodos são muito menos eficientes. O controle liga-desliga requer um volume de reservação disponível e o controle pelo número de bombas é eficiente quando tem a altura estática como uma grande parcela da altura manométrica total em associações em paralelo, ou altas perdas por atrito e baixa altura estática para associações em série.

• Estrangulamento por válvula

O controle por estrangulamento de válvula é um dos métodos mais utilizados, principalmente em bombas de pequeno porte. A válvula controla a vazão pela redução do diâmetro da tubulação, criando uma resistência adicional de modo a modificar a curva característica do sistema. Na Figura 3.35 mostra a redução da vazão (Q_1) para (Q_2) pelo aumento da altura manométrica provocado pelo estrangulamento da válvula.

Figura 3.35 Controle de vazão por estrangulamento de válvula.
Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

Para TSUTIYA (2001), teoricamente é possível reduzir a vazão da bomba até a vazão zero (condição de shut-off). Na prática, deve-se evitar que as bombas operem a baixas vazões, pois operações contínuas nessas condições ocasionam recirculação da água dentro da carcaça, provocando vibrações exageradas, cargas radiais e axiais excessivas nos mancais, aquecimento da carcaça e do motor. Uma boa regra prática é limitar a vazão mínima a valores não inferiores a 25 – 30% da vazão correspondente ao ponto de melhor rendimento na rotação máxima recomendada (TSUTIYA, 2001).

- **By-pass na saída da bomba**

O controle por by-pass é feito pela variação da abertura da válvula instalada no tubo de “by-pass” da bomba. Aumentando a abertura da válvula diminui-se a vazão da tubulação de recalque. A Figura 3.36 mostra a redução da vazão quando se abre a válvula do by-pass e a bomba passa a bombear uma vazão (Q_3) correspondente a

vazão de retorno pelo by-pass somada com a vazão de recalque. Nessas condições, imediatamente a vazão de recalque diminui para um valor (Q_2) fora da curva da bomba e fechando gradualmente a válvula, a vazão sofre um pequeno acréscimo para (Q_1) num ponto da curva da bomba.

Figura 3.36 Controle de vazão por by-pass na saída da bomba.
Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

- **Variação de velocidade do motor com aplicação de inversor de frequência**

No controle por utilização de inversor de frequência, a diminuição da velocidade de rotação faz com que a vazão de recalque (Q_1) diminua para um valor (Q_2) pelo simples deslocamento da curva da bomba sobre a curva do sistema, conforme apresentado na Figura 3.37.

Figura 3.37 Controle por variação de velocidade do motor com aplicação de inversor de frequência.

Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

Pode-se verificar na Figura 3.38 que os diversos tipos de controle produzem consumos de energia diferentes. As aplicações de processos de controle necessitam dimensionamento criterioso, pois os custos de instalação e de operação e manutenção do sistema escolhido é que definem a melhor alternativa a ser empregada.

Figura 3.38 Comparativo de redução de consumo de energia.
Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

A Figura 3.39 apresenta a variação do consumo de energia elétrica pelos diversos métodos de controle de vazão (EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE, 2001).

Figura 3.39 Variação do consumo de energia por vários métodos de controle de vazão. Fonte: EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2001).

TSUTIYA (2006) recomenda faixas de operação para bombas centrífugas variando de 70 a 120 % do rendimento ótimo das bombas e inversores de frequência com frequências de 30 a 60 Hz (Figura 3.40), de forma que os projetistas possam escolher os equipamentos com menor consumo de energia elétrica.

Figura 3.40 Gráfico de faixas de operação recomendadas para bombas e inversores de frequência.

Fonte: TSUTIYA (2006).

3.3.4 Redução de custos com aplicação de inversores de frequência

Segundo literatura pesquisada, a principal vantagem do uso de inversores de frequência em estações elevatórias de água é a economia de energia elétrica, entretanto, os primeiros relatos no Brasil, sobre o uso de inversores referem-se a estudos e aplicações feitas a partir do final de 1970 onde a redução do consumo de energia ainda não era o principal objetivo.

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

- ***Redução de custos pela economia de consumo de energia elétrica***

TSUTIYA, et al (2005), relataram o resultado da aplicação de um inversor de frequência, na estação pressurizadora denominada booster Toninhas, instalado no sistema de abastecimento de água da cidade de Ubatuba – SP operado pela Sabesp, com potência de 60 cv e onde a economia média de energia foi de 30%.

ALTMANN, et al (2005), relataram os resultados da aplicação de inversores de frequência em bombas submersas instaladas e estações pressurizadoras de rede (boosters) da cidade de Novo Hamburgo – RS operadas pela Companhia Municipal de Saneamento de Novo Hamburgo, onde obtiveram a partir de julho de 2004 uma economia mensal de energia de 62,3 %.

WEG (2006) avalia que a economia média de energia com uso de inversores em bombas centrífugas com a redução controlada da potência dos motores é de 20 a 50%.

A EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) relatou estudos de casos onde foram obtidas reduções de consumo de energia variando de 30 a 50% e um prazo médio de retorno de investimento de 12 meses.

CURTIS (2005) demonstrou a partir das leis de semelhança que uma redução de 10% nas velocidades de bombeamento com uso de inversores de frequência representa 27% de economia de energia.

3.4 Estudos de casos de aplicações de inversores de frequência

- *Elevatória do setor Santana da cidade de São Paulo*

BRAGHIROLI (2005), apresenta os resultados da redução de consumo de energia elétrica associados a redução de perdas de água no setor Santana, na cidade de São Paulo – SP.

Segundo BRAGHIROLI (2005), esse setor possuía uma vazão média de consumo da ordem de 700 L/s para abastecer 44.000 ligações de água e 320 km de redes de distribuição com uma estação elevatória contendo inicialmente dois conjuntos motor-bomba de 200 cv e três conjuntos motor-bomba de 100 cv, operando com quatro efetivos e um de reserva.

O setor Santana é composto de duas zonas de abastecimento denominadas zona alta e zona baixa. A zona baixa era abastecida de forma direta a partir do reservatório R1 de 16.000 m³ e a zona alta a partir da estação elevatória de Santana por bombeamento direto na rede com um reservatório elevado denominado Torre de 500 m³ operando como reservatório de sobras. A Figura 3.41 demonstra essa situação inicial.

