



Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas

*“Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em
Sistemas de Bombeamento de Água”*

Wlamir Rodrigues

**Campinas
2.007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas

*“Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Freqüência em
Sistemas de Bombeamento de Água”*

Autor: Wlamir Rodrigues

Orientador: Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

**Campinas, SP
2.007**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA – BAE – UNICAMP

R618c Rodrigues, Wlamir
Critérios para o uso eficiente de inversores de
frequência em sistemas de bombeamento de água /
Wlamir Rodrigues. -- Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Edevar Luvizotto Junior
Doutorado - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo.

1. Estação de bombeamento. 2. Drives com
velocidade variável. 3. Energia elétrica - Conservação.
4. Motores elétricos. I. Luvizotto Junior, Edevar. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Criterion for the efficient use of variable speed drive in water
public systems

Palavras-chave em Inglês: Pump systems, Variable speed drive, Optimal
operation, Electric energy, Electric motor

Área de concentração: Recursos Hídricos

Titulação: Doutor em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Banca examinadora: Yvone de Farias Lemos de Lucca, Rodrigo de Melo Porto,
José Geraldo Pena de Andrade, Paulo Vatauvuk

Data da defesa: 09/08/2007

Programa de Pós-Graduação: Faculdade de Engenharia Civil



Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas

*“Critérios para o Uso Eficiente de Inversores de Frequência em
Sistemas de Bombeamento de Água”*

Autor: Wlamir Rodrigues

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior
Presidente e Orientador / FEC – Unicamp

Prof. Dr. Yvone de Farias Lemos de Lucca
CTH – DAEE/USP

Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto
EESC – USP

Prof. Dr. José Geraldo Pena de Andrade
CESET – Unicamp

Prof. Dr. Paulo Vatauvuk
FEC – Unicamp

Campinas, 9 de Agosto de 2.007

Este trabalho é dedicado ao meu filho, *Guilherme*, cuja chegada mudou por completo a visão e o sentido da vida em minha família.

AGRADECIMENTOS

À *Deus*, pela vida e pelo privilégio de ter tido acesso a educação.

À *Mazé*, minha esposa, pelo amor, compreensão e estímulo dedicados ao longo das muitas etapas deste trabalho. Sua presença preencheu todas as lacunas deixadas nos momentos em que estive ausente.

Aos meus pais, *Osmar e Cleusa*, pela base que deu suporte a educação dos filhos.

Ao Prof. Dr. *Edevar Luvizotto Junior*, meu amigo e orientador, pelos ensinamentos, cumplicidade, companheirismo e dedicação. Suas irreparáveis posturas ética, moral e profissional, foram para mim parâmetros de referência pessoal que superaram o campo acadêmico.

À Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A – *SANASA*, pelo apoio total e irrestrito disponibilizando pessoal, equipamento e instalações para o desenvolvimento de nossa pesquisa.

Ao Eng° *Rinaldo da Silva Filho*, Diretor Técnico da *SANASA* (2.001 – 2.004), pelo suporte à nossa pesquisa, permitindo minha viagem a indústria WEG em Jaraguá do Sul – SC, para conhecer e aprender mais sobre inversores de frequência.

Ao Eng° *Vladimir José Pastore*, Gerente de Produção e Operação da *SANASA*, pelo apoio e compartilhamento de suas experiências profissionais. Nossas discussões sobre sistemas de bombeamento contribuíram por demais no desenvolvimento e conclusões desse trabalho.

Ao Eng° *Francisco Fernando Correa Viana*, Coordenador de Operação de Água, pelo auxílio na aquisição dos dados operacionais do sistema ao longo do período de testes, efetuando mudanças na rotina operacional das unidades estudadas em função das nossas necessidades.

Aos Eng°s *Claudio Luiz Tiozzi Rubio*, *Ricardo Danieli Zanin* e ao técnico *Roberto Galani Marques*, amigos e profissionais da *SANASA*, pela abnegação e desprendimento em compartilhar os seus conhecimentos e experiências sobre o assunto de variação de velocidade.

A todos os técnicos da *SANASA* que direta ou indiretamente participaram do desenvolvimento desse trabalho de pesquisa, em especial ao amigo *Luiz Roberto Sarto*, pelo empenho, disposição e dedicação na aquisição de todos os dados em campo.

Ao Prof. Dr. *Kamel Zahed Filho*, pelo esforço e apoio no estabelecimento de um elo de contato dentro da *SABESP*, viabilizando nossa visita.

À Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – *SABESP*, na pessoa dos Eng°s *Celso Hagiuda*, *Maurício Carnevalli*, *Carlos Alberto Miranda da Silva* e do técnico *André Raul Costa Santos*, pelo compartilhamento de suas experiências com inversores de frequência e soft starter dentro da *SABESP* na RMSP.

“A *Água* é a força motora de toda a natureza.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

RODRIGUES, WLAMIR. “*Cr terios para o Uso Eficiente de Inversores de Freq ncia em Sistemas de Bombeamento de  gua*”. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2.007. 208 p. Tese (Doutorado).

Instala es de bombeamento s o comumente encontradas em qualquer sistema que envolva o transporte de l quidos, como sistemas p blicos de abastecimento. Num passado n o t o distante, os projetos dessas instala es eram superdimensionados e, na maioria das vezes, nunca chegavam a operar em sua plenitude. A opera o de controle de vaz o, atrav s de uma v lvula na sa da da esta o de bombeamento, sempre foi uma a o nociva   estrutura em todos os sentidos, al m do desperd cio de energia el trica que esse tipo de opera o provocava. Paralelamente, a energia el trica se tornou muito dispendiosa, e a sua gera o muito mais complicada com impactos cada vez maiores no meio ambiente. Em condi es t o desfavor veis, o inversor de freq ncia se tornou pe a importante na miss o de racionalizar o uso da energia el trica sem afetar a opera o do sistema. Neste trabalho s o estudadas duas instala es de bombeamento da cidade de Campinas – SP, dotadas de inversores de freq ncia, onde s o comparadas opera es com e sem o uso deste dispositivo, suas vantagens e desvantagens, possibilidades e limita es. Com o aux lio de tr s modelos matem tico-computacionais, um que reproduziu uma das instala es, outro de auditoria energ tica e um terceiro de otimiza o, especialmente desenvolvidos para esse estudo, foi poss vel a simula o de cen rios operacionais, buscando extrair a m xima efici ncia do inversor e a conseq ente otimiza o do sistema como um todo. Ao final do trabalho s o propostos cr terios, resultantes do estudo desenvolvido, que podem servir como par metros quando da ado o de inversores de freq ncia em sistema de bombeamento.

Palavras-chave: Sistemas de bombeamento; inversor de freq ncia; otimiza o operacional; energia el trica; motor el trico.

ABSTRACT

RODRIGUES, WLAMIR. “*Criterion for the Efficient Use of Variable Speed Drive in Water Public Systems*”. Campinas, School of Civil Engineering, Architecture and Urban Design, State University of Campinas, 2.007. 208 p. Thesis (Doctorate).

The pumping systems are frequently found in any process which involves transport of liquids, like the public water systems. In a recent past, these pumping systems plans were oversized and, frequently, did not work in their full potential. The flow regulated by throttling has always presented, in all senses, a harmful effect to the installation. Moreover, this kind of action has caused waste of electric energy. Along with that the cost of electric energy has been increasing and its production has created damages to the environment. Since we have so many negative conditions, the variable speed drive has become the most important part to rationalize the use of electric energy causing no affect on the operation of the system. This work studies two pump stations located in the city of Campinas, which are operated with variable speed drives. At these pumping stations, comparisons are made with and without the use of this equipment, considering its advantages and disadvantages, its possibilities and limitations. Three mathematic-models were especially developed for this study, the first to reproduce one of the systems, the second to make an energetic audit and the third to optimize the results. Making use of these three models it was possible to simulate operational scenarios to reach the maximum efficiency from variable speed drive and the optimization of the system as a whole. As a conclusion of this study, some criteria are presented to support the use of variable speed drive in the pumping system.

Key words: Pump systems; variable speed drive; optimal operation; electric energy; electric motor.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classes de temperatura dos materiais de isolamento elétrico.....	19
Tabela 3.2 – Rendimentos nominais mínimos para motores elétricos no Brasil..	21
Tabela 3.3 – Associações dos transistores IGBT’s em inversores de frequência trifásicos.....	36
Tabela 3.4 – Subdivisão da tensão de fornecimento do Grupo A.....	76
Tabela 3.5 – Subdivisão da tensão de fornecimento do Grupo B.....	77
Tabela 3.6 – Taxas e tarifas para o fornecimento de energia elétrica na categoria convencional.....	83
Tabela 3.7 – Taxas e tarifas para o fornecimento de energia elétrica na categoria horo-sazonal.....	84
Tabela 4.1 – Divisão da S. A. “Leste” em trechos ao longo do caminhamento...	96
Tabela 5.1 – Quadro comparativo entre as diferentes expressões para correção do rendimento a partir da mudança de rotação.....	110
Tabela 5.2 – Enquadramento da faixa de vazão de um dia típico em relação ao rendimento do conjunto moto-bomba.....	111

Tabela 5.3 – Características das bombas selecionadas em catálogos.....	115
Tabela 5.4 – Enquadramento da faixa de vazão de um dia típico em relação ao rendimento do conjunto moto-bomba do Grupo 1.....	130
Tabela 5.5 – Enquadramento da faixa de vazão de um dia típico em relação ao rendimento do conjunto moto-bomba do Grupo 2.....	130
Tabela 5.6 – Características das bombas selecionadas em catálogos.....	133
Tabela 5.7 – Resultados da simulação no programa de “Auditoria Energética” para operação convencional.....	148
Tabela 5.8 – Resultados da simulação no programa de “Auditoria Energética” para operação com inversor de frequência	149
Tabela 5.9 – Resultados da simulação no programa de “Auditoria Energética” para operação otimizada.....	150
Tabela 7.1 – Dados levantados em campo da C. B. “João Erbolato” em 22/05/2.006.....	175
Tabela 7.2 – Dados levantados em campo da C. B. “João Erbolato” em 26/05/2.006.....	176
Tabela 7.3 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 01/06/2.006.....	177
Tabela 7.4 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 02/06/2.006.....	178
Tabela 7.5 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 08/06/2.006.....	179
Tabela 7.6 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 09/06/2.006.....	180

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Energia final destinada a força motriz no Setor Industrial.....	8
Figura 3.2 – Motor de indução trifásico.....	12
Figura 3.3 – Enrolamentos monofásicos e trifásicos de um motor de indução...	14
Figura 3.4 – Sistema de corrente alternada trifásica.....	15
Figura 3.5 – Soma vetorial e resultante dos campos eletromagnéticos H_1 , H_2 e H_3	15
Figura 3.6 – Gráfico da defasagem “atrasada” entre a onda de corrente (I) e tensão (V) × tempo (Carga Indutiva).....	16
Figura 3.7 – Gráfico da defasagem “adiantada” entre a onda de corrente (I) e tensão (V) × tempo (Carga Capacitiva).....	16
Figura 3.8 – Triângulo de potências.....	17
Figura 3.9 – Curva do sistema convencional com controle de vazão através de válvulas.....	23
Figura 3.10 – Curva do sistema operado com inversor de frequência.....	25
Figura 3.11 – Gráfico da variação do torque com a frequência.....	32
Figura 3.12 – Esquema de um inversor de frequência monofásico.....	33

Figura 3.13 – Esquema de um inversor de frequência trifásico.....	34
Figura 3.14 – Sentido de circulação da corrente de A para B.....	34
Figura 3.15 – Sentido de circulação da corrente de B para A.....	35
Figura 3.16 – Esquema de acionamento dos transistores IGBT's no motor trifásico.....	35
Figura 3.17 – Forma de ondas da tensão.....	37
Figura 3.18 – Diagrama base de um inversor de frequência.....	40
Figura 3.19 – Curva tensão × frequência.....	43
Figura 3.20 – Curva corrente × torque de um sistema com <i>soft starter</i>	48
Figura 3.21 – Relação do custo do inversor de frequência pela potência do motor.....	50
Figura 3.22 – Distorção provocada por frequências harmônicas.....	51
Figura 3.23 – Topologia do sistema da S. A. “Leste”.....	54
Figura 3.24 – Pressões disponível e utilizada na saída do recalque, na chegada do CRD “Jd. Paranapanema” com a S. A. “Leste” operando com rotação nominal.....	56
Figura 3.25 – Vazão Medida na S. A. “Leste”.....	57
Figura 3.26 – Curva da bomba para diferentes rotações × curva do sistema (S.A. “Leste”).....	58
Figura 3.27 – Rotação média requerida pelo sistema de bombeamento num dia típico (S. A. “Leste”).....	60
Figura 3.28 – Participação da <i>SABESP</i> no consumo estadual de energia elétrica no ano de 2.003.....	64
Figura 3.29 – Consumo anual de energia elétrica da <i>SABESP</i>	65
Figura 3.30 – Gasto anual contabilizado com energia elétrica na <i>SABESP</i>	65
Figura 3.31 – Situação inicial do Setor Santana.....	68
Figura 3.32 – Situação final do Setor Santana.....	69
Figura 3.33 – Estrutura do sistema brasileiro de tarifação de energia elétrica.....	82
Figura 4.1 – Localização dos dois sistemas em estudo dentro do limite do município.....	87
Figura 4.2 – Limite da zona alta do Setor Chapadão, localização da C. B.	

“João Erbolato” e caminhamento da Linha de Recalque até o ponto de distribuição direta (Ponto “A”).....	88
Figura 4.3 – Vista geral da Casa de Bombas “João Erbolato”.....	89
Figura 4.4 – Instalação dos equipamentos de aquisição de dados.....	91
Figura 4.5 – Posicionamento dos data-loggers de pressão no sistema de bombeamento.....	92
Figura 4.6 – Aquisição dos dados de nível da caixa de sucção.....	93
Figura 4.7 – Transmissor de pressão SMAR instalado para leitura e aquisição dos dados de nível da caixa de sucção.....	93
Figura 4.8 – Limite da área de influência da C. B. “Pulmão” com as divisões em blocos associados às derivações da S. A. “Leste”.....	96
Figura 4.9 – Vista geral da Casa de Bombas “Pulmão”.....	97
Figura 4.10 – Manômetro instalado na saída do bombeamento.....	99
Figura 4.11 – Aquisição dos dados de vazão.....	100
Figura 4.12 – Aquisição dos dados elétricos e rotação.....	101
Figura 4.13 – Modelo matemático-computacional desenvolvido no EPANET....	102
Figura 4.14 – Tela 1 do programa de “Auditoria Energética” com os dados exportados pelo EPANET e utilizando o Toolkit.....	103
Figura 4.15 – Tela 2 do programa de “Auditoria Energética” com o relatório da simulação bem sucedida.....	103
Figura 4.16 – Tela 3 do programa de “Auditoria Energética” com os resultados obtidos.....	104
Figura 5.1 – Rotações médias necessárias na operação convencional da C. B. “João Erbolato”.....	107
Figura 5.2 – Rotações médias utilizadas na operação com o uso de inversor de frequência na C. B. “João Erbolato”.....	108
Figura 5.3 – Comparação do consumo acumulado de energia elétrica com e sem o uso de inversor de frequência.....	109
Figura 5.4 – Curva da bomba para diferentes rotações × Demanda do sistema, associado às curvas de rendimento da bomba e seus pontos homólogos.....	112

Figura 5.5 – “ <i>Curva Neutra</i> ” relativa à demanda num dia típico da C. B. “João Erbolato”.....	114
Figura 5.6 – Curva do rendimento – Modelo 75-330 A – $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ / $H = 25,00 \text{ m}$	116
Figura 5.7 – Curva do rendimento – Modelo 75-330 A – $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ / $H = 40,00 \text{ m}$	116
Figura 5.8 – Curva característica da bomba bipartida – Modelo 150-450 D.....	117
Figura 5.9 – Curva do rendimento da bomba bipartida – Modelo 150-450 D....	117
Figura 5.10 – Curva da vazão \times potência da bomba bipartida – Modelo 150-450 D.....	118
Figura 5.11 – Curva do $NPSH_R$ da bomba bipartida – Modelo 150-450 D.....	118
Figura 5.12 – Curva característica da bomba bipartida – Modelo 150-450 A.....	119
Figura 5.13 – Curva do rendimento da bomba bipartida – Modelo 150-450 A....	119
Figura 5.14 – Curva da vazão \times potência da bomba bipartida – Modelo 150-450 A.....	120
Figura 5.15 – Curva do $NPSH_R$ da bomba bipartida – Modelo 150-450 A.....	120
Figura 5.16 – Curva da bomba bipartida – Modelo ETA 150-40.....	121
Figura 5.17 – Curva da bomba bipartida – Modelo RDL 200-400 B.....	122
Figura 5.18 – Curva da bomba e rendimento do Grupo 1 da C. B. “Pulmão” em operação convencional.....	125
Figura 5.19 – Curva da bomba e rendimento do Grupo 2 da C. B. “Pulmão” em operação convencional.....	125
Figura 5.20 – Rotações médias necessárias na operação de um dia típico da C. B. “Pulmão” com inversor de frequência.....	126
Figura 5.21 – Comparação do consumo acumulado de energia elétrica com e sem o uso de inversor de frequência.....	127
Figura 5.22 – Curva bomba para diferentes rotações \times Demanda do sistema, associado às curvas de rendimento da bomba e seus pontos homólogos – Grupo 1.....	128
Figura 5.23 – Curva bomba para diferentes rotações \times Demanda do sistema, associado às curvas de rendimento da bomba e seus	

pontos homólogos – Grupo 2.....	129
Figura 5.24 – “ <i>Curva Neutra</i> ” relativa à demanda de um dia típico da C. B. “Pulmão” com operação do Grupo 1.....	132
Figura 5.25 – “ <i>Curva Neutra</i> ” relativa à demanda de um dia típico da C. B. “Pulmão” com operação do Grupo 2.....	132
Figura 5.26 – Curva característica da bomba bipartida – Modelo 250-450 A.....	134
Figura 5.27 – Curva do rendimento da bomba bipartida – Modelo 250-450 A....	134
Figura 5.28 – Curva da vazão x potência da bomba bipartida – Modelo 250- 450 A	135
Figura 5.29 – NPSH _R da bomba bipartida – Modelo 250-450 A.....	135
Figura 5.30 – Curva da bomba bipartida – Modelo ETA 250-40.....	136
Figura 5.31 – Pressões na saída da C. B. “Pulmão” (Nó 3) para os três cenários de operação simulados.....	138
Figura 5.32 – Pressões no Ponto “A” (Nó 12) para os três cenários de operação simulados.....	139
Figura 5.33 – Pressões no Ponto “B” (Nó 13) para os três cenários de operação simulados.....	140
Figura 5.34 – Pressões no Ponto “D” (Nó 8) para os três cenários de operação simulados.....	141
Figura 5.35 – Pressões no Ponto “F” (Nó 10) para os três cenários de operação simulados.....	142
Figura 5.36 – Pressões na chegada da caixa de sucção do C. R. D. “Jd. Paranapanema” (Nó 9) para os três cenários de operação.....	143
Figura 5.37 – Rotações médias horárias de operação com Inversor de Frequência × Otimizada.....	145
Figura 5.38 – Ilustração da influência da operação em diferentes rotações sobre o rendimento.....	146
Figura 5.39 – Fluxograma dos critérios de emprego do inversor de frequência...	152
Figura 7.1 – Curva original da bomba do conjunto principal da C. B. “João Erbolato”.....	162
Figura 7.2 – Curva original da bomba do conjunto reserva da C. B. “João	