Figura 3.41 Esquema operacional do setor Santana na situação inicial.
Fonte: BRAGHIROLI (2005).

As derivações que abastecem as zonas alta e baixa foram separadas e trocados os conjuntos motor-bomba existentes por quatro novos conjuntos motor-bomba de 100 cv. Em uma das novas bombas foi instalado um inversor de frequência. O sistema do setor Santana passou a operar com a elevatória Santana recebendo água diretamente da adutora Guarau-Moóca e abastecendo por bombeamento direto a rede da zona alta do setor. O reservatório elevado continuou a operar como reservatório de sobras, alterando a denominação para R1.

A zona baixa do setor Santana passou a ser abastecida de forma direta, com uma válvula borboleta controlando a pressão e o reservatório R1 agora denominado R2 passando a operar como reservatório de sobras. A Figura 3.42 apresenta a situação final.

Figura 3.42 Esquema operacional do setor Santana na situação final.
Fonte: BRAGHIROLI (2005).

Segundo BRAGHIROLI (2005), além da redução de 33% das perdas de água de água por ligação, passando de 853 L/ligação x dia para 570 L/ligação x dia, houve também economia de 45% de energia elétrica, com redução no consumo mensal de energia de 236 MWh para 107 MWh. Em valores financeiros, o custo mensal de energia diminuiu 48% com a redução no valor da conta mensal de R\$ 56.600,00/mês para R\$ 28.600,00/mês.

- ***Elevatória da zona alta da cidade de Lins - SP***

CASSIANO FILHO e FREITAS (1989), apresentaram o caso da aplicação de um inversor de frequência na estação elevatória da zona alta da cidade de Lins – SP. A estação elevatória com dois conjuntos motor-bomba de 20 cv e 1800 rpm, operavam alternadamente das 06:00 as 24:00 horas por timer. Em um dos conjuntos motor-bomba foi aplicado um inversor de frequência da marca TOSHIBA, tipo Tosvert,

passando a variar a velocidade de rotação da bomba em função da pressão tomada no barrilete de recalque. O sistema foi idealizado para variar a pressão e a vazão conforme a demanda da zona alta.

Segundo CASSIANO FILHO e FREITAS (1989), foram pesquisados os resultados das curvas de pressão do bombeamento com rotação constante no período das 06:00 às 24:00 horas e com rotação variável por período contínuo de 24 horas, que são apresentados em gráficos de 24 horas nas Figuras 3.43 e 3.44.

Figura 3.43 Gráfico de pressões com rotação constante.
Fonte: CASSIANO FILHO e FREITAS (1989).

Figura 3.44 Gráfico de pressões com rotação variável.
Fonte: CASSIANO FILHO e FREITAS (1989).

Para CASSIANO FILHO e FREITAS (1989), as principais conclusões da pesquisa foram:

- Redução de consumo de energia elétrica em 38%, com o uso do inversor de frequência;
- Redução de demanda de energia em 12%;
- Melhoria do fator de potência, de 0,85 para 0,98, dispensando bancos estáticos de capacitores, observando-se, entretanto que, o inversor de frequência utilizado continha o corretor de fator de potência;
- Eliminação do pico de corrente na partida e conseqüentemente a eliminação da queda de tensão;

- Redução de perdas de água na rede de distribuição devido a diminuição da pressão;
- Retorno de custo da instalação do variador de rotação em dois anos e meio.

CASSIANO FILHO e FREITAS (1989), apresentam na Tabela 3.1 a comparação dos principais parâmetros para o cálculo do custo de energia elétrica, considerando o conjunto motor-bomba de rotação constante e rotação variável.

Tabela 3.1 – Comparação entre conjunto motor-bomba de rotação constante e rotação variável.

Fonte: CASSIANO FILHO e FREITAS (1989).

Descrição		Rotação constante	Rotação variável
Pressão de recalque (mH ₂ O)	mínima	15	19
	máxima	33	21
Frequência do motor (Hz)	mínima	60	38
	máxima	60	53
Corrente no motor (A)	mínima	29	10
	máxima	31	24
Fator de potência		0,85	0,98
Potência (kW)	mínima	15	5
	média	15,3	7,1
	máxima	16	14
Tempo médio diário (h)		18:00	24:00
Consumo médio mensal de energia ativa (kWh)		8.262	5.148

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Sistema de abastecimento de água de São José dos Campos

O município de São José dos Campos com população estimada para 2006 de 571.165 habitantes é operado pela Sabesp. Conforme os resultados de estudos feitos pela Sabesp, a demanda máxima total do sistema do município em final de plano é de 2.300 L/s, sendo 1.900 L/s provenientes de manancial superficial e os restantes 400 L/s de manancial subterrâneo.

A vazão média atualmente produzida no sistema de abastecimento de água de São José dos Campos é de 1.800 L/s. Os principais dados operacionais desse sistema são apresentados a seguir:

- Índice de atendimento: 100%;
- Índice de perdas por ramal de água: 424 L/ ramal x dia;
- Pressão média do sistema de abastecimento: 45 mca;
- Consumo total médio mensal de energia elétrica: 3.500.000 kWh;
- Número de ligações ativas: 150.216 ligações.

O sistema de abastecimento de água de São José dos Campos apresentado no Anexo A, é constituído de cinco subsistemas independentes;

- Paraíba;
- Eugênio de Melo;
- Buquirinha;

- Costinha; e
- São Francisco Xavier.

4.1.1 Subsistema Paraíba

O subsistema Paraíba é a principal fonte de abastecimento água de São José dos Campos, com uma produção média de 1.800 L/s, dos quais 1.400 L/s são captados no rio Paraíba do Sul e 400 L/s são retirados do aquífero subterrâneo, da bacia sedimentar da Formação Taubaté, através de 61 poços tubulares profundos. A contribuição total do subsistema Paraíba corresponde a 95% da produção total do sistema da cidade.