Erbolato”	163
Figura 7.3 – Curva de calibração do medidor de vazão da C. B. “Pulmão”.....	164
Figura 7.4 – Curva de calibração do medidor de vazão da C. B. “João Erbolato”	165
Figura 7.5 – Curva de calibração do transmissor de pressão utilizado na C. B. “João Erbolato”	166
Figura 7.6 – Curva de calibração do Data-Logger de Pressão.....	167
Figura 7.7 – Curva de calibração do Data-Logger de Pressão.....	168
Figura 7.8 – Curva de calibração do Data-Logger de Pressão.....	169
Figura 7.9 – Curva de calibração do Data-Logger de Pressão.....	170
Figura 7.10 – Curva de calibração do Data-Logger de Pressão.....	171
Figura 7.11 – Curva original da bomba do grupo 1 da C. B. “Pulmão”.....	172
Figura 7.12 – Curva original da bomba do grupo 2 da C. B. “Pulmão”.....	173
Figura 7.13 – Especificações técnicas do Cosmo-Data-Logger.....	174
Figura 7.14 – Curva da bomba da C. B. “San Conrado” para diferentes rotações.....	181
Figura 7.15 – Potência fornecida pelo motor elétrico à bomba da C. B. “San Conrado” para diferentes rotações.....	182

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos ou Grandeza	Dimensão
A	
A _N – Grupo de Alta Tensão, sendo N associado a cada classe de tensão	
AC – Corrente Alternada (A).....	A
B	
B _N – Grupo de Baixa Tensão, sendo N associado a cada classe de tensão	
C	
C – Conjugado (N.m).....	M L ² T ⁻²
C _N – Conjugado Nominal (N.m).....	M L ² T ⁻²
°C – Temperatura expressa em graus Celsius.....	t

D

DC – Corrente Contínua (A).....	A
φ – Defasagem Angular.....	(Adimensional)

E

EA – Energia Elétrica Ativa (kWh).....	$M L^2 T^{-2}$
ER – Energia Elétrica Reativa (kVARh).....	$M L^2 T^{-2}$

F

F – Frequência (Hz).....	T^{-1}
f – Frequência da Rede (Hz).....	T^{-1}
FP – Fator de Potência.....	(Adimensional)

H

H – Carga Hidráulica (m).....	L
H_i – Campo Eletromagnético i	(Adimensional)
H_{man} – Altura Manométrica (m).....	L
HP – Horário de Ponta (h).....	T
HF – Horário Fora de Ponta (h).....	T
HPPU – Horário de Ponta em Período Úmido (h).....	T
HFPU – Horário Fora de Ponta em Período Úmido (h).....	T
HPPS – Horário de Ponta em Período Seco (h).....	T
HFPS – Horário Fora de Ponta em Período Seco (h).....	T

I

I – Corrente Elétrica (A).....	A
IM – Corrente de Magnetização (A).....	A
IR – Corrente do Rotor (A).....	A

K

°K – Temperatura expressa em Kelvin.....	t
--	---

M

M – Motor Elétrico

M1 ϕ – Motor Elétrico MonofásicoM3 ϕ – Motor Elétrico Trifásico**N** N – Rotação (rpm)..... T^{-1} **P**P – Potência (W)..... $M L^2 T^{-3}$ P – Número de Pólos..... (Adimensional)“ P ” – Potência Ativa (W)..... $M L^2 T^{-3}$ P_{Bomba} – Potência da Bomba (C.V.)..... $M L^2 T^{-3}$

PU – Período Úmido..... T

PS – Período Seco..... T

Q Q – Vazão (m^3/s)..... $L^3 T^{-1}$ “ Q ” – Potência Reativa (VAr)..... $M L^2 T^{-3}$ **R** η - Rendimento (%)..... (Adimensional)**S**“ S ” – Potência Aparente (VA)..... $M L^2 T^{-3}$ **T**T – Torque (N.m)..... $M L^2 T^{-2}$ T_N – Transistor (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor)

V

V – Tensão (V).....	$M L^2 T^{-3} A^{-1}$
V _{cc} – Tensão em Corrente Contínua (V).....	$M L^2 T^{-3} A^{-1}$
V _{ij} – Tensão Associada aos Pólos i e j (V).....	$M L^2 T^{-3} A^{-1}$

SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

CB – Casa de Bomba

CCO – Centro de Controle Operacional

CLP – Controlador Lógico Programável

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

CPU – Unidade Central de Processamento

CRD – Centro de Reservação e Distribuição

DSP – Digital Signal Processors (Processador Digital de Sinais)

ECE – Encargo de Capacidade Emergencial

ELETRORÁS – Centrais Elétricas Brasileiras

EsPCEx – Escola Preparatória de Cadetes do Exército

ETA – Estação de Tratamento de Água

GLO – Garantia da Lei e da Ordem
GTO – Gate Turn-Off Thyristor (Tiristor de Corte Comandado pela Porta)
IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
IGP-M – Índice Geral de Preços Médios
IHM – Interface Homem Máquina
IP – Iluminação Pública
IRT – Reajuste Tarifário Anual
MCT – MOS Controlled Thyristor (Tiristor de Porta Isolada do Tipo MOS)
NBR – Norma Brasileira
NEMA – National Electrical Manufacturers Association (Associação Nacional dos Fabricantes Elétricos)
NSGA2 – Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm 2 (Algoritmo Genético Multi-Objetivo)
NPSH – Net Positive Suction Head (Carga Positiva de Sucção)
PID – Proporcional / Integral / Derivativo
PIS – Programa de Integração Social
PROCEL – Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica
PWM – Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RFI – Radio Frequency Interference (Interferência por Rádio Frequência)
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo
SA – Sub-Adutora
SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANASA – Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A
SCOA – Sistema de Controle Operacional do Abastecimento
SITH – Static Induction Thyristor (Tiristor de Indução Estática)
SMD – Surface Mounting Device (Dispositivo de Montagem de Superfície)
STF – Supremo Tribunal Federal
TEP – Toneladas Equivalentes de Petróleo
VCA – Válvula de Controle Automática

SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Lista de Tabelas.....	iii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Símbolos.....	xi
Siglas.....	xv
1. – Introdução.....	1
2. – Objetivo.....	4
3. – Revisão Bibliográfica.....	6
3.1 – Panorama Energético.....	6
3.2 – Motor Elétrico.....	11
3.3 – Variação de Rotação de Bombas por Inversor de Frequência.....	22
3.3.1 – O Inversor de Frequência.....	31
3.3.2 – Tipos de Inversores.....	38
3.4 – Efeito do Inversor de Frequência no Bombeamento.....	41

3.5 – Inversores de Freqüência em Empresas de Saneamento – “ <i>O Estado da Arte</i> ”.....	44
3.5.1 – <i>SANASA</i>	44
3.5.2 – <i>SABESP</i>	59
3.6 – Estrutura Tarifária de Energia Elétrica.....	70
4. – Materiais e Método.....	86
4.1 – Casa de Bombas “João Erbolato”.....	87
4.2 – Casa de Bombas “Pulmão”.....	95
5. – Resultados.....	106
5.1 – Casa de Bombas “João Erbolato”.....	106
5.2 – Casa de Bombas “Pulmão”.....	123
6. – Conclusões e Recomendações.....	153
7. – Anexos.....	161
7.1 – Arquivos de Dados de Entrada do EPANET.....	183
7.1.1 – Modelo Sem Inversor de Freqüência.....	183
7.1.2 – Modelo Com Inversor de Freqüência.....	186
7.1.3 – Modelo Com Inversor de Freqüência Otimizado.....	189
7.2 – Programa “Audita”.....	192
7.2.1 – Estrutura e Funções do Programa.....	192
7.2.2 – Fluxograma Principal do Programa.....	193
7.3 – Programa “Regras Operacionais para o Inversor de Freqüência”.....	194
7.3.1 – Estrutura do Programa.....	195
8. – Bibliografia.....	197

“Nunca se fez uma grande descoberta sem partir de um simples palpite.”

Isaac Newton

1. – INTRODUÇÃO

A operação dos sistemas públicos de abastecimento de água sempre mereceu atenção especial por se tratar de um serviço essencial complexo. O crescimento desordenado dos grandes centros urbanos é apontado como o principal responsável pela complexidade operacional mencionada, obrigando as companhias de saneamento a incrementarem seus sistemas a fim de atender a todas as condições e demandas impostas pelas distâncias e topografias adversas (Zessler e Shamir – 1.989). Nesse sentido, sistemas de bombeamento são implementados à malha operacional tendo como objetivo o pleno atendimento dos mais longínquos pontos de consumo com pressão e vazão adequadas.

Por outro lado, a ausência de investimentos no setor energético, nas últimas décadas, levou este sistema a uma situação bastante crítica, resultando em medidas que foram desde a criação do Programa de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL (1.985), depois alterado para Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (1.995), até a elevação do custo da energia elétrica. Este custo era fortemente subsidiado nas décadas de 60 e 70, chegando em 1.968 a um índice de 80% de subsídio nas tarifas de energia elétrica para as empresas de saneamento. A

partir da década de 90, houve uma redução gradativa desse subsídio até o índice atual de 15%, Tsutiya (2.001).

Ainda segundo Tsutiya (2.001), o PROCEL estabeleceu a partir de 1.997 uma meta de redução do desperdício de energia elétrica para as empresas de saneamento da ordem de 15%. Esse mesmo autor mostra que esse segmento representava no ano de 1.998, 2,3% do consumo global de energia elétrica do Brasil. Oliveira Jr. (1.993) sugere ainda que os sistemas de bombeamento respondem por mais de 40% do consumo dos motores industriais, ou quase 30% de todo consumo industrial do país. Dados de 2.002 da União Européia dão conta de que sistemas de motores eram responsáveis, até aquele momento, por 69 e 38% do consumo de energia elétrica dos setores industrial e de serviços (Almeida et al. – 2.002).

A partir de 1.996, entra em cena no Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que passou a ser responsável pela legislação e fiscalização do setor energético nacional, impondo entre outros atos a Resolução nº 242 de 24/07/98, a qual estabelecia que as concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica deveriam aplicar no mínimo 1% da receita operacional anual do ano anterior em programas de conservação de energia elétrica.

Porém, tudo isso não foi o suficiente e ainda no ano de 2.000, já se podia fazer previsões nada otimistas para o setor energético cuja possibilidade de um racionamento iminente só seria afastada caso as chuvas e os níveis operacionais dos reservatórios das centrais energéticas viessem a melhorar, conforme Amigo (2.000). Ainda segundo esse autor, o Ministério das Minas e Energia tratava neste mesmo período de uma redução de consumo junto aos grandes consumidores, numa espécie de gerenciamento de demandas, denotando a situação crítica que o Brasil já atravessava. Mesmo assim, a crise do setor energético foi inevitável e atingiu seu ponto crítico em 2.001 com o advento do racionamento.

Em 28/06/2.002 a ANEEL, baseada na Lei nº 10.438 de 26/04/2.002, cria um novo encargo às tarifas, denominado “Encargo de Capacidade Emergencial – ECE”, a um custo fixo de R\$ 0,0035/kWh (Base: Julho/2.005) para todos os tipos de consumidores, cujo objetivo era o

financiamento de obras de expansão do sistema de geração de energia elétrica, incidindo diretamente na composição global da conta. Nos meios jurídicos se discutiu a constitucionalidade de tal encargo, porém, segundo Carvalho (2.003), o Supremo Tribunal Federal (STF) num ato inexplicável decidiu pela constitucionalidade do mesmo, cuja cobrança vigorou até ano de 2.006.

Diante desse panorama, a palavra de ordem na atualidade tem sido o uso racional da energia elétrica, que se soma no combate ao desperdício e a perda física de água ao cotidiano das empresas de saneamento. Em condições tão desfavoráveis, os inversores de frequência nunca foram tão importantes como agora, com a missão de racionalizar o uso da energia elétrica sem afetar a operação do sistema de abastecimento.

Frente aos aspectos aqui delineados, surgiu a motivação que levou ao desenvolvimento desse estudo visando o emprego eficaz dos inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água. Numa revisão bibliográfica ampla, constatou-se uma carência de informações pertinentes que norteassem o uso adequado de tal dispositivo como meio de redução do consumo de energia elétrica em empresas do setor de saneamento e, principalmente, de um controle operacional otimizado, evidenciando assim o interesse pelo tema abordado.

“A necessidade é a melhor mestra e guia da natureza. A necessidade é terna e inventora, o eterno freio e lei da natureza.”

Leonardo da Vinci

2. – OBJETIVO

A proposta de investigação foi centrada nos aspectos da implantação de inversores de frequência em sistemas de abastecimento de água, visando extrair o máximo potencial deste dispositivo, principalmente no que tange a otimização operacional do sistema e a redução do consumo de energia elétrica, motivado pelo forte apelo da realidade atual do setor energético do país.

Tal objetivo foi desenvolvido tendo como área de interesse principal as empresas de saneamento, foi estabelecido como referência para o desenvolvimento do trabalho as Empresas *SANASA – Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A* e *SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo*, respectivamente da Cidade de Campinas e do Estado de São Paulo. Esta última atuante em grande parte das cidades paulistas e principalmente na Grande São Paulo.

Considerando apenas a Cidade de Campinas e a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), essas duas empresas são responsáveis, conjuntamente, pelo abastecimento de 40 municípios com uma população aproximada de 18.000.000 de pessoas. Pode-se notar com isso a

importância significativa de ambas no cenário nacional e, principalmente, na área onde se pretende concentrar a pesquisa.

Neste sentido, o presente estudo propõe o estabelecimento de “parâmetros guia” para o emprego de inversores, tendo como base uma análise crítica dos aspectos operacionais relacionados à sua implantação, aspectos referentes às máquinas a que esse dispositivo será acoplado (motor elétrico e bomba centrífuga) e ao sistema de tarifação de energia elétrica.

Como forma de avaliação e definição das proposições ora estabelecidas pretende-se desenvolver estudos de caso de instalações que empregam inversores de frequência, o que permitirá alcançar o objetivo final delineado para este trabalho. A síntese final de conclusão dessa pesquisa visa a elaboração de um fluxograma que contemple os tópicos principais para aplicação adequada de inversores de frequência em sistema de bombeamento.

“Mais abaixo que eu, sempre mais abaixo que eu se encontra a água. É sempre com os olhos baixos que a vejo. (...) É branca e brilhante, informe e fresca, passiva e obstinada em seu único vício: a gravidade.”

Francis Ponge

3. – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – PANORAMA ENERGÉTICO

Um dos grandes desafios do homem ao longo de sua existência no planeta foi o de encontrar fontes de energia que pudessem suprir as suas necessidades momentâneas e proporcionar, ao longo do tempo, a base de sustentação para o seu crescimento e desenvolvimento.

No princípio dos tempos, o fogo serviu para o aquecimento e auxílio no preparo dos alimentos, entre outras aplicações. Depois, já num segundo momento com a evolução da espécie, essa fonte tornou-se limitada obrigando a uma nova busca. Essa sina foi uma das principais molas propulsoras do desenvolvimento da humanidade e da continuidade da vida.

Um grande salto é observado no século XVIII a partir das experiências do americano Benjamin Franklin (1.706 – 1.790) com a energia elétrica. A partir daí o desenvolvimento passou a se consolidar neste sentido e, com o tempo e o domínio desta fonte de energia, houve uma verdadeira revolução nos processos industriais com a adaptação e a criação de novas máquinas que inicialmente eram alimentadas por vapor e mais tarde passaram, de forma definitiva, para a energia elétrica.

Nos tempos modernos com o advento do desenvolvimento de novas tecnologias, surgiram outras possibilidades de recursos de energia como: solar, eólica, nuclear, térmica, hidrogênio, etc., porém ainda distantes de suprirem toda a demanda mundial, o que fez do homem ainda mais dependente das fontes oriundas principalmente dos combustíveis fósseis (petróleo e gás natural) e da geração de eletricidade.

Segundo Almeida et al. (2.003) e (2.005), a maior parte da eletricidade utilizada em países industrializados tem seu consumo associado a motores elétricos. Ainda segundo esse autor, sistemas de motores são responsáveis por 69% e 38% da eletricidade consumida nos setores da indústria e de serviços na União Européia, respectivamente. Com estimativa média de uma taxa de crescimento anual do consumo de energia elétrica até o ano de 2.015 de 1,2% e 1% para ambos os setores. Pelli e Hitz (2.000) dizem que somente as empresas de saneamento consomem de 2% à 10% do total da eletricidade utilizada em um país.

No Brasil esses índices não são muito diferentes. De acordo com Oliveira Jr. (1.983), 40% do consumo dos motores elétricos industriais se destinavam àqueles referentes ao manuseio de fluídos e isso representava, à época, quase 30% de todo consumo industrial de energia elétrica. Amigo (2.000) mostra, através de dados do PROCEL de 1.999, que o setor industrial do país era o responsável sozinho por 45% do consumo de energia do país e, desse total, 51% se destinavam ao consumo de motores elétricos. Dados mais atuais do PROCEL (2.005), disponíveis no Balanço Energético Nacional (BEN) – 2.005 (Ano Base: 2.004), mostram a participação industrial já num valor de 48% do total da eletricidade consumida no país e se mantendo praticamente o mesmo percentual destinado ao consumo de energia elétrica para sistemas motrizes. De acordo ainda com dados do PROCEL (2.005), disponíveis no BEN – 2.005, somente

o uso de eletricidade representou 12,9 milhões de tep¹, ou quase 18% de toda a energia final destinada a força motriz no setor industrial do Brasil no ano de 2.004 (Figura 3.1). Segundo Garcia (2.003), deve-se lembrar ainda que os motores também são utilizados em outros setores o que eleva ainda mais a sua participação final.