Os mananciais possuem as seguintes características:

- Manancial superficial: rio Paraíba do Sul, com vazão mínima regularizada de 40 m³/s em regime controlado pela barragem de Santa Branca. A captação é feita em um canal, localizado na margem direita, com extensão aproximada de 500 m, que atua como desarenador. O canal de água e a estação elevatória de água bruta são mostrados na Figura 4.1.
- Manancial subterrâneo: aquífero subterrâneo com boa potencialidade hídrica, explorado através de 61 poços tubulares profundos, cuja instalação típica é apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.1 Vista geral da estação elevatória de água bruta de São José dos Campos.

Figura 4.2 Vista geral do poço, cavalete e quadro de comando do Poço P-104.

Para o recalque de água bruta da captação superficial para a estação de tratamento de água, existem três adutoras, com caminhamentos paralelos, com 3,0 km e diâmetros variando de Ø 600 mm a Ø 900 mm em ferro fundido dúctil.

A estação de tratamento de água denominada ETA II (Figura 4.3) atualmente tratando 1400 L/s tem capacidade nominal para tratar uma vazão máxima de 1900 L/s. É uma estação do tipo convencional com tratamento completo, com as seguintes unidades:

- câmara de chegada de água bruta;
- floculação: três unidades de floculação, com floculadores mecanizados;
- decantação: três decantadores, sendo dois convencionais e um laminar;
- filtração: 11 filtros, operando a taxa declinante;
- casa de química: para preparo e aplicação de cal virgem, sulfato de alumínio, polieletrólito, gás cloro e flúor.

Figura 4.3 Vista geral dos floculadores e decantadores da ETA II.

A água tratada é conduzida por gravidade a quatro reservatórios enterrados (RES 01, RES 02, RES 03 e RES 04), com capacidade total de 17.800 m^3 , e desses reservatórios a água é distribuída para todo o sistema através de estações elevatórias. Para a reservação de água tratada existem mais 59 reservatórios que armazenam um total de 60.630 m^3 , cujos principais tipos de reservatórios (semi-enterrados, apoiados e elevados) são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5.

Figura 4.4 Vista geral do reservatório semi-enterrado R34.

Figura 4.5 Vista geral dos reservatórios T25 – elevado e R33 - apoiado

As sub-adutoras e a rede de distribuição do subsistema Paraíba tem uma extensão total de 1.037.542 m. O recalque entre os reservatórios e para rede de distribuição é feito por 61 estações elevatórias, sendo:

- 11 elevatórias de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo horizontal alimentando um reservatório (ETH);
- oito elevatórias de água tratada, conjuntos motor-bomba de eixo vertical, alimentando um reservatório (ETV);
- 13 elevatórias (pressurizadora) de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo horizontal, alimentando rede e reservatório (EPH);
- 29 elevatórias (pressurizadora) de água tratada, conjunto motor-bomba de eixo vertical, alimentando rede e reservatório (EPV).

A Figura 4.6 apresenta uma estação pressurizadora tipo booster ou EPV, como são denominadas pela Sabesp de São José dos Campos e que correspondem a 48% das elevatórias existentes.

Figura 4.6 Vista geral da estação pressurizadora - Booster – EPV / Hawai.

Todas as elevatórias existentes e sua localização estão apresentadas no ANEXO A – Esquema hidráulico do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos.

4.1.2 Subsistema Eugênio de Melo

O subsistema Eugênio de Melo atende ao distrito de Eugênio de Melo e aos bairros do Galo Branco e Jardim das Flôres, localizados na região leste da cidade. O subsistema utiliza água do manancial subterrâneo através de cinco poços tubulares profundos e contribui com a 2,5 % da produção total do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos. Sua rede distribuição tem uma extensão total de 29.232 m. Conta com três reservatórios apoiados totalizando 1.140 m³ de reserva de água que são distribuídos com auxílio de três estações elevatórias.

4.1.3 Subsistema Buquirinha

O subsistema Buquirinha localizado na região norte da cidade, abastece os bairros de Buquirinha e Freitas, contribuindo com 0,60 % da produção total do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos. Utiliza o rio Buquira como manancial, do qual é captada uma vazão da ordem de 12 L/s. Possui uma estação de tratamento de água do tipo convencional, constituída de floculação e decantação seguida de filtração sobre pressão, com capacidade nominal 8 L/s. Sua rede de distribuição tem uma extensão total de 8.028 m e possui dois reservatórios apoiados totalizando 215 m³ de reserva que são distribuídos com auxílio de sete estações elevatórias.

4.1.4 Subsistema Costinha

O subsistema Costinha atende ao bairro do Costinha localizado na região leste da cidade, e utiliza água do manancial subterrâneo. Esse subsistema contribui com 0,13% da produção total do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos. Existe apenas um poço tubular de vazão 8,5 L/s com operação média de 8,4 h/dia. Sua rede de distribuição tem uma extensão total de 1.200 m e abastece o bairro a partir de um reservatório apoiado com 200 m³.

4.1.5 Subsistema São Francisco Xavier

O subsistema São Francisco Xavier está localizado distante cerca de 40 km da sede do município, possuindo sistema de abastecimento formado por manancial de serra, denominado rio das Couves. A água é captada e tratada através de filtração, desinfecção final com cloração seguida de fluoretação. Na saída do filtro existe uma estação elevatória de água tratada recalando água para a rede de distribuição. A sobra é encaminhada para um reservatório de fibra de 100 m³, que funciona como pulmão. O reservatório estando cheio, passa a abastecer por gravidade a rede de distribuição, que possui uma extensão total de 6.998 m.

4.2 Área de pesquisa

4.2.1 Característica da área

A condição fundamental para a escolha da área de pesquisa é que os subsistemas deveriam ter sua operação controlada de modo a permitir a obtenção de dados de

campo através de informações armazenadas no Centro de Controle Operacional de São José dos Campos, com um período mínimo 180 dias para obter dados com efeitos de sazonalidade.

Considerando essa premissa, conclui-se que, apenas os subsistemas Paraíba e Eugênio de Melo possuem instalações com estações elevatórias automatizadas, com dados armazenados no Centro de Controle Operacional por um período de 180 dias.

No subsistema Paraíba foram avaliadas as seguintes instalações: estação elevatória de água tratada do R3/R4 – área do centro da cidade; elevatórias de água tratada do R49/R65 – área do Jardim Morumbi; estação pressurizadora de água tratada do R61 – área do bairro Altos do Santana; estação pressurizadora de água tratada do R73 – área da Vila Tatetuba e a estação pressurizadora de água tratada do R83 – área do Jardim Guimarães.