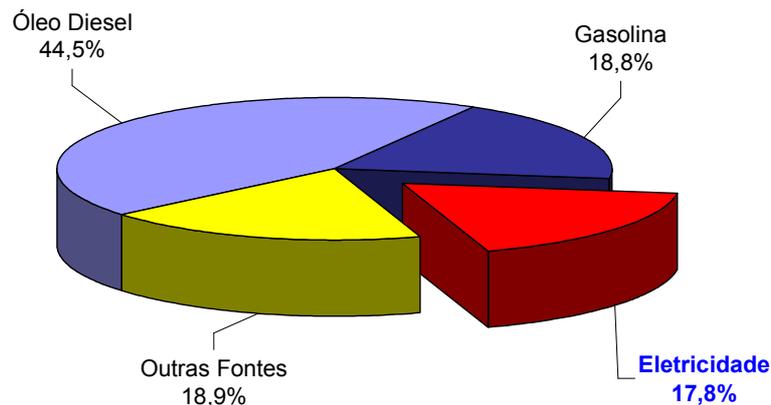


Figura 3.1 –Energia final destinada à força motriz no Setor Industrial. Fonte: PROCEL – BEN (2.005)

A abundância e a disponibilidade desses recursos no princípio, conjuntamente com uma visão imediata e inconseqüente, conduziram a padrões comportamentais e culturais que foram se consolidando no seio das sociedades. Por muito tempo o que se viu foi um uso desmedido das principais fontes de energia sem a preocupação do “preço” futuro a ser pago. O economista e professor, Eduardo Gianetti da Fonseca, define muito bem esse tipo de comportamento, chamando de “*Miopia Temporal Coletiva*”, onde os indivíduos não se preocupam com as conseqüências e os efeitos colaterais de determinadas atitudes ou comportamentos do presente em relação ao futuro. Nesse sentido Fonseca (2.005) diz: “...Na miopia temporal, a pessoa vê com muita intensidade aquilo que está próximo, mas não consegue ter a clareza em relação aos seus interesses futuros...”.

¹ tep – Toneladas Equivalentes de Petróleo

Esse conceito, arraigado na cultura da sociedade, fez com que cada vez mais se produzisse energia para atender às necessidades, sem levar em conta os efeitos disso. Os impactos ambientais danosos podem ser medidos e avaliados em profundidade. Na produção de energia elétrica, através de usinas hidrelétricas, por exemplo, o próprio fato da criação do volume armazenado em decorrência do enchimento do reservatório da barragem, produz um impacto ambiental incalculável que atinge todo o ecossistema local. Esse dano muitas vezes se estende por quilômetros à jusante do reservatório, uma vez que afeta a vazão dos rios a ele conectados provocando uma mudança substancial na velocidade e alterando suas seções em virtude da deposição de sedimentos em trecho de baixa declividade, entre muitos outros fatores.

O petróleo e o gás natural, também produzem danos, quer na sua extração, quer na sua produção ou mesmo no final do processo industrial, através da poluição gerada e das mudanças climáticas globais em virtude disso, o aquecimento global é apontado como uma delas.

Concomitantemente, no outro extremo se vê, numa imensa maioria de projetos de sistemas de bombeamento, estruturas superdimensionadas em relação à demanda real do processo, conforme Europump and Hydraulic Institute (2.004), ABB (2.005) e Gambica (2.007). Ainda de acordo com o Europump and Hydraulic Institute (2.004), estima-se que 75% dos sistemas de bombeamento se encontrem nessa condição e, seguramente mais de 20%. A justificativa apresentada, em alguns casos, era a de que se primava por uma margem de segurança. Obviamente, há um gasto desnecessário com equipamentos que muitas vezes jamais serão utilizados em sua plenitude, sem falar do desperdício de energia com o pleno funcionamento dos mesmos.

Com raríssimas exceções, como são as chamadas “*energias limpas*” (por ex.: a solar e a eólica) – cujo potencial também têm suas limitações – todas agridem severamente o meio ambiente, principalmente aquelas mais utilizadas pelo homem. Muitos ambientalistas discordam inclusive dessa consideração, intuindo que todas, sem exceção, são danosas ao meio ambiente.

De acordo com Gambica (2.007), estima-se ainda que no Reino Unido, sistemas de bombeamento sejam responsáveis pela emissão de 2,7 milhões de toneladas de Carbono na atmosfera.

Segundo Lora e Teixeira (2.001), a produção de energia tem grande impacto sobre a natureza por dois fatores:

- Desmatamento;
- Emissão de Poluentes.

Como consequência disso se tem hoje efeitos de mudanças climáticas (aquecimento global), a perda de áreas cultiváveis (desertificação), poluição dos solos e águas subterrâneas, entre muitos outros fatores.

Diante de fatos tão preocupantes, de efeitos colaterais cada vez mais latentes na natureza e de uma visão futurista, mesmo que ainda primitiva, tem-se verificado atitudes e mudanças no comportamento de governos e povos. Segundo o Europump and Hydraulic Institute (2.004), tanto o governo norte-americano como o de países europeus, têm oferecido incentivos na forma de redução de impostos e subsídios, às indústrias que aderirem aos programas de uso eficiente de energia com a consequente substituição e adequação de seus sistemas. Carter (2.006) apresenta a mesma observação.

Nesse sentido, o inversor de frequência tornou-se a principal peça hoje disponível para, de forma ordenada e eficiente, otimizar o uso de energia elétrica sem afetar os processos de produção, reduzir a demanda mundial de energia administrando as fontes já existentes e, principalmente, diminuir o severo impacto ao meio ambiente que tem afetado, indistintamente, povos ricos e pobres em escala global.

3.2 – MOTOR ELÉTRICO

Toda linha de produção industrial é dotada de sistemas diversos interligados ou não, compondo cada qual uma das diversas engrenagens que formam o processo como um todo. As bombas, ventiladores, pontes rolantes, esteiras, elevadores, entre outros, são alguns dos exemplos de sistemas bastante utilizados pelas indústrias. Na grande maioria deles está presente o motor elétrico cuja função é fornecer energia mecânica necessária aos equipamentos e, conseqüentemente, ao processo.

Especificamente, nas empresas de saneamento o emprego de motores elétricos é muito diversificado, passando por quase todas as etapas do processo. Porém, o seu uso mais significativo está ligado aos sistemas de bombeamento. Acoplado diretamente a uma bomba centrífuga, o motor elétrico passa a fazer parte do chamado conjunto moto-bomba, responsável pelo fornecimento de toda energia cinética necessária para que o fluido, no caso a água, alcance os mais distantes pontos do sistema em quantidade suficiente ao atendimento das demandas.

Sendo o motor elétrico o propulsor de todo sistema de bombeamento e tendo como fonte de alimentação a energia elétrica, faz-se necessário o seu conhecimento, mesmo que de forma primária, para compreensão de toda a proposta investigativa deste trabalho.

Em linhas gerais, os motores elétricos têm como definição básica a transformação de energia elétrica em energia mecânica. Fundamentalmente o motor elétrico pode ser dividido em duas partes: estator e rotor. Na Figura 3.2 se vê em detalhe um motor elétrico de indução. No Brasil são produzidos para uma frequência de 60 Hz com tensões que podem ser:

- Trifásicas – 220, 380, 440, 460 e 480 V
- Monofásicas – 110, 115, 127, 220, 240, 254 e 508 V

Os motores podem ser construídos para operar em corrente contínua ou corrente alternada. O motor de corrente contínua varia sua velocidade de zero até a nominal mantendo constante o seu conjugado (torque). Apresenta ótima regulação e precisão no estabelecimento da velocidade operacional. É possível obter rotações acima da nominal utilizando-se do chamado “enfraquecimento de campo”, que é conseguido com a redução do fluxo magnetizante com conseqüente aumento de rotação (Wilk, 2.000). Esse tipo de motor necessita de uma fonte de corrente contínua de energia ou de um dispositivo para conversão de corrente alternada em contínua.

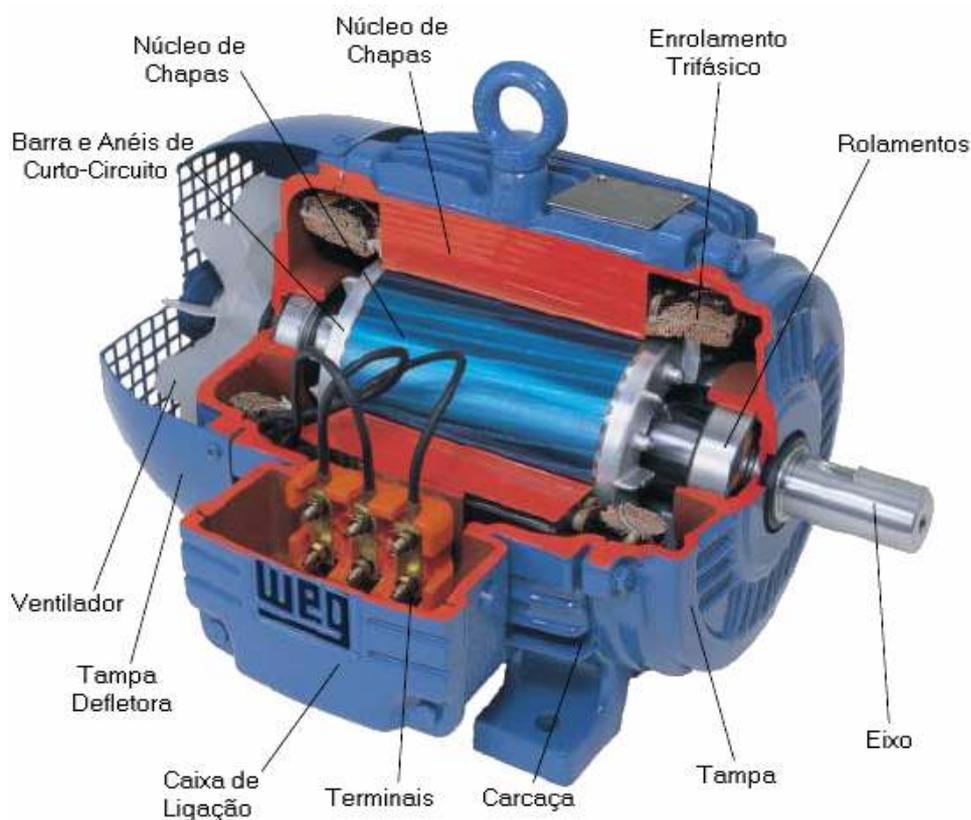


Figura 3.2 – Motor de indução trifásico. Fonte: Catálogo do fabricante WEG (2.005)

Wilk (2.000) divide os motores elétricos de corrente alternada em duas categorias: síncronos e assíncronos (indução). Os síncronos são motores de velocidade constante e proporcional à frequência da rede. A velocidade do rotor é a mesma do campo girante, pois os pólos do motor seguem o campo girante imposto pelo estator. Seu limite está ligado à máxima potência cedida antes da perda de sincronismo ocasionando a parada do motor (tombamento). Seu uso com conversor de frequência é indicado quando se necessita de uma precisão de velocidade aliada à variação de carga.

O motor assíncrono ou de indução com rotor tipo gaiola (Squirrel Cage) é o mais utilizado na indústria por ser o mais barato. De acordo com Garcia (2.003), esse motor é responsável por mais de 90% da energia motriz produzida através da eletricidade no país. Tem como característica a robustez, alta confiabilidade, simplicidade, baixo custo, relativa alta eficiência e de fácil manutenção, sendo também o preferido em associações com inversores de frequência (Europump and Hydraulic Institute, 2.004).

Em teoria, nesse tipo de motor, o rotor também teria a velocidade síncrona desde que operando em vazio e sem perdas. Porém, seu rotor diminuirá a velocidade proporcionalmente e de forma oposta ao conjugado externo. Isso pode ser entendido pela perda por escorregamento.

O “*escorregamento*”, nada mais é do que a diferença entre a velocidade síncrona no estator (por ex.: 1.800 rpm) e a velocidade do rotor que é medida na ponta do eixo com auxílio de um tacógrafo. Todos os motores apresentam escorregamento que, segundo o fabricante WEG, é fixo e nunca mudará, a não ser em caso de substituição das bobinas ou enrolamentos.

Em todo motor de indução, o princípio básico de funcionamento se processa através do suprimento de tensão aos enrolamentos do estator. Sendo esse motor trifásico, por exemplo, ele será composto por 3 enrolamentos monofásicos espaçados de 120° entre si. Ao ser alimentado por uma tensão trifásica (V_1 , V_2 e V_3), cada enrolamento será percorrido por uma corrente elétrica (I_1 , I_2 e I_3), também defasadas de 120° entre si, formando três campos eletromagnéticos (H_1 , H_2 e H_3) dirigidos de acordo com o seu próprio eixo, de valor proporcional à corrente, cujo fluxo se dá entre os pólos (norte e sul) do enrolamento atravessando o rotor. Da mesma forma,

esses campos são espaçados entre si de 120° . As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram o princípio de funcionamento descrito.

O campo total H resultante a cada instante de tempo, será a soma vetorial dos três campos (H_1 , H_2 e H_3). Na Figura 3.3 se observa que as correntes I_1 , I_2 e I_3 ao percorrerem os enrolamentos criarão os campos magnéticos. No instante de tempo (1) o campo magnético H_1 é máximo, pois a tensão V_1 atinge também seu máximo valor. Os demais campos (H_2 e H_3) são negativos e de mesma intensidade, acompanhando seus níveis de tensão nesse mesmo instante de tempo (Figura 3.4). Entretanto, por serem negativos sua orientação será oposta na soma vetorial. A Figura 3.5 ilustra essa soma vetorial e a resultante em cada instante de tempo. Observa-se que o campo resultante H tem intensidade constante, porém há uma alteração no sentido que ao final do ciclo retorna à posição inicial. Este comportamento é denominado “*Campo Girante*”.

O movimento do campo eletromagnético induz correntes nos condutores do rotor, que por sua vez acaba criando um campo eletromagnético no rotor. As forças magnéticas no rotor seguem o campo eletromagnético do estator produzindo o torque do motor.

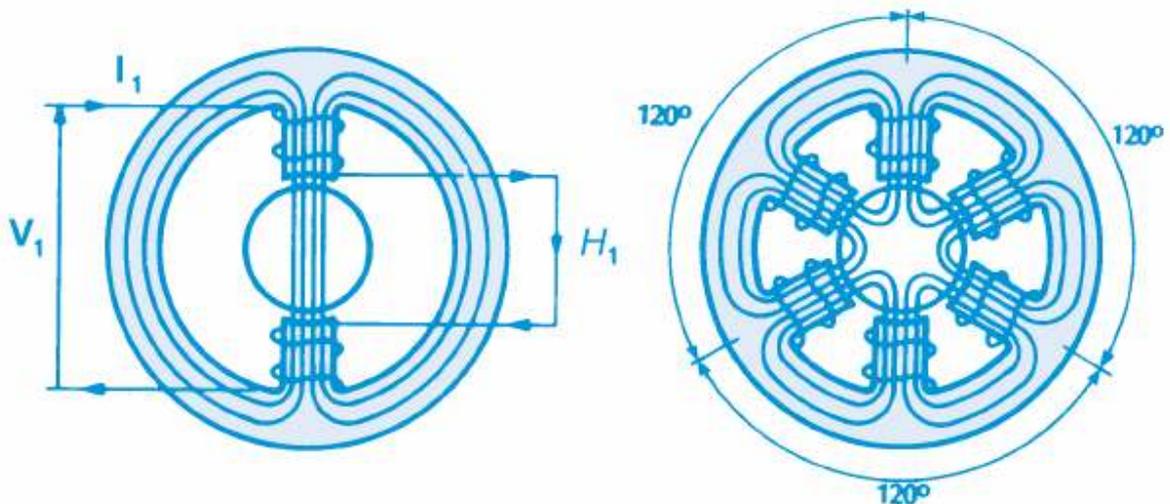


Figura 3.3 – Enrolamentos monofásico e trifásico de um motor de indução. Fonte: Catálogo do fabricante WEG (2.005)

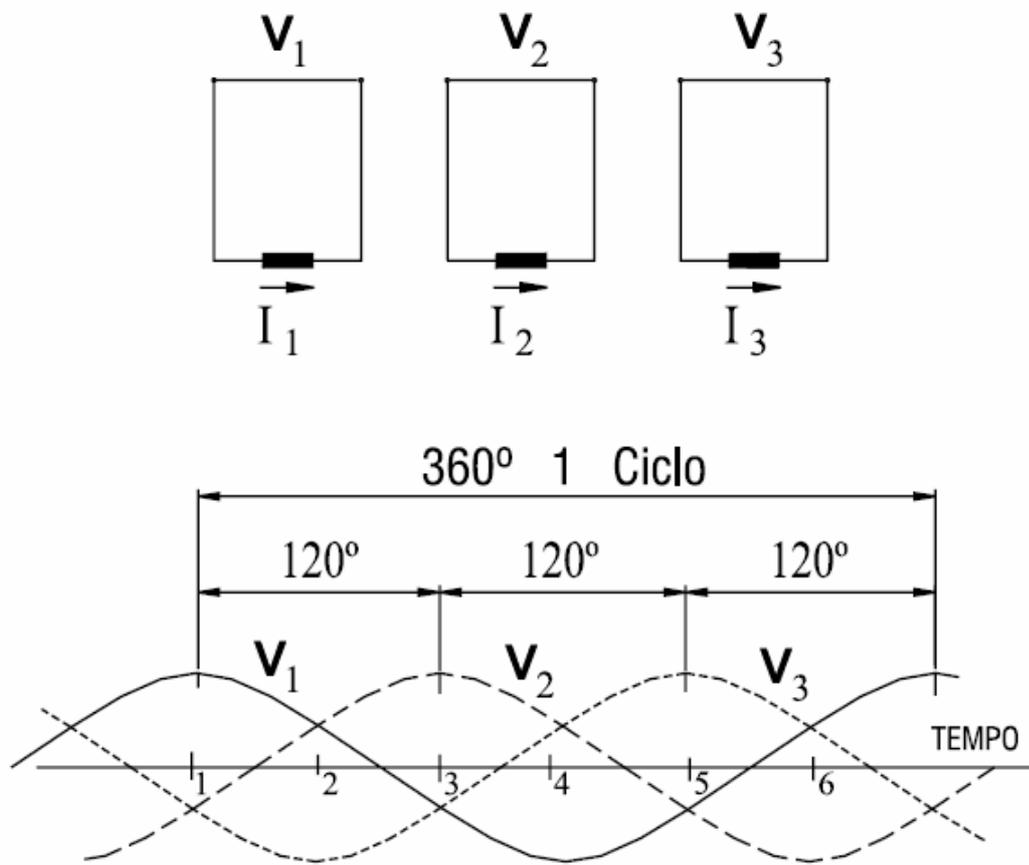


Figura 3.4 – Sistema de corrente alternada trifásica. Fonte: Catálogo do fabricante WEG (2.005)

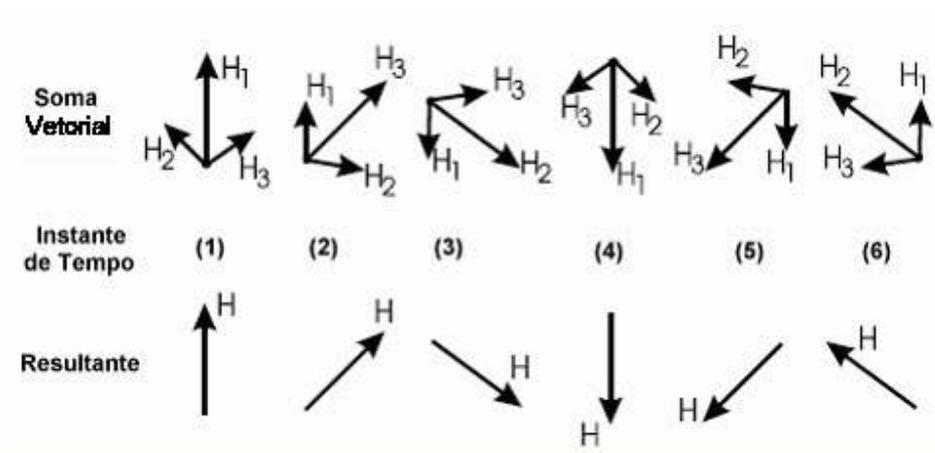


Figura 3.5 – Soma vetorial e resultante dos campos eletromagnéticos H_1 , H_2 e H_3 . Fonte: Catálogo do fabricante WEG (2.005)

As ondas de tensão e corrente, também podem apresentar uma defasagem entre si. Em circuitos de corrente alternada com cargas resistivas, as ondas de tensão e de corrente se encontram “*em fase*”, isto é, mudam sua polaridade no mesmo instante de tempo a cada ciclo. Já em circuitos com cargas reativas, como é o caso de capacitores e indutores (por ex: enrolamentos de motores), ocorre um armazenamento de energia nessas cargas resultando numa diferença de fase entre as ondas de tensão e corrente. Essa defasagem (φ) entre tensão e corrente pode ser de duas formas: adiantada e atrasada em relação à tensão (Figuras 3.6 e 3.7).