No subsistema Eugênio de Melo foram avaliadas as instalações da estação elevatória de água tratada do R26 – área do distrito de Eugênio de Melo e da estação pressurizadora de água tratada do R82 – área do bairro do Galo Branco.

Considerando as características dos subsistemas e a qualidade dos dados obtidos, foram selecionadas para este trabalho as estações elevatórias e pressurizadoras instaladas nas áreas do sistema R49/65 – Jardim Morumbi pertencente ao subsistema Paraíba e a área do sistema R82 – Galo Branco pertencente ao subsistema Eugênio de Melo.

4.2.2 Subsistema Eugênio de Melo

O primeiro sistema de bombeamento a ser estudado foi do bairro Galo Branco, pertencente ao subsistema Eugênio de Melo, apresentado na Figura 4.7. Esse sistema possui uma estação pressurizadora com conjunto motor-bomba de eixo vertical, mais conhecida como tubulão ou elevatória tipo “Q”.

Figura 4.7 Esquema geral do sistema Galo Branco dentro do subsistema Eugênio de Melo.
Fonte: Sabesp (2006).

O tubulão está instalado na área do reservatório apoiado R82 que possui capacidade de 700 m³. (Figura 4.8). Na estação pressurizadora está instalado um conjunto motor-bomba submerso, marca HAUPT, modelo Q82-2 de 35 cv, 60 Hz em

tensão 220 V e 3450 rpm, para uma faixa de vazões de 92 a 182 m³/h e alturas manométricas de 37 a 53 mca.

Figura 4.8 Vista geral do sistema Galo Branco com a estação pressurizadora tipo Q e o reservatório apoiado R82.

O conjunto motor-bomba opera recalcando diretamente na rede de distribuição e as pressões são mantidas entre os valores máximo de 35 mca e mínimo de 10 mca , pelo controle da rotação do motor através de um inversor de frequência TOSHIBA, modelo TOSVER A7 de 220 V. A Figura 4.9 apresenta o painel de comando do inversor de frequência do sistema Galo Branco.

Figura 4.9 Vista do painel de comando do inversor de frequência do sistema Galo Branco.

4.2.3 Subsistema Paraíba

No sistema R49/65 – Jardim Morumbi pertencente ao subsistema Paraíba encontram-se em operação cinco estações elevatórias de água tratada. São três estações pressurizadoras com conjunto motor-bomba de eixo vertical, uma estação pressurizadora de conjunto motor-bomba de eixo horizontal e uma estação elevatória de água tratada de conjunto motor-bomba de eixo horizontal.

Das cinco estações de bombeamento, três estão equipadas com inversores de frequência para controle de pressões na rede de distribuição de água. Essas três são: a estação pressurizadora de conjunto motor-bomba horizontal dos conjuntos habitacionais D. Pedro I e D. Pedro II, e as estações pressurizadoras com conjunto

motor-bomba de eixo vertical do Jardim Morumbi e Campo dos Alemães. A Figura 4.10 apresenta o esquema do sistema R49/65 – Morumbi.

Figura 4.10 Esquema geral do sistema R49/65 do Jardim Morumbi.
Fonte: Sabesp (2006).

As estações de bombeamento do sistema Morumbi estão instaladas numa única área operacional e junto dos reservatórios apoiados R49 e R65, ambos com capacidade de 1.500 m^3 .

A primeira estação pressurizadora a ser estudada nesse sistema foi a de conjunto motor-bomba de eixo vertical, que abastece o Campo dos Alemães e apresentada na Figura 4.11. Nessa estação pressurizadora, está instalado um conjunto motor-bomba submerso marca EBARA, modelo BHS 1010-3 de 70 cv, 60 Hz em tensão 220 V e 3450 rpm, para uma faixa de vazões de 100 a $250 \text{ m}^3/\text{h}$ e alturas manométricas de 44 a 95 mca.

Figura 4.11 Vista geral da estação pressurizadora tipo Q do Campo dos Alemães.

O conjunto motor-bomba opera recalcando diretamente na rede de distribuição e as pressões são mantidas entre os valores máximo de 35 mca e mínimo de 10 mca pelo controle da rotação do motor através de um inversor de frequência marca ABB, modelo ACS - 600 de 220 V. A Figura 4.12 apresenta o painel de comando do inversor de frequência do sistema Campo dos Alemães.

Figura 4.12 Vista do painel de comando do inversor de frequência do sistema Campo dos Alemães.

A segunda estação a ser estudada foi a estação pressurizadora de conjunto motor-bomba de eixo vertical que abastece o Jardim Morumbi e apresentada na Figura 4.13. Nessa estação pressurizadora está instalado um conjunto motor-bomba submerso marca EBARA, modelo BHS 1015-1 de 40 cv, 60 Hz em tensão 220 V e 3450 rpm, para uma faixa de vazões de 160 a 280 m³/h e alturas manométricas de 22 a 34 mca.

Figura 4.13 Vista geral da estação pressurizadora tipo Q do Jd. Morumbi.

O conjunto motor-bomba opera recalcando diretamente na rede de distribuição e as pressões são mantidas entre os valores máximo de 35 mca e mínimo de 10 mca, pelo controle da rotação do motor através de um inversor de frequência, marca TELEMECANIQUE, modelo ALTIVAR 48 de 220 V. A Figura 4.14 apresenta o painel de comando do inversor de frequência do sistema Jardim Morumbi.

A terceira estação estudada foi a estação pressurizadora de conjunto motor-bomba de eixo horizontal, para os conjuntos habitacionais D. Pedro I e D. Pedro II,

apresentada na Figura 4.15. Nessa estação pressurizadora estão instalados dois conjuntos motor-bomba de eixo horizontal com motor WEG de 125 cv, 60 Hz, em tensão de 220 V e 1780 rpm, acoplado a uma bomba marca KSB modelo ANS 125-400 de 1750 rpm, e vazão de 280 m³/h para uma altura manométrica de 22 mca.

Figura 4.14 Vista do painel de comando do inversor de frequência do sistema Jd. Morumbi.

Figura 4.15 Vista geral da estação pressurizadora com conjunto motor-bomba horizontal do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.

Um conjunto motor-bomba opera continuamente com o outro de reserva, recalcando diretamente na rede de distribuição e as pressões são mantidas, entre os valores máximo de 35 mca e mínimo de 10 mca, pelo controle da rotação do motor através de um inversor de frequência, marca WEG, modelo CFW09 de 220 V. A Figura 4.16 apresenta o painel de comando do inversor de frequência do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.

Figura 4.16 Vista do painel de comando do inversor de frequência do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.

4.3. Coleta de dados

A operação do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos é totalmente gerenciada por um Centro de Controle Operacional, instalado no prédio da estação de tratamento de água (Figura 4.17). O sistema recebe informações da situação de parâmetros de funcionamento, do tipo ligado ou desligado e aberto ou fechado, dos valores de tensão, corrente, pressão e vazão medidos nos

equipamentos em operação e emite comandos de operação do tipo liga-desliga de bombas ou abre e fecha válvulas motorizadas.

Figura 4.17 Vista geral da mesa de controle operacional com operador, monitores dos microcomputadores e sistema de rádio comunicação.

O controle operacional é feito de forma esquemática como apresentado na Figura 4.18. Nos painéis de controle da operação das estações remotas, um controlador lógico programável (CLP) com modem incorporado de várias marcas (ATOS, ADAM ou KLOCKNER MOELLER) executa as tarefas de coletar, armazenar, processar, executar comandos e transmitir para o sistema supervisor as informações do sistema automatizado.

Os dados transmitidos pelos controladores lógicos programáveis com modem incorporado, trafegam através de linhas telefônicas exclusivas. Na chegada, modems de comunicação instalados em uma estante, recebem esses dados e enviam para as portas seriais existentes no computador servidor de controle da

operação, que possui um servidor de comunicação para organizar e armazenar a chegada dos dados para ser utilizado pelo programa supervisorio da operação.

Os dados chegam ao servidor de comunicação a cada 60 segundos e a sua qualidade é prejudicada sempre que ocorrem problemas nas linhas telefônicas pois nesse caso, os dados recebidos são armazenados com valores zerados e não existem rotinas de recuperação.

Figura 4.18. Esquema do sistema de supervisão ELIPSE E3.
Fonte: Sabesp (2006).

KAMEL (1990) descreveu problema semelhante na aquisição de dados do Sistema Adutor Metropolitano da Sabesp na cidade de São Paulo, e recomendou a criação de rotina de validação de dados através do programa de supervisão do Centro de Controle Operacional.

Para executar o controle de todo o sistema ligado ao Centro de Controle Operacional, a Sabesp licenciou e instalou em dezembro de 2004 um programa supervisorio chamado ELIPSE E3 (2004)®. Esse aplicativo, desenvolvido pela

empresa ELIPSE SOFTWARE, é um completo sistema de supervisão e controle de processos que opera em redes de computadores.

O programa Elipse E3 foi escolhido porque permite a comunicação com todos os tipos de equipamentos existentes no mercado, e pode atuar tanto com os sistemas locais como aqueles geograficamente distribuídos na cidade de São José dos Campos.

O aplicativo usa o esquema de ligação do computador cliente com o computador servidor em rede, sem necessidade de copiar o aplicativo para os computadores clientes ou estações de trabalho. O programa é composto de várias partes e foi instalado com a seguinte configuração mínima:

- **E3 Server:** é o servidor de aplicações, onde são processadas as comunicações e gerenciados os processos principais do sistema de São José dos Campos, além de enviar as informações gráficas e dados para computadores clientes em qualquer ponto da rede Sabesp.
- **E3 Studio:** é a ferramenta única de configuração do sistema, servindo como plataforma universal de desenvolvimento. Possui editor gráfico completo para a criação das interfaces de operação do usuário e um editor de roteiros de programação. É utilizado exclusivamente por equipes de automação da Sabesp, que executam a manutenção dos equipamentos.

- **E3 Viewer:** é a interface de operação com o usuário (console de operação). Permite executar a aplicação que está no servidor em qualquer computador, podendo executar tanto em rede local como na Intranet/Internet via um navegador do tipo Internet Explorer ®. Em ambos os modos, não é necessária a instalação do programa aplicativo no computador do cliente, pois todos os componentes (telas, bibliotecas e controles) são retirados do servidor e registrados automaticamente no computador do cliente.

A Figura 4.19 apresenta a tela de operação de um dos sistemas supervisionados construída com o módulo E3 Studio. O aplicativo produz gráficos com condições de visualização dos históricos de pontos de controle.

Figura 4.19 Tela de operação de um sistema construída com ELIPSE E3 Studio.

A Figura 4.20 apresenta uma tela de visualização de dados históricos de um dos sistemas supervisionados.

Figura 4.20 Gráficos de dados históricos de um sistema supervisionado pelo Centro de Controle Operacional.

Todos os dados arquivados no servidor de aplicação podem ser exportados para aplicativos de planilha de cálculo similares ao Excel® da Microsoft, e a Figura 4.21 apresenta um exemplo, como os dados do sistema podem ser disponibilizados para análise.

4.4 Fluxograma de avaliação da aplicação de inversores de frequência

Após a coleta dos dados e inspeções no local, foram avaliadas as instalações, objeto deste trabalho, através da adaptação do fluxograma proposto pelo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004), apresentado na Figura 4.22, que permite efetuar passo a passo a avaliação de aplicações feitas, bem como avaliar se a aplicação de inversor foi a melhor alternativa técnica.

A seguir são apresentados os principais detalhes da metodologia utilizada:

- **Considerar as demandas do sistema.**
- **Elaborar as curvas do sistema.**

Utilizam-se esses blocos de ação para verificar se as bombas existentes têm capacidade para atender a demanda máxima do sistema em estudo através da análise das curvas das bombas com várias velocidades em função da curva do sistema e rendimentos dos pontos de trabalho.

- **Considerar o sistema de redução de perdas.**

Esse bloco avalia os objetivos do controle de velocidade em relação ao controle de perdas. O controle de pressões que é fundamental para a redução de perdas de água pode ser efetuado com a variação das alturas manométricas pela variação das velocidades das bombas.

Figura 4.22 Fluxograma de avaliação do uso adequado dos inversores de frequência.
 Fonte: Adaptado de EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004).