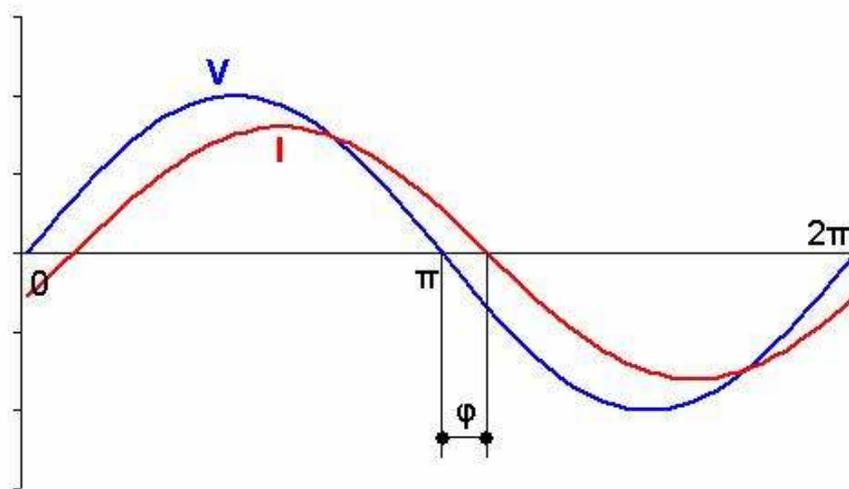


Figura 3.6 – Gráfico da defasagem “atrasada” entre a onda de corrente (I) e tensão (V) \times tempo (Carga Indutiva).

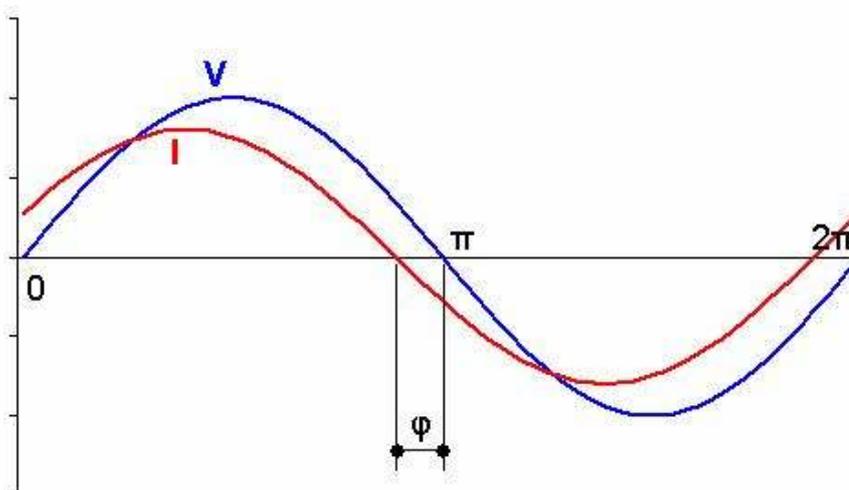


Figura 3.7 – Gráfico da defasagem “adiantada” entre a onda de corrente (I) e tensão (V) \times tempo (Carga Capacitiva).

A ocorrência dessa defasagem, gerada por cargas reativas, provoca inúmeros problemas às concessionárias de energia elétrica, pois se trata de uma energia que, embora circule continuamente pelos campos elétricos e magnéticos do sistema, não produz trabalho algum. O cosseno desse ângulo “ φ ”, também conhecido por “Fator de Potência”, mede a relação entre a Potência Aparente – “ S ” (aquela que existiria se não houvesse a defasagem), a Potência Ativa – “ P ” (parcela da potência aparente que realiza trabalho) e a Potência Reativa – “ Q ” (parcela da potência aparente que não realiza trabalho). A relação entre elas exprime diretamente o “Fator de Potência” que, segundo a Resolução nº 456 da ANEEL, não poderá ser inferior ao valor de 0,92. Os medidores instalados pelas concessionárias fazem, além do registro de consumo e da demanda, a medição dos valores dos reativos excedentes que são cobrados dos usuários. Na figura 3.8, observa-se o “Triângulo de Potências” ilustrando o acima apresentado.

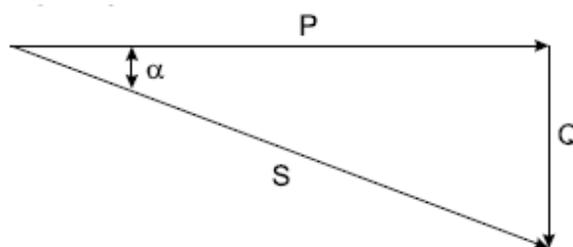


Figura 3.8 – Triângulo de potências. Fonte: Catálogo do fabricante WEG (2.005)

A velocidade de rotação é determinada pela frequência do suprimento de energia, pelo número de pólos nos enrolamentos do estator e numa extensão menor pela carga. O rotor gaiola é desenhado para o uso com suprimento de energia de 3 fases defasadas de 120° , a qual fornece a rotação inerente ao campo magnético interno.

Já o motor assíncrono tem essencialmente uma saída com velocidade constante, a qual decresce somente um pouco em porcentagem (de 1 a 3%), conhecida como “deslizamento”, quando o motor vai da condição sem carga até carga máxima. Entretanto, o controle de velocidade demanda do uso de dispositivos mecânicos externos ou de controle do suprimento de tensão e frequência.

Segundo o Europump and Hydraulic Institute (2.004), nenhum motor é 100% eficiente, portanto seu projeto deve buscar a redução das perdas, que são predominantemente na forma de calor. A temperatura do estator pode ser dissipada através do fluxo de calor pela carcaça do motor, entretanto a temperatura do rotor é transmitida diretamente ao eixo, o que pode causar aquecimento dos rolamentos. Os motores são convencionalmente desenhados para que haja esse fluxo de calor mencionado durante a operação em velocidade fixa e carga total.

A questão de resfriamento do motor é muito importante. Geralmente, os motores possuem uma ventilação acoplada ao seu eixo. Em casos especiais, de motores de grande potência, pode ser necessário um sistema independente de ventilação e/ou resfriamento mais laborioso, tal como um sistema combinado de ar e água.

Especificamente, no caso da perda nos enrolamentos estatóricos, isso geralmente ocorre devido ao material de isolamento utilizado, que também pode cooperar para um aumento da temperatura. A especificação do material isolante é baseada na capacidade de aumento de temperatura dos materiais. Segundo a norma americana, National Electrical Manufacturers Association – NEMA, essa especificação é baseada num ambiente de 40 °C, com a classe de isolação “B” suportando um aumento de 80 °C, a classe “F” um aumento de 105 °C e classe “H” um aumento de 125 °C. Essa última por ser a mais custosa é a menos utilizada. A norma brasileira (NBR 7.094:1.996), considera também uma temperatura ambiente de 40 °C para locais cuja altitude não supere 1.000 m em relação ao nível do mar. Contudo, os limites de elevação de temperatura são diferentes daqueles considerados pela norma americana.

De acordo com a NBR 7.094:1.996, esses valores de elevação de temperatura, baseados no método termométrico, são de 65 °K para os enrolamentos de classificação térmica “A”, 80 °K para os enrolamentos de classificação térmica “E”, 90 °K para os enrolamentos de classificação térmica “B”, 115 °K para os enrolamentos de classificação térmica “F” e 140 °K para os enrolamentos de classificação térmica “H”. A composição destes dois fatores, temperatura ambiente máxima e limite de elevação por classe, forma a Tabela 3.1 de classes de temperatura dos materiais isolantes (NBR 7.034:1.981).

Tabela 3.1 – Classes de temperatura dos materiais de isolamento elétrico. Fonte: NBR 7.034/81– ABNT (1.981)

Classes	Temperaturas (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	Acima de 180

Das classes de agrupamento da Tabela 3.1 as mais utilizadas, de acordo com Mascheroni et al. (2.003), são as classes “B” e “F”.

Obviamente sendo o motor de indução uma máquina robusta, conforme menção anterior, a sua vida útil é muito dependente da isolação do bobinado, a qual está relacionada ao envelhecimento gradual do material isolante e do desgaste mecânico dos rolamentos (Mascheroni et al., 2.003). Todavia, esse processo pode ser acelerado devido ao aumento da temperatura em virtude da operação com o uso de inversor de frequência a baixas velocidades.

A classe de isolamento dos motores é um dos principais problemas encontrados quando se pretende instalar inversores de frequência. Segundo Casada et al. (2.000) e Pemberton (2.005), a frequência de chaveamento ou pulsos de disparos dos transistores que compõem o circuito eletrônico do inversor, acaba por produzir picos de voltagem que podem causar danos nas bobinas dos motores. Almeida et al. (2.005) vai mais além, dizendo que esse fator é geralmente agravado em motores velhos, que não são uma raridade no mercado, conforme observado por Tarquin e Dowdy (1.989) e Brown (2.001). O aumento da temperatura no motor é outro grave problema apontado quando se deseja associar um inversor de frequência a motores velhos, cujo dimensionamento original não considerou a operação acima de um certo limite de temperatura, conforme observado por Casada et al. (2.000), Irvine e Gibson (2.002) e Almeida et al. (2.005).

A geometria do motor elétrico tem relação direta com o torque produzido pelo mesmo. O torque de saída designa geralmente a saída do motor em termos de potência, mas deve ser

lembrado que o motor na verdade é fonte de torque. Portanto, quanto maior a sua dimensão, maior o torque que ele pode entregar.

Evidentemente, sendo o motor elétrico um equipamento eletro-mecânico nem toda energia elétrica por ele consumida se transforma em trabalho (torque). Isso se deve as perdas que se dão prioritariamente na forma de calor. O índice que define essa relação é conhecido como rendimento (η). O parâmetro rendimento do motor, mede a proporção de potência elétrica que é transformada pelo mesmo em potência mecânica, enquanto que a diferença existente entre a potência efetivamente transmitida ao eixo do motor e a potência elétrica absorvida pela rede é denominada por perdas e podem ser:

- Perdas no enrolamento estatórico (Perdas no Cobre);
- Perdas no Rotor;
- Perdas por Atrito e Ventilação;
- Perdas magnéticas no núcleo (Perdas no Ferro).

Avaliando o item rendimento é possível encontrar dois grupos de motores, o modelo básico ou padrão com rendimento médio em torno de 85%, e os de alto rendimento, cujo rendimento médio é superior a 90%, segundo os fabricantes. É intuitivo que o preço final do produto é diferenciado. Contudo, o uso e o desgaste vão, ao longo do tempo, alterando essa curva de rendimento.

Em 11/12/2.002, foi criado pelo Governo Federal, o Decreto nº 4.508, que estabelece em seu capítulo segundo, a regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização e uso no Brasil. Para tanto, o Art. 5º do mesmo decreto, apresenta uma tabela onde se encontra os níveis mínimos de rendimento nominal a serem atendidos por ambos os modelos (padrão e alto rendimento). A Tabela 3.2 a seguir reproduz esses

valores através dos quais se nota claramente que quanto menor o motor, menor será o seu rendimento mínimo exigido.

Tabela 3.2 – Rendimentos nominais mínimos para motores elétricos no Brasil. Fonte: ANEEL – Decreto nº 4.508/02 (2.002)

Potência Nominal		Padrão				Alto Rendimento			
		Número de Pólos				Número de Pólos			
cv	KW	2	4	6	8	2	4	6	8
1,0	0,75	77,0	78,0	73,0	66,0	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	78,5	79,0	75,0	73,5	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	81,0	81,5	77,0	77,0	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,2	81,5	83,0	78,5	78,0	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3	82,5	83,0	81,0	79,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	84,5	85,0	83,5	80,0	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	4,5	85,0	85,5	84,0	82,0	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	86,0	87,0	85,0	84,0	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	87,5	87,5	86,0	85,0	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	87,5	87,5	87,5	86,0	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	87,5	88,5	89,0	87,5	90,2	91,0	90,2	88,5
20	15	88,5	89,5	89,5	88,5	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	89,5	90,5	90,2	88,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	89,5	91,0	91,0	90,2	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	90,2	91,7	91,7	90,2	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	91,5	92,4	91,7	91,0	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	91,7	93,0	91,7	91,0	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	92,4	93,0	92,1	91,5	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,0	93,2	93,0	92,0	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	93,0	93,2	93,0	92,5	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	93,0	93,5	94,1	92,5	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	93,5	94,1	94,1		94,7	95,0	95,0	
200	150	94,1	94,5	94,1		95,0	95,0	95,0	
250	185	94,1	94,5			95,4	95,0		

Os motores elétricos são ainda classificados pela sua categoria de partida. Para motores trifásicos com rotor de “gaiola”, o mais comum na indústria segundo Mascheroni et al. (2.003), essas categorias, de acordo com a NBR 7.094, são:

- Categoria N ⇒ Constitui a maioria dos motores do mercado, sendo indicado para cargas normais. Ex.: bombas, máquinas operatrizes e ventiladores;

- *Categoria NY* ⇒ Semelhante a motores da *Categoria N*, porém previstos para partida estrela-triângulo;
- *Categoria H* ⇒ Trata-se de um motor usado para cargas que exigem maior torque na partida. Ex.: cargas de alta inércia, peneiras, correias transportadoras, britadores, etc;
- *Categoria HY* ⇒ Semelhante a motores da *Categoria H*, porém previstos para partida estrela-triângulo;
- *Categoria D* ⇒ Trata-se de um motor usado para cargas que apresentam picos periódicos e torques muito altos de partida. Ex.: elevadores, prensas excêntricas, pontes rolantes, etc.

Esta classificação avalia o torque e corrente de partida, além do escorregamento. Por conta disso os motores da *Categoria D* não são muito empregados na indústria devido ao alto fator de escorregamento (maior que 5%). A *Categoria H*, por sua vez, apresenta baixo escorregamento. Contudo, a *Categoria N* é a mais empregada na indústria atualmente (Martinez – 2.006 e Siemens – 2.007).

3.3 – VARIAÇÃO DE ROTAÇÃO DE BOMBAS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Os sistemas de bombeamento convencionais são operados usualmente através do controle da vazão obtido por válvulas tipo globo, gaveta ou borboleta, sendo manobradas de acordo com as necessidades operacionais de demanda.

Nessa operação o que se faz é o deslocamento do ponto de operação (intersecção da curva da bomba com a curva do sistema) através do aumento da perda de carga, progressivamente sobre a curva da bomba até se encontrar o ponto desejado para uma determinada vazão (Figura 3.9), com a bomba operando com rotação constante n .

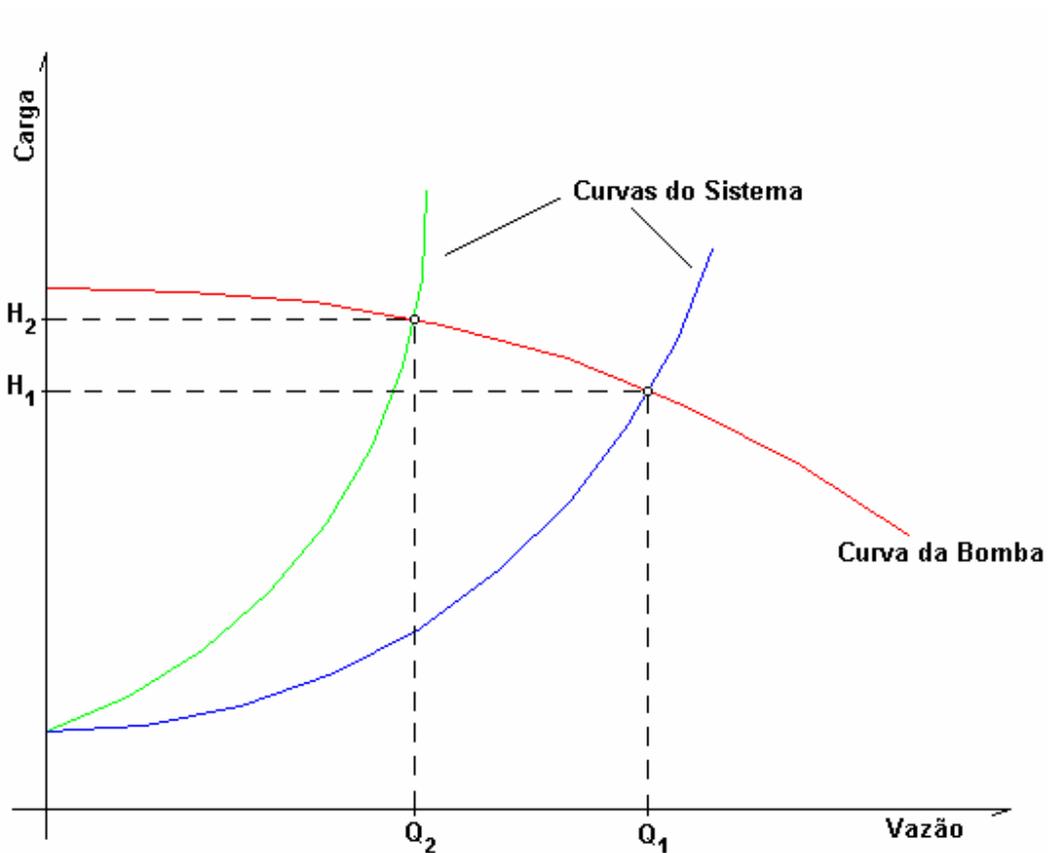


Figura 3.9 – Curva do sistema convencional com controle da vazão através de válvulas

Outro método bastante comum em instalações de bombeamento é o uso de um “by-pass” na saída do recalque, cuja função é o retorno de uma parcela da vazão recalçada à caixa ou reservatório de sucção fazendo com isso a dosagem da vazão aos níveis desejados.