- **Necessita variar continuamente?**

Neste bloco de decisão se a resposta for não, deve-se considerar o uso de bombas de velocidade fixa ou um controle liga-desliga. Se a resposta for sim indica que o inversor de frequência será potencialmente útil.

- **O inversor será potencialmente útil.**

O inversor de frequência é o dispositivo melhor recomendado para sistemas que necessitam de variação contínua de velocidade.

- **Demasiado atrito?**

Esse item serve para avaliar a aplicação de inversores de frequência em substituição a controles de vazão por meio de fechamento de válvulas ou by-pass. Na aplicação de inversores de frequência, a redução ou aumento de vazão acontece pela mudança da velocidade do conjunto motor-bomba e não pelo aumento ou diminuição da altura manométrica devido ao atrito do fechamento de válvulas de controle.

Neste bloco de decisão se a resposta for sim indica que o inversor de frequência será potencialmente útil. Se for não, deve ser verificado se os benefícios gerais incluem itens sem energia, como redução do custo de manutenção.

- **O inversor será potencialmente útil.**

A redução de consumo de energia é a principal vantagem da aplicação de inversores de frequência em substituição de sistemas com controles de vazão baseados no atrito de fechamento de válvulas.

- **A bomba trabalha a maior parte do tempo?**

Se a resposta for sim, deve-se ir para o penúltimo bloco de ação. Se for não, deve ser verificado se os benefícios gerais incluem itens sem energia, como redução do custo de manutenção.

- **O inversor de frequência quase certamente será benéfico.**

A aplicação de inversores de frequência será quase certamente benéfica, pois quanto maior for o número de horas de trabalho da bomba, maior será a possibilidade de reduzir o consumo de energia do motor que aciona essa bomba.

- **Selecionar o inversor.**

No bloco final finaliza-se a avaliação com a seleção do inversor de frequência adequado para o sistema avaliado.

Na seqüência do fluxograma para a resposta negativa dos blocos de decisão, “**Necessita variar continuamente?**”, “**Demasiado atrito?**” e “**A bomba trabalha a maior parte do tempo?**” têm-se os blocos:

- **Considerar bombas com velocidade fixa ou controle liga-desliga.**
- **Verificar se os benefícios gerais incluem itens sem energia, como redução do custo de manutenção.**
- **Calcular o custo operacional total anual com soluções de sistemas alternativos.**
- **O inversor é aplicável?**
- **Utilizar bombas de velocidade fixa.**

O aspecto técnico da escolha de alternativa de uso de bombas de velocidade fixa ou um controle liga-desliga não foi objeto deste estudo que busca a verificar a eficiência da aplicação de inversores de frequência em elevatórias de água.

Se o atrito não for significativo deve-se avaliar o potencial das ações de manutenção na redução de custos. Deve ser verificada a questão econômica na busca de outros benefícios. O aspecto econômico não foi objeto deste estudo, devido à falta de dados. Observamos que a Sabesp disponibilizou apenas os custos de operação relativos aos consumos de energia elétrica.

4.5 Método de análise gráfica para avaliação dos inversores de frequência

Como a ferramenta de exportação direta dos dados do supervisório ELIPSE E3 para o aplicativo de planilha de cálculo Excel, exigia a utilização dos computadores do Centro de Controle Operacional de forma contínua, optou-se por acessar diretamente o banco de dados do supervisório.

A cópia desses dados do servidor foi obtida para um computador portátil, para a geração de gráficos comparativos das variações de frequência, vazão e pressão. Para gerar os gráficos foi utilizado o aplicativo SQL Server para exportar os dados para o aplicativo gerenciador de banco de dados Access. Em seguida, foi efetuada nova exportação dos dados para as planilhas Excel, onde expurgou-se os valores zerados e os valores superiores a $\pm 10\%$ dos valores médios encontrados.

A análise gráfica do comportamento de curvas de variação é um método simples e eficiente para o controle da operação de sistemas de abastecimento de água sem o emprego de aplicativos de simulação computacional, pois permite aos próprios operadores do Centro de Controle Operacional definir quais os períodos com problemas de operação. Uma das vantagens da análise gráfica é que essa metodologia permite gerar curvas padrão e corrigi-las continuamente. A figura 4.23 apresenta um exemplo de análise gráfica de vazões de saída e de nível de um reservatório.

Figura 4.23 Exemplo de método de análise gráfica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram estudados quatro sistemas no período de 12/08/2005 a 29/03/2006, através de fluxograma de avaliação de aplicação de inversores de frequência para verificar se as seleções de inversores estavam adequadas e se o uso do fluxograma possibilita selecionar inversores de frequência. Em seguida foi feita a análise gráfica das curvas de variação dos parâmetros: vazão, pressão e frequência de rotação dos motores.

5.1 Resultados da aplicação de fluxograma de avaliação de inversores de frequência

Com a aplicação nas áreas de estudo do fluxograma de avaliação da aplicação de inversores de frequência (Figura 4.12), verificou-se que nenhum dos sistemas em estudo considerou as curvas de demanda, pois os projetos para o dimensionamento dos conjuntos motor-bomba com inversores de frequência consideram apenas a vazão máxima horária solicitada pelo sistema.

Nas estações de bombeamento estudadas não foram elaboradas as curvas dos sistemas, dispondo somente da curva da bomba (catálogo do fabricante), de modo que não foi possível avaliar os pontos de melhor rendimento das bombas.

Todos os casos estudados foram determinados pela necessidade do controle das perdas de água pelo controle das pressões nas redes de distribuição de água. Verificou-se que os bombeamentos variavam as vazões continuamente para atender

a demanda, mantendo as pressões dentro de faixas de pressão máximas e mínimas pré-estabelecidas em função de características topográficas das áreas abastecidas. Como os inversores de frequência foram programados para reduzir ou aumentar a velocidade de rotação em função das pressões, a operação das bombas foi contínua.

Para uma eficiente aplicação de inversores de frequência, as demandas de consumo precisam ser antecipadamente bem definidas, pois as bombas podem vir a atuar com velocidade de rotação nominal ou próxima da nominal e anular todos os ganhos de energia possíveis com a redução da velocidade das bombas.

Os inversores estudados foram aplicados sem a análise das demandas de seus sistemas. No sistema Galo Branco parte do dia a bomba funcionava com velocidade fixa, sendo que 114 dias ou 49% do período da pesquisa esse sistema operava com valores médios superiores a 10 horas diárias.

Pela análise do fluxograma da metodologia proposta verificou-se que, para todos os casos estudados a alternativa mais indicada é a aplicação de inversores de frequência.

5.2 Resultados da análise gráfica para avaliação dos inversores de frequência

Inicialmente foi utilizado o aplicativo ELIPSE E3 que disponibilizava as curvas de variação nas telas de supervisão conforme se observa na Figura 5.1. Essa figura

representa o principal modo gráfico como os operadores do Centro de Controle Operacional podem visualizar a operação dos bombeamentos sob sua supervisão.

Figura 5.1 Curvas de variação de frequência, vazão e pressão do sistema R3\R4 – Centro.

A Figura 5.2 apresenta uma análise gráfica do sistema Galo Branco. Nesse sistema foi detectada a operação do bombeamento com velocidade de rotação média de 58 Hz, ou 96% da velocidade máxima.

A Figura 5.3 apresenta as telas saturadas do sistema Jardim Morumbi, que possui cinco sistemas de bombeamento sob supervisão do ELIPSE E3. As telas ficam mais saturadas quanto maior for o período da análise ou a quantidade de pontos monitorados.

Figura 5.2 Curvas de variação de frequência, vazão e pressão do Sistema R82 – Galo Branco.

Figura 5.3 Curvas de variação de frequência, vazão e pressão do Sistema R49/R65 – Jardim Morumbi.

Em seguida foi elaborado no aplicativo Excel®, gráficos das curvas de variação para as 34 semanas de pesquisa e obtiveram-se curvas de variação de 230 dias com valores plotados de minuto a minuto.

Foram analisadas as curvas e escolhidos os gráficos das semanas mais representativas da operação dos sistemas estudados e, nessas curvas, foram efetuados a análise gráfica da eficiência da instalação com inversores de frequência.

5.2.1 Análise gráfica dos dados do sistema Galo Branco

A Figura 5.4 apresenta as curvas de vazão, pressão e frequência do sistema Galo Branco, onde se pode detectar o início da situação operacional em que o bombeamento começava a operar com frequência constante de valor médio de 58 Hz.

Na Figura 5.5 pode-se visualizar a situação operacional com a operação do bombeamento por períodos superiores a 10 horas diárias na frequência média de 58 Hz. Com a aplicação de inversores a economia de energia foi menor que 50% em relação aos valores esperados pela área operacional da Sabesp.

Figura 5.4 Curvas de variação de frequência do sistema Galo Branco com início da operação em 58 Hz.

Figura 5.5 Curvas de variação de frequência do sistema Galo Branco por períodos superiores a 10 horas de operação com frequência média 58 Hz.

5.2.2 Análise gráfica dos dados do sistema Campo dos Alemães

A Figura 5.6 apresenta os dados sem tratamento do sistema Campo dos Alemães, obtidos do banco de dados, antes de serem ajustados para análise operacional. Os valores de frequência encontrados eram superiores a 10% dos valores reais. A Figura 5.7 apresenta os dados ajustados da Figura 5.6 onde foi analisado que a curva de vazão do sistema acompanha a curva de frequência, resultando em operação ideal com economia de energia. A pressão escalonada entre valores mínimos de 20 mca e valores máximos de 28 mca foi totalmente controlada pelo inversor de frequência.

Na Figura 5.8 apresenta o que se define como curva padrão da operação de um sistema de bombeamento com aplicação de inversor de frequência, onde se observa as flutuações de vazões e frequências de modos semelhantes.

Figura 5.6 Curvas de variação de freqüência sem ajuste, dados sem tratamento do sistema Campo dos Alemães.

Figura 5.7 Curvas de variação de frequência, dados ajustados do sistema Campo dos Alemães.

Figura 5.8 Curva padrão de variação de frequência, vazão e pressão do sistema Campo dos Alemães.

5.2.3 Análise gráfica dos dados do sistema Jardim Morumbi

A análise dos dados do Jardim Morumbi, indica que a operação do sistema comporta-se de forma adequada, com curvas de frequência fluando de forma semelhante às curvas de vazão, conforme se verifica na Figura 5.9.

Observa-se, entretanto que, os dados por não terem sido tratados apresentam uma pequena defasagem de período, de modo que as curvas de frequência estão atrasadas em relação às curvas de vazão.

Ressalte-se que na operação ideal, as vazões mínimas acontecem no mesmo período das pressões mínimas. As frequências mínimas são prejudicadas nesta análise pela defasagem, pois ocorrem em faixas intermediárias de pressão.

Figura 5.9 Curvas de variação de freqüência, vazão e pressão do sistema Jardim Morumbi.

5.2.4 Análise gráfica dos dados do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II

A Figura 5.10 apresenta os dados sem tratamento do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II, onde pode-se observar a grande variação das vazões para uma variação de frequência entre 40 Hz e 53 Hz. Essas frequências representam 66% a 88% da frequência nominal dos motores de indução, e estão próximos dos pontos de melhor rendimento das bombas.

Os valores obtidos nesse sistema atendem as recomendações de GOTTLIEBSON (1978), de se operar bombas continuamente com variação de vazão de cerca de 30% para mais ou para menos em relação ao ponto de melhor rendimento das bombas.

Figura 5.10 Curvas de variação de frequência, vazão e pressão, dados sem tratamento do sistema Dom Pedro I e Dom Pedro II.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões e recomendações deste trabalho são apresentadas a seguir.

- A aplicação da metodologia proposta, recomendada pelo EUROPUMP e HYDRAULIC INSTITUTE (2004) é adequada para avaliar a eficiência dos inversores de frequência instalados em estações elevatórias de água.
- A aplicação de método de análise gráfica também é eficiente para que os operadores do Centro de Controle Operacional visualizem o comportamento das curvas de vazão, pressão e frequência.
- A aplicação de inversores de frequência foi eficiente nos sistemas: Campo dos Alemães, Jardim Morumbi e conjunto habitacional Dom Pedro I e Dom Pedro II. Entretanto, no sistema Galo Branco não foi eficiente devido a frequência atingir a rotação nominal do motor por períodos superiores a 10 horas diárias.
- A utilização de inversores de frequência para o bombeamento direto nas redes de distribuição de água é eficiente para controlar as pressões.
- O estudo das demandas de água nas áreas submetidas ao bombeamento direto é essencial para que o dimensionamento adequado dos inversores de frequência.