Os usos desses expedientes operacionais penalizam, principalmente o primeiro deles, de forma drástica o sistema acarretando diversas desvantagens, uma delas é que a vazão máxima possível a ser controlada é aquela que passa pela tubulação quando o sistema não atua, ou seja, com a válvula de regulação totalmente aberta, não possibilitando assim nenhum incremento de vazão. Outra desvantagem e talvez a principal delas, é que a ação de regulação da válvula vai aumentando a perda de carga local e elevando, por conseguinte, a carga a montante da válvula de controle. Como a potência consumida pela bomba é proporcional à vazão e a carga, o que se tem é uma redução gradativa da vazão bombeada com um aumento de consumo (Armintor e Connors, 1.987; Brignol, 2.000; Viana, 2.001). Naturalmente, a vida útil dos equipamentos será comprometida, além do que toda essa energia excedente pode ser transmutada em vibração, provocando danos ao sistema de bombeamento, tubulações e válvulas, conforme observa Pemberton (2.005).

Wood e Reddy (1.994) definem muito bem esse tipo de operação dizendo ser o mesmo que “[...] conduzir um carro com o freio de mão acionado: o resultado é o desperdício desnecessário de energia”.

Em Brown (2.001), Irvine e Gibson (2.002), se observa exatamente a mesma citação. Ainda segundo Brown (2.001), estima-se que de toda energia elétrica utilizada pela indústria, 65% seja destinada a motores elétricos e que, do montante relativo a esse percentual, 20% seja desperdiçado por mecanismos de controle (ex.: válvula).

Deve-se considerar ainda quanto a conservação de energia, que os sistemas de bombeamento são projetados em função de uma vazão e altura manométrica, tendo como pano de fundo as curvas de eficiência das bombas. Nesses casos, a mudança do ponto de operação, acarretará num rendimento inferior das bombas aumentando o consumo de energia elétrica.

Ambas as alternativas aqui discutidas são visivelmente prejudiciais à operação da bomba, pois a mesma opera com rotação constante n e vazão Q_1 , enquanto que a instalação opera ao longo de sua rotina com outras vazões Q_2, Q_3, \dots , etc. , e que no máximo serão iguais a Q_1 . Em geral ou na maioria do tempo $Q_1 > Q_2$ e $Q_1 > Q_3$ (Viana, 2.001).

Em contraposição a operação anteriormente descrita, o inversor de frequência, através do controle da rotação do motor, promove a alteração da curva da bomba mantendo-se constante a curva do sistema ou instalação (Figura 3.10). Isso faz com que o consumo de energia seja proporcional à rotação do motor, ou seja, nem mais nem menos, apenas o necessário. Ainda com relação ao consumo de energia, nos projetos com inversores de frequência geralmente tem-se a preocupação de se analisar cuidadosamente as curvas de rendimento das bombas. Souza et al. (1.978), Vallilo et al. (1.981), Europump and Hydraulic Institute (2.004) e Gambica (2.007) sugerem, para o melhor aproveitamento do rendimento da bomba, que o ponto referente à demanda máxima esteja situado à direita da curva de melhor rendimento, com isso na maior parte do tempo de operação o sistema de bombeamento se encontrará nas máximas possibilidades de eficiência do equipamento. Crespo (2.001), em seu estudo sobre “Elevatórias nos Sistemas de Esgoto”, também apresenta a mesma sugestão.

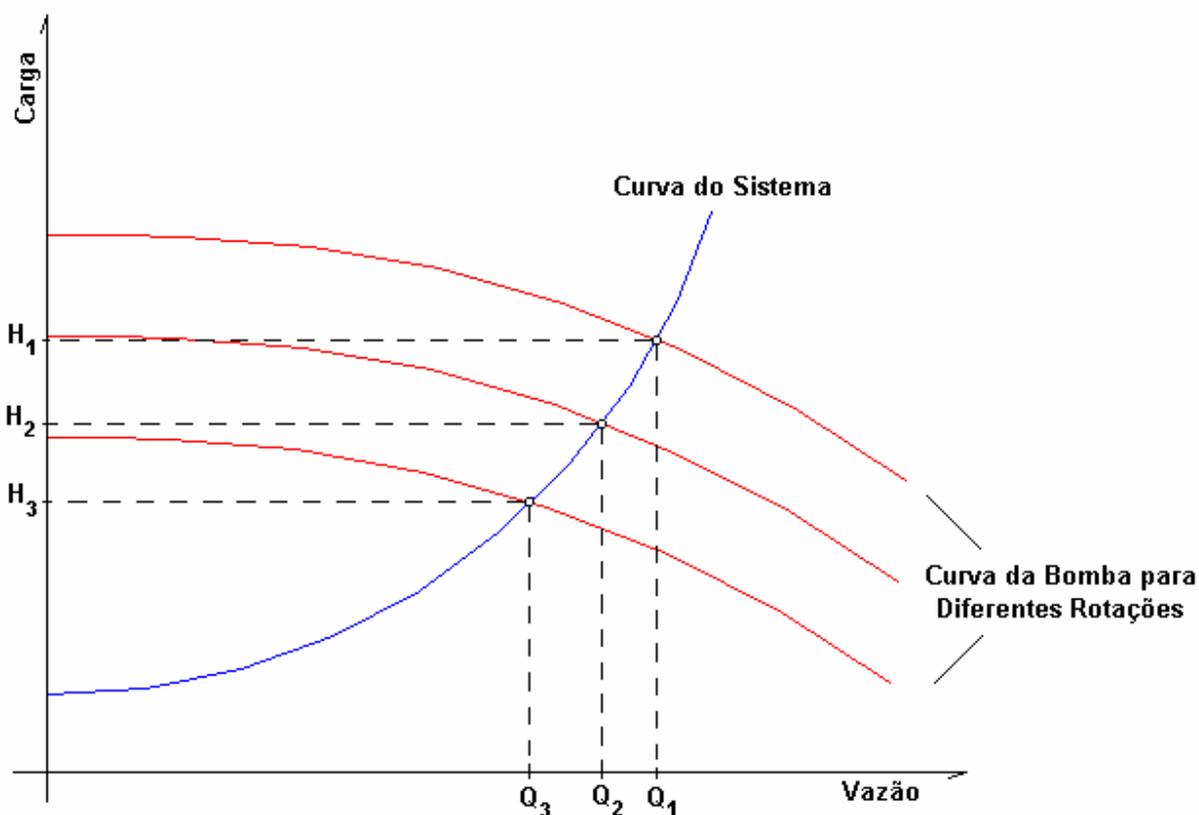


Figura 3.10 – Curva do sistema operado com inversor de frequência

Viana (2.001) sugere, como linha de conduta, em primeiro lugar a seleção adequada das bombas para as condições de trabalho desejadas, escolhendo aquelas de melhor rendimento. No quesito conservação de energia, esse mesmo autor enfatiza que um grande erro é a seleção da máquina superdimensionada, ou seja, muito além do que seria necessário para o sistema projetado, gerando um consumo excessivo de energia. Entretanto, essa sempre foi uma prática comum dos projetistas, cuja justificativa se baseava na garantia de uma margem de segurança ao sistema, conforme já citado anteriormente (Europump and Hydraulic Institute – 2.004, ABB – 2.005 e Gambica – 2.007).

Conforme Armintor e Connors (1.987), Oliveira Jr. (1.993), Wood e Reddy (1.994), Allen-Bradley (1.995), Casada et al. (2.000), Ilinski (2.000), Silva e Cortez (2.001), Brown (2.001), Irvine e Gibson (2.002), Mascheroni et al. (2.003), Rooks e Wallace (2.004), Europump and Hydraulic Institute (2.004), Almeida et al. (2.005), Pemberton (2.005) e Carter (2.006), as principais vantagens de sistemas dotados de inversores são:

- Economia significativa de energia elétrica \Rightarrow Pelas Leis de Semelhança, sendo a vazão diretamente proporcional à rotação, e a potência diretamente proporcional à rotação elevada ao cubo, verifica-se que para um menor valor de vazão recalçada haverá também uma potência consumida correspondente muito menor;
- Controle de velocidade submetendo assim o conjunto a uma carga muito menor \Rightarrow Conforme evidenciado na Figura 3.10, cada valor de vazão corresponderá a um valor de carga que será menor em função da redução de rotação, se comparado com o sistema convencional de controle de vazão (Figura 3.9);
- Boa eficiência \Rightarrow Estudos mostram que o uso associado de Inversores de Frequência sugere a avaliação do ponto ou faixa de operação em que o sistema mais opera e sua relação com as curvas de rendimento do conjunto moto-bomba, buscando assim explorar a maior possibilidade de ganho. Testes de rendimento do motor, do “drive” de inversor de frequência e do conjunto associado apresentaram excelentes índices. Somente os Inversores de Frequência apresentaram rendimento acima de 95%;

- As pressões no sistema são mantidas bem próximas aos níveis mínimos requeridos;
- As perdas físicas, diretamente ligadas à pressão, se minimizam;
- Controle operacional das bombas simplificado \Rightarrow A ação de controle da vazão se dá diretamente com a mudança da rotação, o que acontece de forma suave, segura e confiável. Essa ação pode ser feita diretamente no painel elétrico da Casa de Bombas ou mesmo à distância pelo Centro de Controle Operacional (CCO) fazendo o ajuste requerido;
- Melhor resposta em situações emergenciais \Rightarrow Aumento de vazão para atendimento a incêndio, fechamentos em casos de rompimentos com minimização dos efeitos do regime transitório, etc.;
- Eliminação do transitório causado com o acionamento e a parada de bombas \Rightarrow Como a ação do inversor de frequência se faz de forma lenta e gradativa, tanto no acionamento como na parada, existe um tempo entre a intervenção propriamente dita e o resultado final esperado, ou seja, o conjunto moto-bomba vai acelerando ou desacelerando, de acordo com a parametrização da rampa, de forma lenta e contínua. Com isso desaparecem as perturbações geradas pelos transitórios. As ações de acionamento e parada com o inversor reduzem o “stress” no motor, bomba e acoplamento;
- Controle do fator de potência, uma vez que o lado da rede tem contato com o retificador não controlado, resultando assim um excelente fator de potência (próximo de 1);
- “By-pass” de operação em caso de falha do inversor. Se o inversor falhar, o motor pode ser operado diretamente na linha de entrada em operação contínua convencional;

- Eliminação da alta corrente de partida e redução do pico de demanda (kVA) \Rightarrow O inversor de frequência se adapta para evitar sobrecargas causadas pela aceleração de alta carga de inércia;
- Manutenção sem necessitar estar conectado ao sistema, bem como a redução desses custos;
- Alimenta tanto motores assíncronos como síncronos;
- O Sistema de pulsos (PWM – Pulse Width Modulation) permite uma faixa de variação de frequência de 0 à 100%;
- A tensão constante no circuito intermediário alimenta um barramento DC onde é possível conectar vários inversores de frequência em paralelo, um banco de baterias ou um banco de capacitores para suprimento de energia em caso de queda da rede;
- Aumento da vida útil da bomba, mancais e vedações pela diminuição do desgaste mecânico \Rightarrow Como o sistema dotado de inversor atua na medida exata das necessidades operacionais, haverá uma preservação maior dos equipamentos e acessórios aumentando a vida útil;
- Redução do nível de ruído e vibração \Rightarrow Em sistemas convencionais as condições de baixa vazão são sempre acompanhadas por ruídos e vibrações, geralmente causadas pela válvula de controle que se encontram nesse caso parcialmente abertas, além de efeitos de cavitação;
- Operação simultânea com vários motores;
- Emprego em áreas e ambientes sensíveis, como aquelas em que se requerem motores a prova de explosão, resistência a ambientes e atmosferas químicas agressivas, entre outras;

- Método de interfaceamento simplificado para sinais de controles externos (0 – 10 V ou 4 – 20 mA) proveniente de transmissores;
- Redução de problemas de cavitação no sistema de bombeamento associados a operação de válvulas de controle a baixo fluxo;
- Simplificação na rede de dutos através da eliminação de válvulas para o controle da vazão;
- Redução da emissão de CO₂ e gases na atmosfera, quando se avalia o processo industrial como um todo ⇒ A queda no consumo de energia elétrica conduzirá a menor necessidade de geração, principalmente quando isso se dá por termelétricas ou geradores a óleo diesel. Com isso os impactos ao meio ambiente tendem a se reduzirem.

Já as desvantagens, segundo Allen-Bradley (1.995), Casada et al. (2.000), Irvine e Gibson (2.002), Mascheroni et al. (2.003), Everhart (2.004), Europump and Hydraulic Institute (2.004), Almeida et al. (2.005), Pemberton (2.005) e Gambica (2.007), são:

- Custo inicial relativamente alto;
- O inversor de frequência requer conversores de potência além de técnicos especializados, devido aos circuitos sofisticados;
- Introdução de distorções harmônicas da tensão, provocada pelo processo de conversão de potência e emissão de interferências eletromagnéticas ⇒ Alteração da onda senoidal perfeita da rede elétrica concessionária. Nos Estados Unidos existe legislação específica a respeito desse assunto que limita a emissão de correntes harmônicas;
- Elevação da temperatura na superfície dos motores localizados em áreas de risco, ultrapassando o limite máximo de temperatura permitida para o local ⇒ Estando a

ventilação acoplada ao eixo do motor, a redução da rotação promoverá um aumento na temperatura do mesmo o que poderá causar explosões se instalado em locais ou atmosferas de risco (produtos inflamáveis). Esse é um problema muito comum em indústrias petroquímicas;

- Atenção especial deve ser dedicada aos cabos que devem ser de baixa impedância para alta frequência ⇒ Como a frequência de chaveamento ou acionamento dos Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) é alta, alguns tipos de cabos podem não suportar provocando a queima por aquecimento;
- Limitada distância entre o drive do inversor de frequência e o motor ⇒ Em casos de distância muito grande entre o Inversor e o Motor, excedendo o limite máximo, implicará na necessidade de inserção de outros equipamentos adicionais, tais como: filtro de Interferência de Frequência de Rádio (RFI) e reator de linha;
- Retorno discreto dos benefícios ou subutilização do equipamento em virtude da má localização de sensores no sistema, cuja função essencial é a emissão de parâmetros que servirão de referência ao inversor de frequência para as correções necessárias na velocidade ⇒ Implementação de sensores de pressão, vazão e nível em pontos críticos do sistema aumentando o custo do investimento;
- Limitação do uso em sistemas de bombeamento de líquidos com partículas em suspensão ⇒ Esse tipo de sistema requer uma velocidade mínima de bombeamento e sem a qual haverá deposição de partículas ao longo da tubulação, podendo vir a ocorrer o comprometimento da capacidade de transporte pela obstrução parcial da seção da tubulação de recalque;
- Alteração dos Parâmetros da Bomba ⇒ A operação com o inversor de frequência afetará parâmetros significativos da bomba com a mudança de velocidade como: o rendimento, o Net Positive Suction Head (NPSH), a potência, etc.;

- Possibilidade de dano na isolação dos motores, provocado pelos altos picos de tensão decorrentes da rapidez do crescimento dos pulsos gerados pelo inversor de freqüência, bem como a alta freqüência com que esses pulsos são produzidos. O aumento da temperatura decorrente da redução de velocidade e conseqüente queda na ventilação também poderá afetar os materiais isolantes do motor;
- O inversor de freqüência pode requerer a instalação em ambientes menos agressivos dos que os motores geralmente ficam. Os componentes eletrônicos são menos tolerantes a locais corrosivos e com umidade.

De qualquer maneira tão importante quanto as análises técnicas, são as análises dos custos relacionados com o consumo operacional. Lembrando Viana (2.001) quando diz “[...] custos iniciais, muitas vezes, podem ser altos para que o operacional (custo), ao longo de um tempo, torne-se baixo”.

3.3.1 – O INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A partir da necessidade de um controle mais eficaz e menos agressivo aliado ao desenvolvimento tecnológico dos semicondutores de potência, tais como GTO (Gate Turn-Off Thyristor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), MCT (MOS Controlled Thyristor) ou SITH (Static Induction Thyristor), etc., conjuntamente com a disponibilidade cada vez maior de

microprocessadores, microcontroladores e DSP (Digital Signal Processors), foi possível tornar o inversor fonte de tensão, ou simplesmente inversor de frequência, em uma excelente alternativa ao controle de rotação de motores elétricos, incidindo diretamente na conservação de energia, conforme Silva e Cortez (2.001).

Os inversores de frequência são equipamentos eletrônicos acoplados, entre outros, aos conjuntos moto-bomba, cuja função é o acionamento com o controle da velocidade de rotação dos motores elétricos a corrente alternada (AC). Atualmente são montados com tecnologia SMD (Surface Mounting Device), ou seja, cada lado da placa de circuitos eletrônicos se assenta dispositivos diferentes o que reduz ainda mais o seu tamanho.

O processo se desenvolve pela variação do fluxo magnético que é proporcional à variação da tensão e da frequência. De acordo com Wilk (2.000), é importante observar que para se manter o torque constante é preciso manter também o fluxo magnético constante. Desta forma, terá que se variar a tensão conjuntamente com a frequência. Essa variação é linear até a frequência nominal do motor. Acima da frequência nominal determina-se uma região chamada de “*enfraquecimento do campo*” (Figura 3.11), onde o fluxo começa a decrescer e, portanto, o torque também. A potência também mantém a mesma relação de variação com a tensão e a frequência.

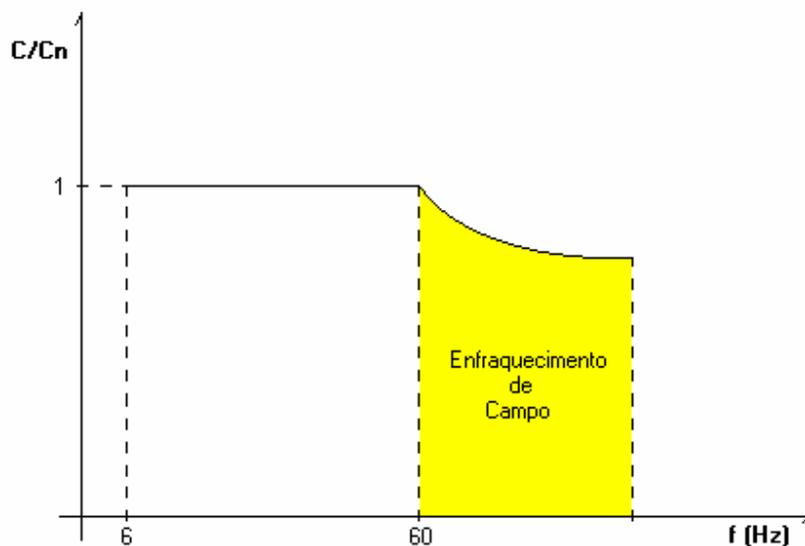


Figura 3.11 – Gráfico da variação do torque com a frequência (Fonte: Mascheroni et al. – 2.003)

Os inversores de frequência são formados basicamente por uma ponte retificadora e dois capacitores de filtro, que alimentam um barramento DC, que por sua vez alimenta transistores IGBT's que são comandados através de uma lógica de controle, ligando e desligando-os de modo a alternarem o sentido da corrente que circula pelo motor. As Figuras 3.12 e 3.13 ilustram, através de diagramas simplificados, os inversores de frequência para motores monofásicos e trifásicos.

Capelli (2.001) analisando o inversor de frequência monofásico (Figura 3.12), demonstra que quando em operação o que se tem é o acionamento dos transistores dois a dois, por exemplo, ligando os transistores IGBT's T_1 e T_4 , e desligando os demais T_2 e T_3 , e vice-versa alternando assim o sentido da corrente conforme descrito anteriormente (Figuras 3.14 e 3.15).

Na operação com motores trifásicos a lógica é a mesma (Figura 3.13), a diferença agora é que os pulsos são distribuídos pelos 6 transistores IGBT's associados três a três, formando na saída uma tensão alternada defasada de 120° uma da outra. A Figura 3.16 exemplifica uma das possíveis associações no caso trifásico.

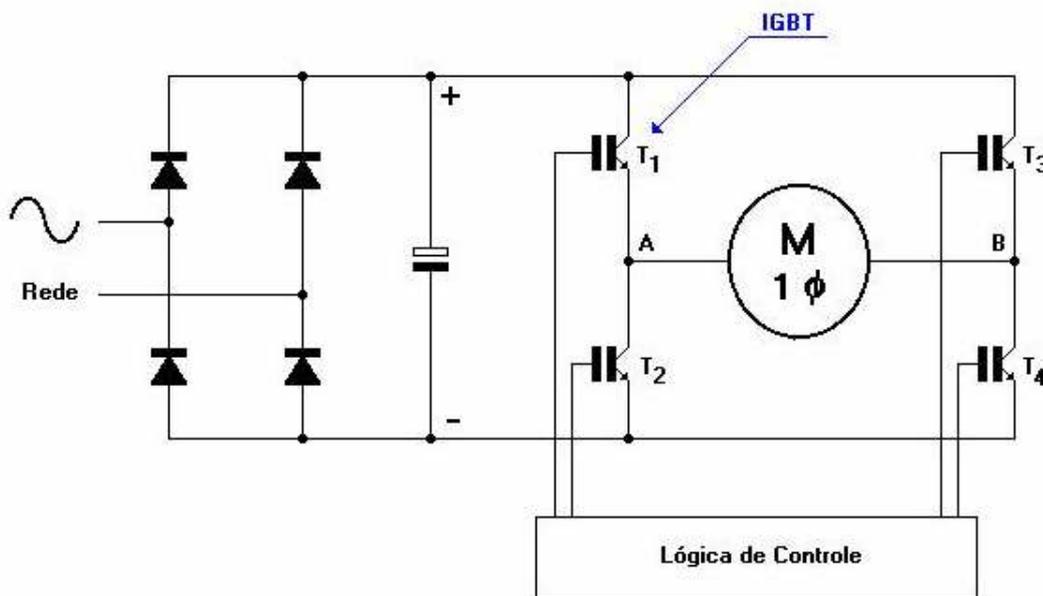


Figura 3.12 – Esquema de um inversor de frequência monofásico. Fonte: Capelli (2.001 e 2.002)

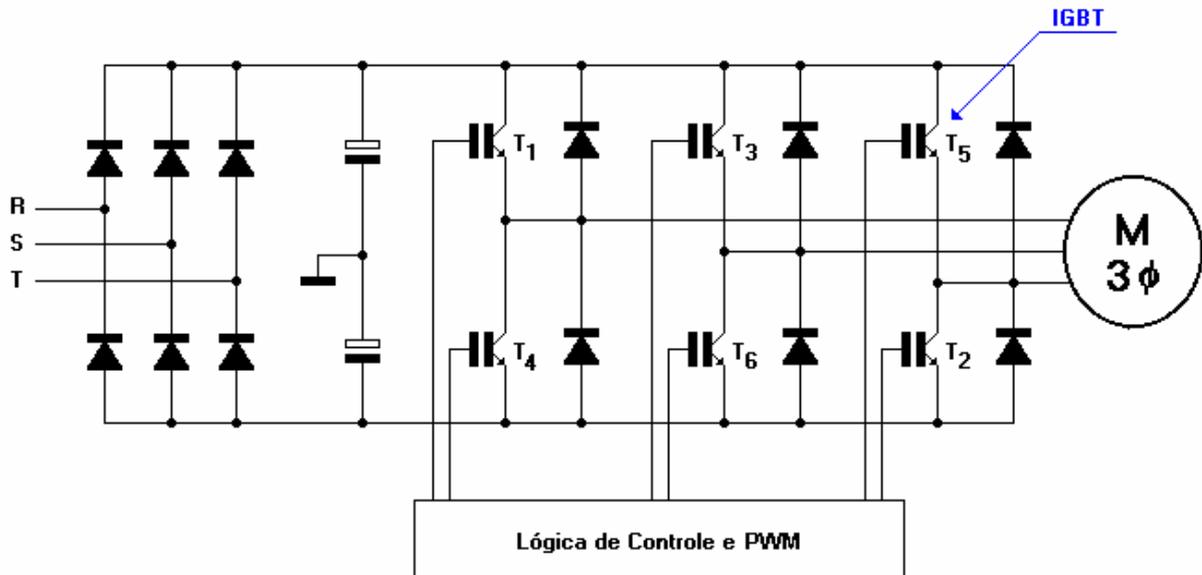


Figura 3.13 – Esquema de um inversor de frequência trifásico. Fonte: Capelli (2.001 e 2.002)

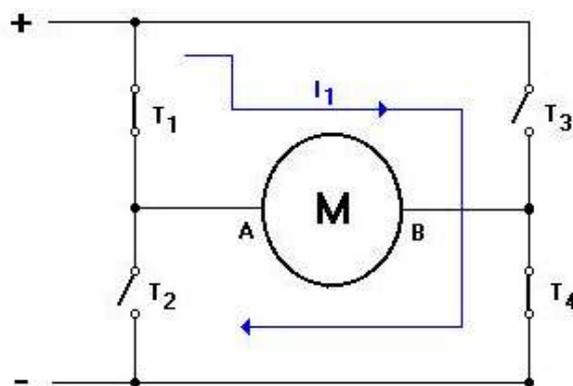


Figura 3.14 – Sentido de circulação da corrente de A para B. Fonte: Capelli (2.001 e 2.002)

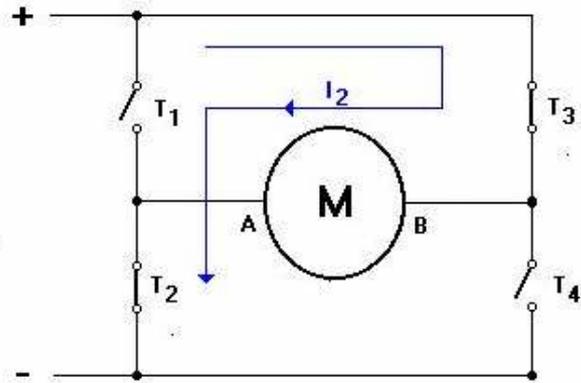


Figura 3.15 – Sentido de circulação da corrente de B para A. Fonte: Capelli (2.001 e 2.002)

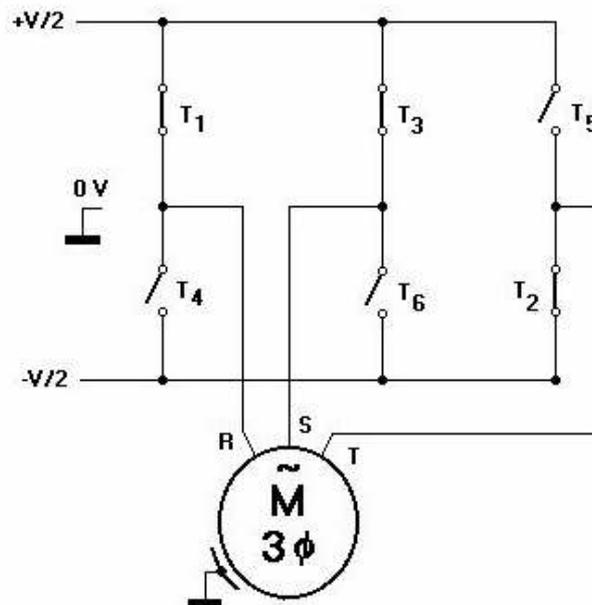


Figura 3.16 – Esquema de acionamento dos transistores IGBT's no motor trifásico. Fonte: Capelli (2.001 e 2.002)

Analisando essa associação torna-se mais claro a lógica operacional. Considerando somente os transistores T_1 , T_2 e T_3 ligados, tem-se a tensão $+\frac{V}{2}$ e $-\frac{V}{2}$ no barramento DC que possui referência do terra (no centro). As possibilidades nesta operação seriam as tensões V_{RS} , V_{ST} e V_{TR} agindo em função dos transistores ligados. Assim as diferenças de potencial entre R-S, S-T e T-R, seriam:

$$V_{RS} = +\frac{V}{2} - \left(+\frac{V}{2}\right) = 0$$

$$V_{ST} = +\frac{V}{2} - \left(-\frac{V}{2}\right) = +V$$

$$V_{TR} = -\frac{V}{2} - \left(+\frac{V}{2}\right) = -V$$

Todas as associações possíveis de chaveamentos dos transistores gerarão 3 formas-de-onda conforme Tabela 3.3 e, representadas na Figura 3.17. Capelli (2.001) e (2.002) observa que as possibilidades de associações dos transistores T_1 , T_3 , T_5 e T_2 , T_4 , T_6 não são válidas, pois ligam todas as fases do motor no mesmo potencial. Desta forma, não há diferença de potencial e, conseqüentemente, não há energia para movimentação do motor elétrico.

Tabela 3.3 – Associações dos transistores IGBT's em inversores de frequência trifásicos. Fonte: Capelli (2.002)

Tempo	Chaveamentos	Tensões		
		V_{RS}	V_{ST}	V_{TR}
1º	T_1, T_2, T_3	0	+ V	- V
2º	T_2, T_3, T_4	- V	+ V	0
3º	T_3, T_4, T_5	- V	0	+ V
4º	T_4, T_5, T_6	0	- V	+ V
5º	T_5, T_6, T_1	+ V	- V	0
6º	T_6, T_1, T_2	+ V	0	- V

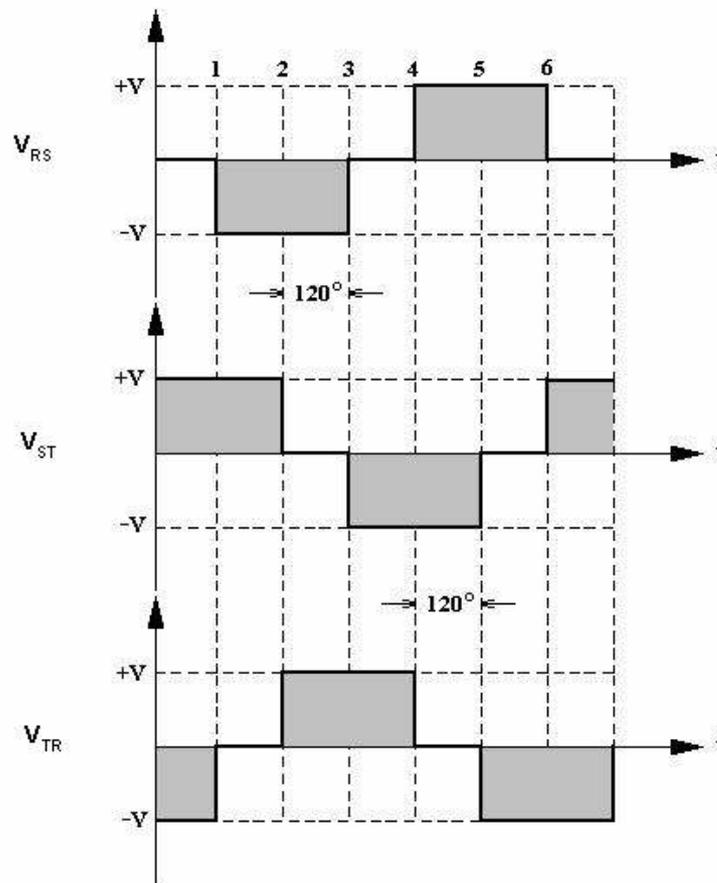


Figura 3.17 – Forma de ondas da tensão. Fonte: Capelli (2.001 e 2.002)

Essa combinação de abertura e fechamento dos IGBT's é controlada a partir da estratégia PWM (Pulse Width Modulation), ou simplesmente modulação por largura de pulso. Esta estratégia permite a geração de ondas senoidais de frequência variável com resolução de até 0,01 Hz (Casada et al., 2.000 e Mascheroni et al., 2.003).

Existem dois tipos de inversores de frequência que são caracterizados pelo seu princípio de controle, o escalar e o vetorial. Alguns inversores disponíveis hoje no mercado já incorporam os dois tipos de controle num mesmo equipamento, bastando para tanto a correta

parametrização do equipamento quanto ao tipo desejado. Com o inversor operando com controle escalar, o motor elétrico produzirá um ruído que se assemelha a um assovio, variando sua intensidade de acordo com a velocidade de rotação, já no controle vetorial esse ruído não é verificado. Segundo o fabricante WEG, isso ocorre porquê no controle vetorial a onda gerada se aproxima muito mais de uma onda senoidal perfeita, enquanto que no escalar não. Essa diferenciação será mais bem discutida adiante.

Quanto ao dimensionamento dos inversores, ele é feito a partir dos dados da tensão e da corrente nominal do motor elétrico, facilmente combinados com o auxílio do catálogo do fabricante.

Outras funções especiais são verificadas no equipamento, como a possibilidade de conexão de um inversor de frequência em redes rápidas de comunicação, denominadas “Field Bus”, proporcionando elevada performance de atuação e grande flexibilidade operacional. São encontrados ainda no mercado equipamentos com kit módulo de interface serial, para uso com um microcomputador. Alguns deles, como o do fabricante WEG, dispõem de software próprio para operação (“Super Drive 5.1”) e regulador PID (Proporcional / Integral / Derivativo).

3.3.2 – TIPOS DE INVERSORES

Conforme menção anterior, existem dois tipos de inversores de frequência disponíveis no mercado: o escalar e o vetorial. A diferença entre o controle escalar e o vetorial está basicamente na curva torque \times rotação.

O inversor escalar opera tendo como referência uma curva V/F (tensão por frequência). Assim, para que o torque na carga se mantenha constante essa relação tem que ser mantida na mesma proporção, ou seja, ao se variar a frequência de alimentação do motor o inversor de frequência escalar deve variar a tensão de alimentação de tal forma que a relação entre ambos seja sempre a mesma. Por ser uma função da relação de V/F, este tipo de inversor não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação. Este tipo de inversor permite ainda a parametrização da curva V/F, sendo indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e operação com constantes reversões.

O inversor vetorial não possui uma curva parametrizada, na verdade essa curva varia de acordo com a solicitação de torque, portanto este possui circuitos que variam a tensão e a frequência do motor, através do controle das correntes de magnetização (IM) e do rotor (IR). Este tipo de inversor é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável.

Conforme Capelli (2.001 e 2.002), a função de um inversor de frequência não se limita a controlar a velocidade de um motor AC. Ele precisa manter o torque constante para que não haja alteração na rotação. De acordo com Wilk (2.000), Capelli (2.002), Irvine e Gibson (2.002) os inversores são classificados em quatro blocos (Figura 3.18):

- 1º bloco – CPU (unidade central de processamento). É formada por um microprocessador ou um Controlador Lógico Programável (CLP). Neste bloco todos os parâmetros e dados do sistema são armazenados. Executa ainda funções vitais como: geração de pulsos de disparos dos IGBT's, que nada mais são que transistores que fazem a conexão do circuito, alterando o sentido da corrente que circula no motor;
- 2º bloco – IHM (interface homem máquina). Esse dispositivo permite visualizar de que forma o inversor está parametrizado e se necessário ser alterado;

- 3º bloco – Interfaces. Permite a interação externa com o inversor de frequência executando comandos que podem ser analógico ou digital. Normalmente para controle da velocidade de rotação utiliza-se tensão analógica de comando (situada entre 0 e 10 Vcc), sendo que essa velocidade será proporcional ao seu valor;
- 4º bloco – Etapa de Potência. É constituída por um circuito retificador que alimenta através de um barramento de corrente contínua (DC), o módulo IGBT.

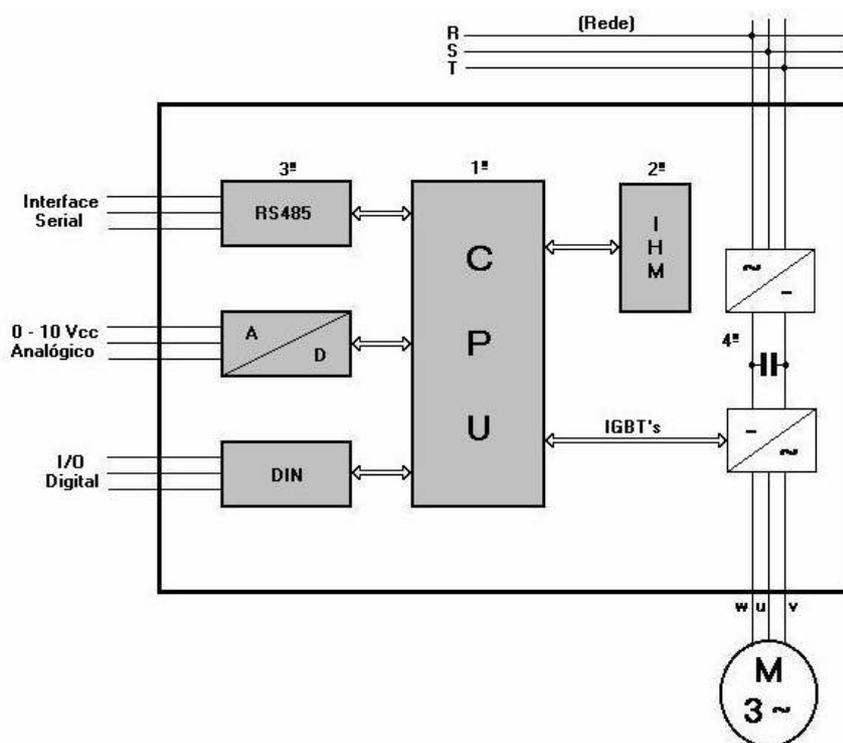


Figura 3.18 – Diagrama base de um inversor de frequência. Fonte: Capelli (2.002)

O inversor também altera a tensão oriunda do barramento DC através da modulação por largura de pulso (PWM). Quando a tensão tem que aumentar, os pulsos são alargados, quando precisa diminuir, os pulsos são estreitados (Casada et al., 2.000).