- Recomenda-se ao Centro de Controle Operacional, a geração de relatórios e a construção de curvas padrões de variação de frequência, pressão e vazão, a partir das informações coletadas do supervisório ELIPSE E3®.
- Recomenda-se a parametrização e o tratamento dos dados de pressão, vazão e frequência obtidos do banco de dados do supervisório ELIPSE E3®.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMANN, D. et al.; **Modulação da velocidade em bombas submersas para redução das perdas físicas e energéticas nos sistemas de distribuição.**

Disponível em: < <http://semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/pdf/35Assemae024.pdf> >. Acesso em 22/04/2006.

ARIKAWA, K.C.O.; **Perdas reais em sistemas de distribuição de água – Proposta de metodologia para avaliação de perdas reais e definição das ações de controle.** São Paulo, 2005. 200p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

BRAGHIROLI, M. A.; **Setor Santana: um caso de sucesso na redução de perdas de água e consumo de energia elétrica.** Revista Saneas, São Paulo, n.20, p. 23, abril 2005.

CASSIANO FILHO, A.; FREITAS, F.V.; **Redução do consumo de energia elétrica com utilização de inversor de frequência.** Relatório interno. Sabesp, 1989.

CHIARA, J. et al.; **Manual técnico: Bombas e estações elevatórias utilizadas em abastecimento de água.** Capítulo II. 2ª ed. São Paulo, 1968. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

CURTIS, P.; **How drives save money in pumping applications**. Disponível em: <http://www.drivesurvey.com/index_library.cfm?feature_id=91>. Acesso em 03/08/2005.

EBARA. **Catálogo eletrônico de produtos**. Disponível em: < [http:// www.ebara.com.br](http://www.ebara.com.br)>. Acesso em: 20/01/2006.

EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE; **Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems**. First edition. New Jersey, Belgium, 2001.

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

GOTTLIEBSON, M.; **Explore the use of variable speed water booster pumps**. Water & Wastes Engineering, p62 - 69, may 1978.

GOTTLIEBSON, M.; **Explore the use of variable speed water booster pumps/2**. Water & Wastes Engineering, p30 - 35, june 1978.

GOTTLIEBSON, M.; **Explore the use of variable speed water booster pumps/3**. Water & Wastes Engineering, p54-62, july 1978.

HAGUIUDA, C. **Eficiência energética no saneamento básico**. Palestra apresentada no 2º Congresso Brasileiro sobre Eficiência Energética e Cogeração de Energia, São Paulo, 8-9 nov. 2005.

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

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

MACINTYRE, A.J.; **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro. 2ª ed. Editora Guanabara, 1987.

MAYS, L.W.; **Hydraulic design handbook**, First edition, McGraw-Hill 1999.

MATHEUS, H.; **Curso completo sobre conversores de frequência**. Disponível em: <http://www.ejm.com.br/download.htm> . Acesso em: 20/01/2006.

PORTO, R. M; **Hidráulica básica**. São Carlos. 3ª Edição Revisada. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – EESC-USP, 2004.540 p.

PUCCINELLI, R. C. et al.; **Manual técnico: Bombas e estações elevatórias utilizadas em abastecimento de água**. Capítulo V. 2ª ed. São Paulo, 1968. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

SANKS, R.L. et al; **Pumping station design**, 2º ed., Butterworth-Heinemann, 1998.

TSUTIYA, M.T. et al; **Utilização de bombas de rotação variável em obras sanitárias**. Revista DAE, v.41, n.126, p266, setembro 1981, 1981.

TSUTIYA, M.T.; **Redução do custo de energia elétrica em estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água de pequeno e médio portes**. São Paulo, 1989. 207 p Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

TSUTIYA, M.T.; **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. 185p.

TSUTIYA, M.T.; **Abastecimento de água**. 1ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004. 634p.

TSUTIYA, M.T.; **Utilização de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento**. VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de água. João Pessoa. Paraíba, junho de 2006.

YASSUDA, E. R. et al.; **Manual técnico: Bombas e estações elevatórias utilizadas em abastecimento de água**. Capítulo I. 2ª ed. São Paulo, 1968. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

WEG. Manual de aplicação. Santa Catarina: **Guia de aplicação de inversores de frequência**. 2002. 239p.

WEG. Catálogo técnico. **Motores elétricos – linhas de produtos, características, especificações, instalações e manutenções**.. Disponível em: <<http://www.weg.com.br/index.htm>>. Acesso em 30/04/2006.

WILLIAN, S.M.; KUBIK, A.W.; **Variable speed drives for sewage pumps**. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, 35 (12), p. 1493 – 1500. december 1963.

ZAHED FILHO, K.; **Previsão de demanda de consumo em tempo real no desenvolvimento operacional de sistemas de distribuição de água**. São Paulo, 1990. 135p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.

ANEXOS

Anexo A – Esquema hidráulico do sistema de abastecimento de água de São José dos Campos

<p>SABESP</p> <p>VISTO E ACEITO</p> <p>Eu, abaixo assinado, reconheço e assumo a responsabilidade pelo conteúdo deste documento.</p> <p>ANALISADO POR: CARLOS CAMPOS</p> <p>ACEITO:</p>		<p>EXCERTO 202</p> <p>INSS 3 / INSS-4</p>		<p>ANEXO A</p> <p>SÃO JOSÉ DOS CAMPOS</p> <p>ESQUEMA HIERÁRQUICO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA</p> <p>ÁREA FÍSICA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA</p>		<p>SABESP</p>	
<p>INSS 3 / INSS-4</p> <p>EXCERTO 202</p>		<p>ANEXO A</p> <p>SÃO JOSÉ DOS CAMPOS</p> <p>ESQUEMA HIERÁRQUICO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA</p> <p>ÁREA FÍSICA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA</p>		<p>SABESP</p>		<p>ESCALA</p> <p>1:115</p>	