3.4 – EFEITO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NO BOMBEAMENTO

Com a alteração da rotação, observada as leis de semelhança física das máquinas hidráulicas rotativas (Allen-Bradley – 1.995; Wilk – 2.000; Crespo – 2.001; Viana – 2.001; Brown – 2.001; Lee – 2.001; Alves et al. – 2.002; Irvine e Gibson – 2.002; Everhart – 2.004; Europump and Hydraulic Institute – 2.004; Pemberton – 2.005; Theisen – 2.005; Gambica – 2.007), definidas nas equações de 1 a 5, as curvas de funcionamento da bomba (carga x vazão, etc) são alteradas, mudando assim o ponto de operação do sistema (Figura 3.10).

$$\frac{Q_1}{N_1} = \frac{Q_2}{N_2} \quad \text{Relação vazão x rotação} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{N_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2} \quad \text{Relação carga x rotação} \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{N_1^3} = \frac{P_2}{N_2^3} \quad \text{Relação potência x rotação} \quad (3)$$

$$\frac{T_1}{N_1^2} = \frac{T_2}{N_2^2} \quad \text{Relação torque x rotação} \quad (4)$$

$$\frac{NPSH_{R1}}{N_1^2} = \frac{NPSH_{R2}}{N_2^2} \quad \text{Relação NPSH Requerido x rotação} \quad (5)$$

Para exemplificar o controle exercido pela variação da rotação sobre as características do bombeamento, com base nas leis de semelhança fornecidas acima, seja a curva carga x vazão ($H \times Q$), para a rotação nominal (ou de referência N_R), dada por um ajuste polinomial de segunda ordem da curva do fabricante:

$$H = a + bQ + cQ^2 \quad \text{Curva carga } \times \text{ vazão para a rotação nominal } N_R \quad (6)$$

a curva carga x vazão para uma rotação qualquer N , poderá ser escrita com base nas equações de 1 a 6 como:

$$H = \left(\frac{N}{N_R}\right)^2 a + b\left(\frac{N}{N_R}\right)Q + cQ^2 \quad \text{Curva carga } \times \text{ vazão para rotação } N \text{ qualquer} \quad (7)$$

sendo, a , b e c coeficientes de ajuste da curva. A dependência da rotação N com a frequência f , sem levar em consideração o efeito do escorregamento, é dada pela relação:

$$N = \frac{120 \times f}{P} \quad (8)$$

Onde: P é o numero de pólos do motor AC. Tomando a rotação nominal para a frequência de 60 Hz, então a equação 7 pode ser posta na dependência da frequência como:

$$H = \left(\frac{f}{60}\right)^2 a + b\left(\frac{f}{60}\right)Q + cQ^2 \quad (9)$$

As demais curvas características da bomba, como as curvas de torque e de potência, podem ser obtidas de forma análoga a apresentada para a curva de carga, no caso particular da potência:

$$P = \left(\frac{f}{60}\right)^3 c + d\left(\frac{f}{60}\right)^2 Q + eQ^2 \quad (10)$$

com c , d e e , coeficientes de ajuste da curva de potência.

Como descrito anteriormente, no caso do inversor escalar é mantida a relação V/F, assim para os valores nominais de tensão de 360 V, na frequência de 60 Hz, $V/F = 6$, podendo ser construído o gráfico da Tensão de Alimentação \times Frequência. (Figura 3.19) e, observar sua relação direta com as equações (9) e (10). Cabe observar que para valores de frequência superiores a 60 Hz (bomba trabalhando acima de sua rotação nominal), a relação V/F não se mantém constante. Assim como o torque é uma função da corrente de alimentação, ao abaixá-la, devido a redução da relação tensão/frequência, o torque cai, podendo produzir sobressaltos no motor, conforme observado por Capelli (2.001).

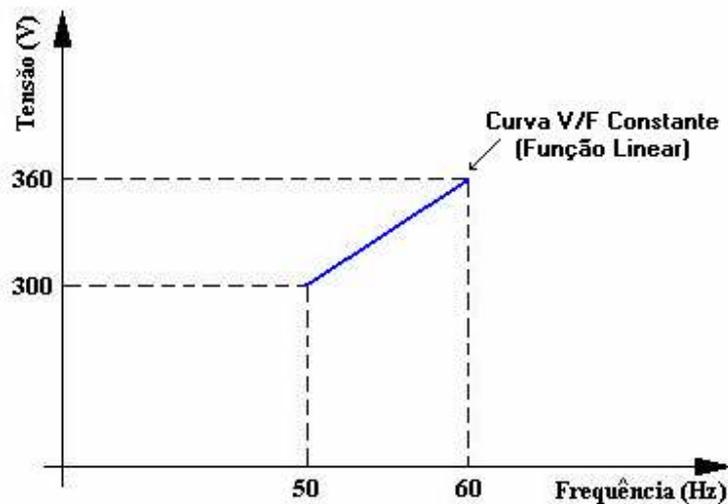


Figura 3.19 – Curva tensão \times frequência. Fonte: Capelli (2.002)

3.5 – INVERSORES DE FREQUÊNCIA EM EMPRESAS DE SANEAMENTO – “O ESTADO DA ARTE”

Por se tratar de um tema ainda pouco estudado em suas especificidades e tendo como foco principal do trabalho de pesquisa as empresas de saneamento do país, fato este plenamente justificado pela ausência de bibliografia disponível, houve entendimento de que o conhecimento das experiências de empresas de saneamento com variação de velocidade de bombas seria de grande importância para compor o processo investigativo e de pesquisa proposto.

Assim, foram eleitas as empresas *SANASA – Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A* e *SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo* como referências pelos seus respeitáveis corpos técnicos e pela inegável importância de ambas no cenário nacional.

3.5.1 – SANASA

A *SANASA* iniciou em 1.997, estudos com a finalidade de automatizar os Centros de Reservação e Distribuição (CRD), para tanto foi criado um “*Grupo de Automação*” formado por equipes multidisciplinares de operação, manutenção, controle de perdas, projeto e informática. A autonomia desse grupo lhe permitia definir parâmetros, áreas de implantação, recursos, sistemas, técnicas operacionais,..., etc., enfim tudo em se tratando de automação e, por conseguinte, o uso

de inversores de frequência. Curiosamente ninguém do setor de planejamento da empresa foi envolvido nesse grupo de trabalho.

Os estudos que se iniciaram foram motivados por:

1. Automação dos CRD's, com conseqüente retirada dos Operadores do local ⇒ A função dos operadores nesses locais é basicamente o acionamento e a parada do sistema de recalque além do controle dos níveis operacionais.

A operação de acionamento de bombas era feita com a válvula (gaveta ou borboleta) a jusante das bombas inicialmente fechada. Ligavam-se as bombas que passavam a recalcar para o barrilete bloqueado, só então o operador procedia a abertura gradual da válvula até atingir a vazão desejada.

Na parada o procedimento era o inverso, ou seja, com o sistema de bombeamento operando era feito o fechamento gradual da válvula a jusante das bombas, bloqueando o fluxo das linhas ou adutoras e só então se desligavam as bombas. Esse procedimento é extremamente danoso aos materiais e aos equipamentos, principalmente este último, sem falar no consumo desnecessário de energia elétrica, conforme já exaustivamente comentado anteriormente.

Nem sempre essa conduta operacional funcionava bem, pois dependia e muito da qualidade profissional do operador. Por se tratar de serviço essencial, com operação contínua (24 horas) dos CRD's, eram comuns as falhas que acabavam por causar transbordamento de reservatórios e imprecisão na leitura dos dados (vazão, pressão, níveis operacionais, etc.), afetando assim a rotina do Centro de Controle Operacional (CCO). Neste sentido, a automação dos CRD's permitiu um controle aprimorado, seguro e eficaz das unidades, substituindo por informações "on-line" aquelas que eram feitas via rádio em intervalos de uma hora.

2. Controle de Perdas ⇒ Fato oriundo do transbordamento de reservatórios, causado por falhas operacionais como relatado anteriormente, além do bombeamento contínuo, desnecessário em horários de baixo consumo, principalmente durante o período noturno, onde são alimentados praticamente vazamentos não aparentes.
3. Transmissão de dados on-line para o CCO ⇒ No passado essas informações eram enviadas ao CCO a cada uma hora. Esse espaço de tempo provocava uma enorme lacuna entre as leituras o que, em determinados casos, ocasionava desabastecimento, pois se alguma anomalia ocorresse nesse período ou se os dados passados verbalmente por rádio pelos operadores não estivessem corretos, o que também não era raro, ações demandadas para correção demoravam horas, influenciando diretamente a distribuição com falta de água ou pouca pressão até a sua total regularização.
4. Redução do Bombeamento no Horário de Pico ⇒ Visando a redução dos gastos, principalmente com energia elétrica para aquelas estações de bombeamento com tarifação horo-sazonal.

Como se vê o controle, a eficiência, a economia e a segurança podem ser apontadas como as principais razões que levaram a *SANASA* a empregar inversores de frequência.

Inicialmente, conforme informações do “*Grupo de Automação*”, foram várias as técnicas de aplicação de atuadores idealizadas para a automação, até por uma ausência maior de conhecimento sobre o assunto.

As primeiras discussões se deram sobre a utilização de atuadores elétricos instalados em válvulas já existentes, *soft starter* e inversores de frequência. Buscou-se então por informações em outras empresas e locais que se utilizavam dessa tecnologia que pudessem ajudar na escolha do melhor caminho a ser seguido dentro das disponibilidades e necessidades da *SANASA*.

Em função da experiência observada nessas empresas, chegou-se a conclusão que os atuadores elétricos não seriam uma boa opção. Normalmente as válvulas que seriam adaptadas a

este dispositivo eram antigas ou já se encontravam muito desgastadas pelo uso, necessitando assim de manutenção ou serem substituídas para que o sistema se tornasse adequado para a ação idealizada.

Com relação às outras duas opções, *soft starter* e inversor de frequência, estas se mostraram viáveis economicamente com o barateamento dos componentes eletrônicos e de sua instalação, independente do uso operacional (por ex.: bombeamento direto na rede de distribuição ou para um reservatório). De acordo com um membro do “*Grupo de Automação*”, ligado a Gerência de Projetos da *SANASA*, essa foi a primeira discussão surgida no campo de variação de velocidade.

O *soft starter* é um dispositivo para partida de motores elétricos, cuja principal característica é o controle da tensão sem que o torque seja constante em toda sua faixa de operação. Embora, como o próprio nome diz (partida suave), ele pode fazer também o desligamento de forma atenuada do sistema. O *soft starter* não varia frequência.

A Figura 3.20 ilustra a curva corrente \times torque de um sistema de recalque dotado de um *soft starter*. O gráfico característico deste dispositivo mostra que a partir de 85% (em média) de torque, quando a bomba começa efetivamente a recalcar, dependendo da inércia da coluna líquida a jusante, a corrente aumenta sensivelmente até provocar sobrecarga e o dispositivo desarmar. Para situações, como os casos de coluna líquida pequena, o *soft starter* seria indicado. Mais adiante serão apresentados os critérios que a *SANASA* adota como referência para instalação de *soft starter*. Em relação ao custo final, o *soft starter* é aproximadamente 50% mais barato que o inversor de frequência.

Já a análise quanto ao uso de inversor de frequência se baseou, fundamentalmente, em características do sistema de bombeamento, sendo:

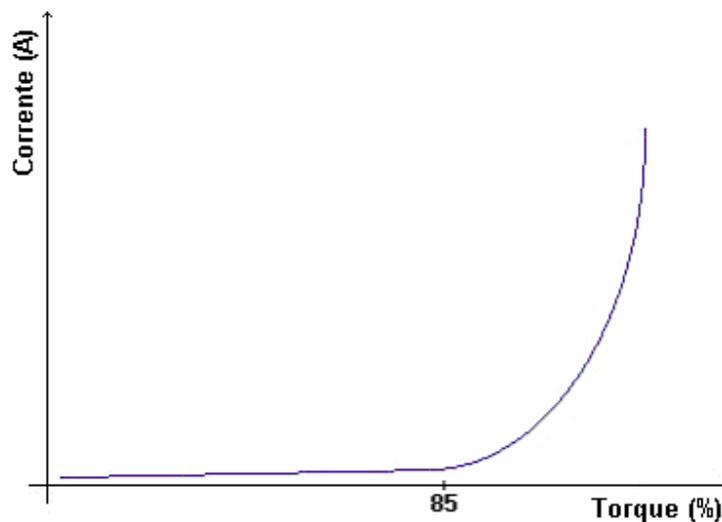


Figura 3.20 – Curva corrente × torque de um sistema de recalque com *soft starter*

- Reservatório com Entrada Superior (Controle Manual) ⇒ Nesse caso específico, o uso do inversor de frequência é destinado simplesmente ao acionamento e a parada das bombas (On/Off), sem uma variação da frequência propriamente dita. Seu controle se dá através de uma lógica que impõe qual a rampa de aceleração e desaceleração a ser empregada. A determinação da rampa é feita de forma empírica, limitada pelos níveis máximo e mínimo do reservatório em questão. Essa operação é comandada à distância pelo CCO.
- Reservatório com Entrada Inferior (Controle Automático) ⇒ O Reservatório trabalha como “sobra” sendo o recalque efetuado diretamente na rede de distribuição. Essa operação é limitada ao nível máximo do reservatório. Também nesse caso, a variação da velocidade com o emprego do inversor de frequência é discreta, conforme observado em Rodrigues e Luvizotto Jr. (2.003).

Quanto a especificação deste dispositivo, a *SANASA* fez a opção por alguns fabricantes, entre eles: ABB, Siemens, WEG, Telemecanique, Eaton e Toshiba. Essa opção se deu por informações obtidas junto a área de manutenção, em específico, do setor de manutenção elétrica, a partir de históricos de equipamentos dos fabricantes já empregados na empresa. Foram

desconsiderados como fornecedores fabricantes que apresentaram problemas de assistência técnica.

Segundo a Gerência de Manutenção da empresa, essa preferência inicial foi sendo substituída ao longo do tempo por fabricantes exclusivamente nacionais, que melhoraram seus equipamentos em qualidade, tornando-os extremamente competitivos com os concorrentes internacionais.

Esta gerência cita como exemplo, o custo de um inversor para um motor de 50 cv. O similar nacional teria um valor aproximado 50% menor que o importado. Essa diferença é observada também nos custos de manutenção, que seriam da ordem de 20% do valor que seria gasto com um aparelho importado. Outro fator relevante é quanto a disponibilidade de peças e materiais, que para os fabricantes nacionais, dependendo do caso, podem ser encontradas para pronta entrega, não sendo o caso, via de regra, dos equipamentos importados.

Nos dias atuais o custo final de um inversor freqüência se reduziu bastante. A Figura 3.21 apresenta num gráfico a relação do custo de um inversor pela potência do motor elétrico para as três faixas de tensão mais utilizadas (220, 380 e 440 V).

Os itens considerados pela *SANASA* como os mais relevantes na escolha de um inversor de freqüência são:

- Potência do inversor de freqüência \Rightarrow tem relação direta com a potência do motor;
- Corrente do inversor de freqüência \Rightarrow tem também relação direta com a corrente do motor, que em muitos casos são velhos. Segundo Brown (2.001), não é raro encontrar motores em operação com idade superior a 30 anos;
- Temperatura de operação do inversor de freqüência \Rightarrow 45 °C. Essa imposição se baseia no fato da perda de potência com a temperatura. Assim, por exemplo, um motor de 20 cv acoplado de um inversor de freqüência, com temperatura de operação estimada de 30 °C,

que perca 5 cv de potência a cada 5 °C de aumento sobre a temperatura de trabalho, para uma temperatura em ambiente confinado de uma Casa de Bombas de 45 °C, necessitaria de um equipamento para 35 cv;

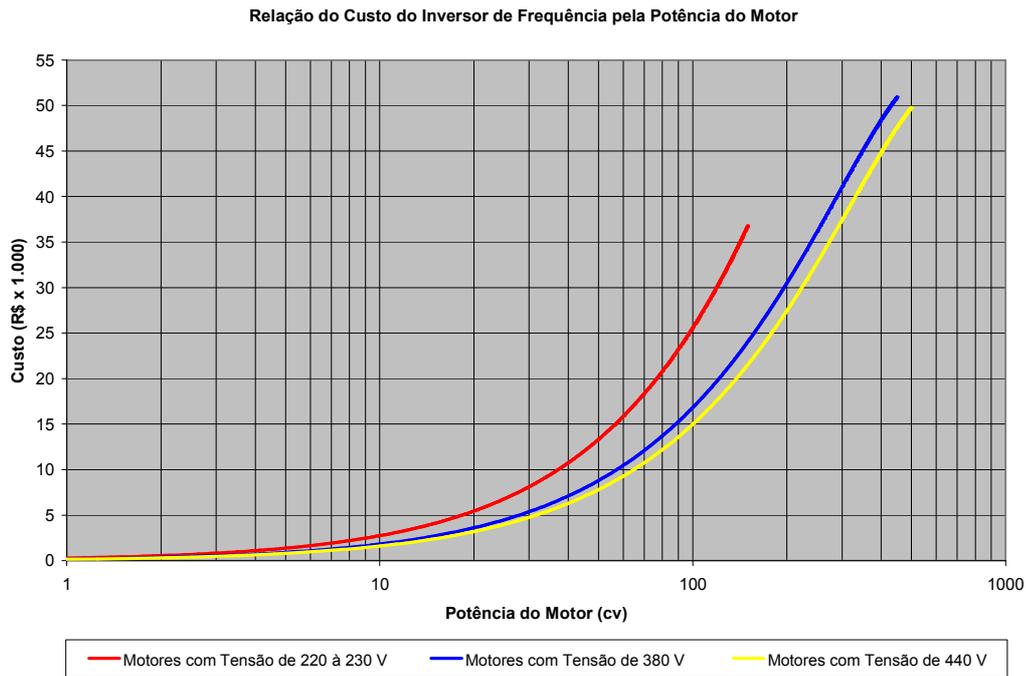


Figura 3.21 – Relação do custo do inversor de frequência pela potência do motor

- Distorção por frequências harmônicas na tensão de entrada (Figura 3.22) ⇒ Conforme Platts (2.005), os harmônicos são voltagens e frequências livres de correntes que alteram a onda senoidal normal quando combinadas. As mais comuns fontes de distorções harmônicas são equipamentos eletrônicos utilizando suprimento de potência chaveada, também chamadas de cargas não-lineares, como é o caso do inversor de frequência. Em cargas não-lineares a corrente não varia suavemente com a voltagem como acontece em cargas resistivas simples e reativas. Nesse caso, a cada chaveamento um pulso de corrente é gerado, tendo como resultado final um espectro de frequências harmônicas. A distorção verificada na voltagem é resultado da distorção na corrente reagindo com a impedância do sistema, que nada mais é que a medida total da resistência, capacitância e indutância em oposição ao fluxo de corrente alternada. Usualmente esses harmônicos são múltiplos da

freqüência fundamental, ou seja, sendo a freqüência nominal da rede 60 Hz, a 3ª harmônica será 180 Hz (3 x 60 Hz), a 5ª harmônica 300 Hz (5 x 60 Hz) e assim por diante. Segundo essa mesma publicação, a 3ª harmônica e seus múltiplos são o maior problema em circuitos de fase única. A correção da distorção harmônica pode ser feita através da instalação de filtros ativos, filtros passivos, isolação dos transformadores, transformador atenuador de harmônicos e sistema de supressão de harmônicos. Finalmente, a melhor maneira de lidar com esse tipo de problema é prevenir-se contra ele, escolhendo adequadamente os equipamentos e avaliando minuciosamente as instalações, de acordo com Platts (2.005).

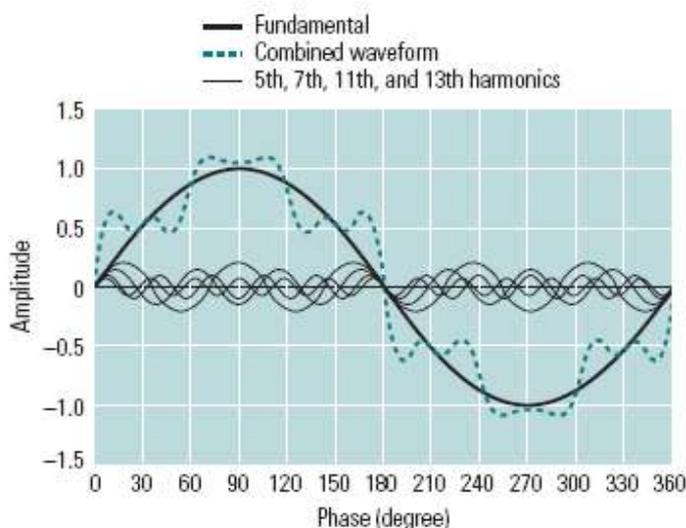


Figura 3.22 – Distorção provocada por freqüências harmônicas. Fonte: Platts (2.005)

Quanto aos tipos de inversores, o “*Grupo de Automação*” da *SANASA* classificou os inversores de ajuste Escalar como funcional, porém na atualidade está em desuso (tecnologia antiga) e os preços, atualmente se comparam aos inversores de ajuste Vetorial. Alguns fabricantes já dispõem dos dois tipos de controle incorporados a um mesmo modelo, cabendo ao usuário fazer a seleção na parametrização.

O mesmo “*Grupo de Automação*” ainda estabeleceu, em conclusão aos estudos que se desenvolveram, os critérios que determinam a escolha entre inversor de frequência e *soft starter*, são eles:

- Para Bombas com Potência < 5 cv \Rightarrow Não se aplica nenhum dos dispositivos e a partida é direta sem utilizar até mesmo uma válvula a jusante;
- 5 cv \leq Potência da Bomba ≤ 40 cv \Rightarrow Emprega-se o *soft starter* desde que a coluna líquida a jusante da bomba não provoque uma pressão logo na saída do recalque acima de 40 mH₂O;
- Para Bomba com Potência > 40 cv \Rightarrow O inversor de frequência é sempre aplicado.

Cabe ainda salientar que esses critérios são eminentemente empíricos, definidos a partir de um histórico e da realidade da empresa e aplicados unicamente em sistemas de água e esgoto. Casos particulares para uso exclusivo de inversores de frequência, também definidos pelo grupo, independente dos critérios acima listados são:

- Controle de pressão, vazão, nível, etc.
- Coluna líquida acima de 40 mH₂O

Baseado nas informações e critérios definidos pela *SANASA*, através do seu “*Grupo de Automação*”, será apresentado a seguir o estudo sobre a implantação de inversor de frequência na Sub-Adutora “Leste” a título de exemplificação.

Essa Sub-Adutora em especial era um verdadeiro desafio para a companhia, pois se tratavam de bombas de 300 cv com grande variação da altura manométrica (H_{man}), entre 10 e 70 mH₂O.

A operação normal desta adutora se dava a partir do estrangulamento de uma válvula borboleta na saída do recalque, tendo como principal referencial a Casa de Bombas “Jd. Paranapanema” que é alimentada pela citada Sub-Adutora. Neste sentido, o operador da C. B. “Pulmão” (saída do recalque da S. A. “Leste”), se comunicava com o operador da C. B. “Jd. Paranapanema” via rádio e, em função das informações recebidas, era feita a graduação de abertura da válvula variando-se assim a vazão a fim de atender as necessidades operacionais daquele Centro de Reservação e Distribuição (C.R.D.). Tinha-se ainda como referência um manômetro na saída do bombeamento, logo após a válvula borboleta, onde por critérios empíricos, se mantinham as pressões variando entre 20 e 30 mH₂O. Essa Sub-Adutora apresenta pontos de distribuição direta de água para vários bairros, o que é um complicador sob o ponto de vista operacional. A Figura 3.23 ilustra a topologia da S. A. “Leste”.

Diante disso, optou-se pela colocação de um único inversor que controlaria a operação dos dois conjuntos moto-bomba na C. B. “Pulmão”, recebendo informação de um ponto de controle (“set-point”) remoto localizado na chegada da derivação da S. A. “Leste” para o C.R.D. “Jd. Paranapanema” (caixa de sucção). Como critério foi estabelecido que a pressão nesse ponto não poderia ser inferior a 15 mH₂O.

Definido o desafio, partiu-se então para o levantamento das características do sistema operacional. Como primeiro passo foram feitos levantamentos do sistema de bombeamento (curva da bomba, rendimento, etc.) através do catálogo do fabricante e da curva real obtida através das medições em campo. Analisando essas curvas notou-se uma boa variação da altura manométrica em função das vazões ditadas pelo sistema ao longo do dia, o que é um bom

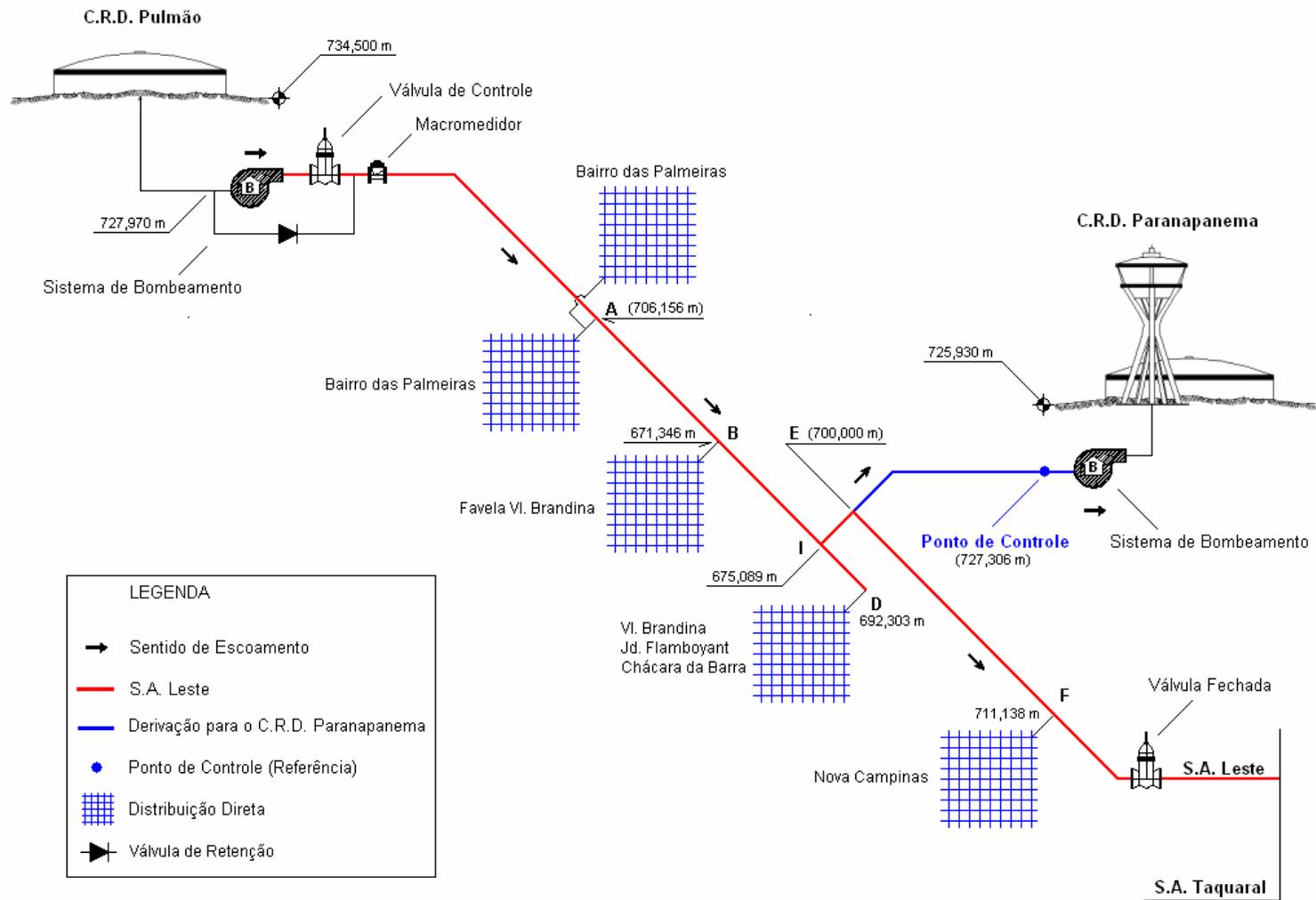


Figura 3.23 – Topologia do sistema da S. A. “Leste”

indicador para o emprego de inversores de frequência, conforme observado em Souza et al. (1.978), Vallilo et al. (1.981), Irvine e Gibson (2.002).

No passo seguinte, os técnicos verificaram a validação das Equações das Leis de Semelhança para Máquinas Hidráulicas (equações de 1 a 3), com a finalidade de se identificar problemas de escorregamento ou outras diferenças que pudessem comprometer o estudo. Para isso foi utilizado o C.R.D. “San Conrado” onde existem bombas menores ($P_{\text{Bomba}} = 60 \text{ cv}$), porém com características semelhantes e com inversor de frequência já instalado. Os resultados verificados, analisando os valores medidos e calculados, foram relativamente próximos entre as duas situações, o que deu ao grupo uma certa segurança e confiabilidade no uso dessas equações. Esses resultados são apresentados, a título de informação, nos “Anexos” deste trabalho.

Voltou-se então à S. A. “Leste”, onde foram levantados todos os parâmetros do sistema com relação à bomba. Os itens mais relevantes foram: a pressão de recalque na saída da bomba e antes da válvula de estrangulamento, a pressão de recalque imediatamente após a válvula, a curva de vazão do sistema ao longo do dia medida através de um macromedidor com saída pulsada na sub-adutora e a pressão na chegada do C.R.D. “Jd. Paranapanema”, considerado neste estudo como ponto crítico do sistema. As Figuras 3.24 e 3.25 ilustram esses levantamentos.

Na Figura 3.26 foram calculadas e inseridas as curvas da bomba para diferentes rotações a partir da nominal com o auxílio das Leis de Semelhança, juntamente com a curva de demanda média horária do sistema. Fazendo uma análise crítica dos dados dessa figura, se vê claramente que o sistema de bombeamento trabalha no máximo a 85% da rotação nominal para atender a vazão requerida. Outra conclusão importante é quanto a faixa de operação das vazões requeridas ao longo do dia, que em aproximadamente 67% dos casos, está contida entre 60 a 80% da rotação nominal do motor.

Além disso, essa figura permite, mesmo que de forma superficial, a avaliação entre os valores disponibilizados pela bomba e aqueles efetivamente requeridos pelo sistema. Somente nessa comparação já é possível vislumbrar a economia em potencial capaz de se obter com a

Pressões de Recalque Disponível, Utilizada e na Chegada do CRD Paranapanema com Rotação Nominal

56

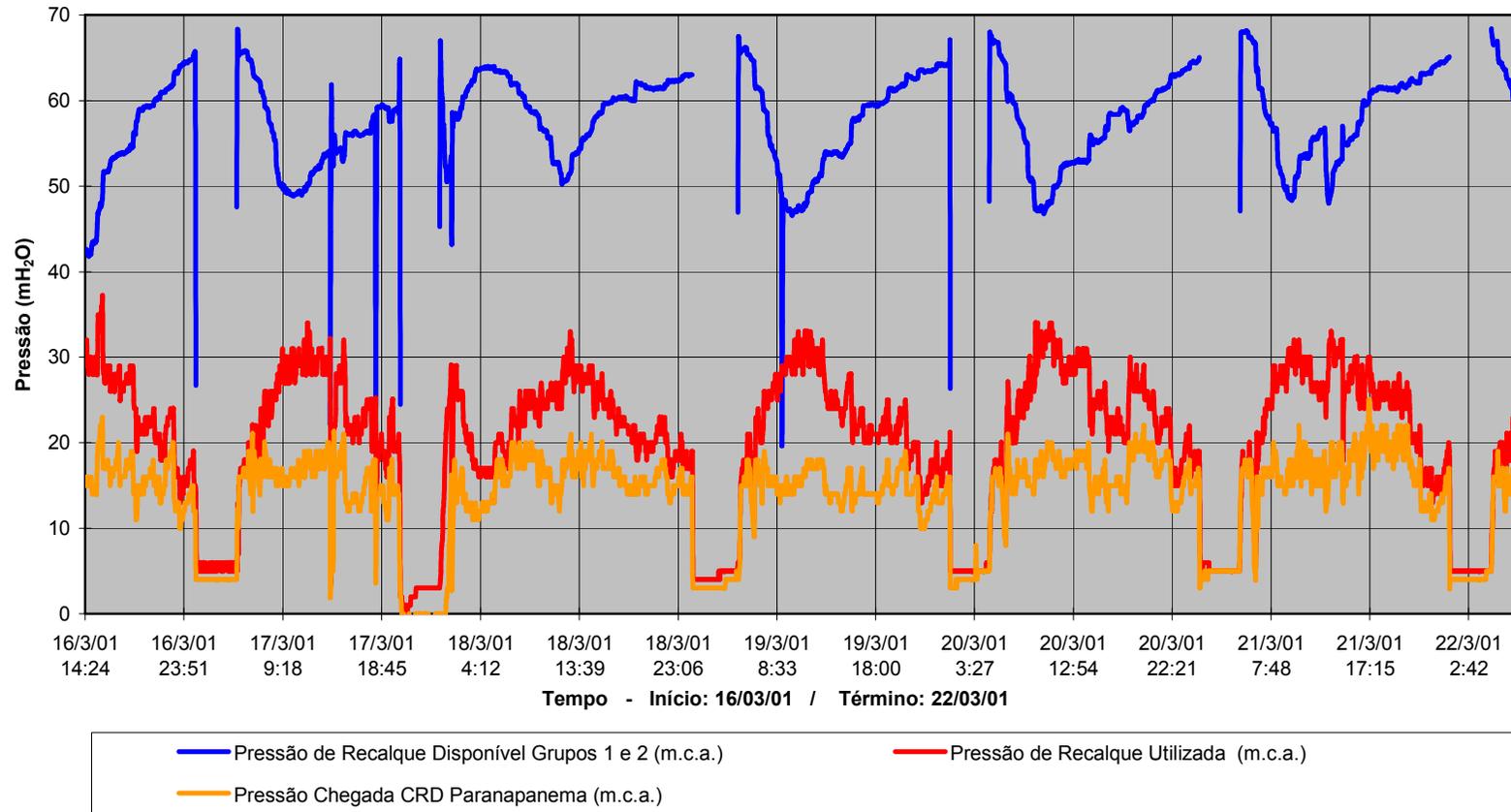


Figura 3.24 – Pressões disponível e utilizada na saída do recalque, na chegada do CRD “Jd. Paranapanema” com a S.A. “Leste” operando com rotação nominal

57

Vazão Medida na Saída da S. A. Leste - TAG 161 (m³/h)

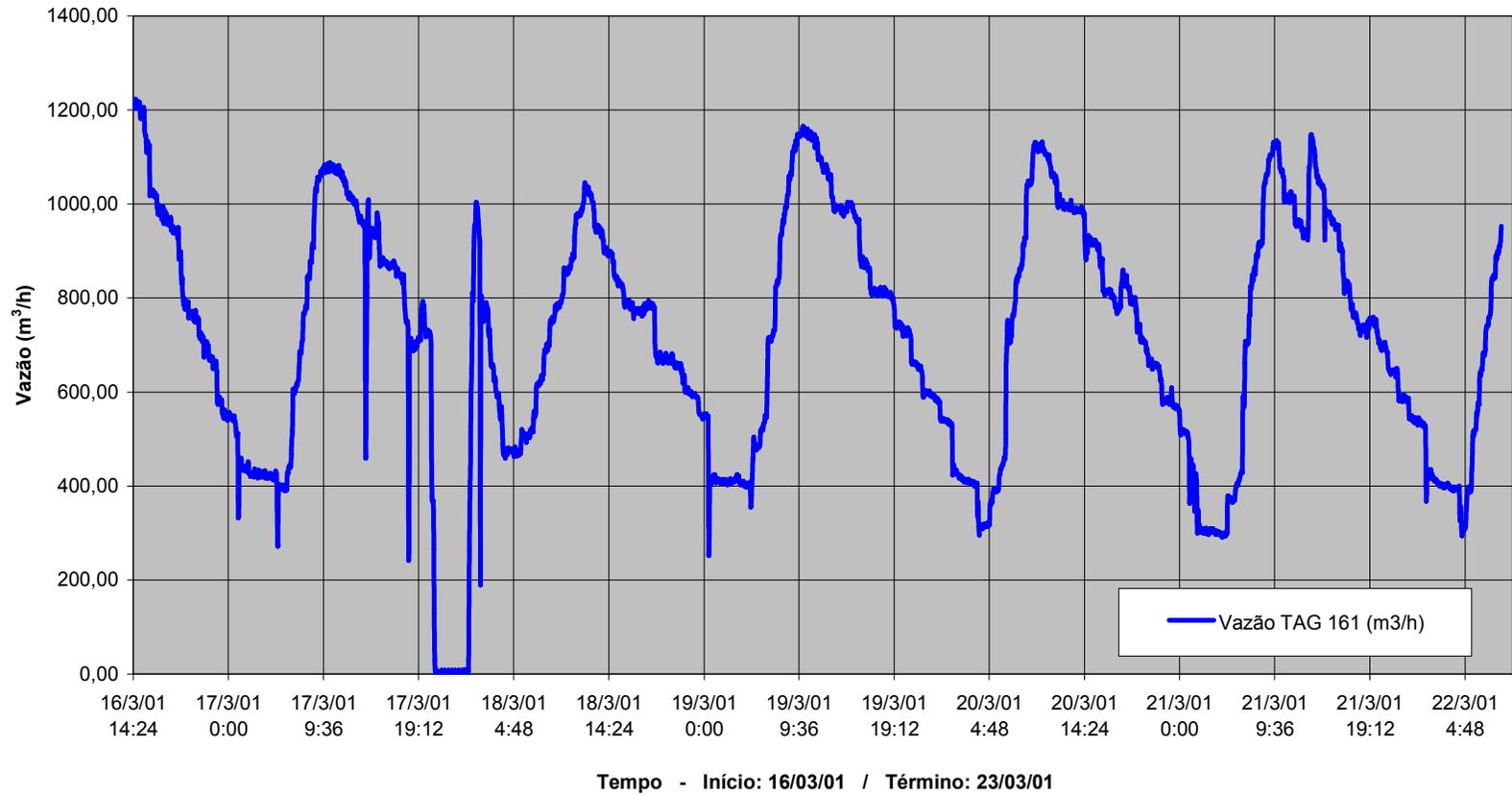


Figura 3.25 – Vazão medida na S. A. “Leste”

Curva da Bomba para Diferentes Rotações x Curva do Sistema

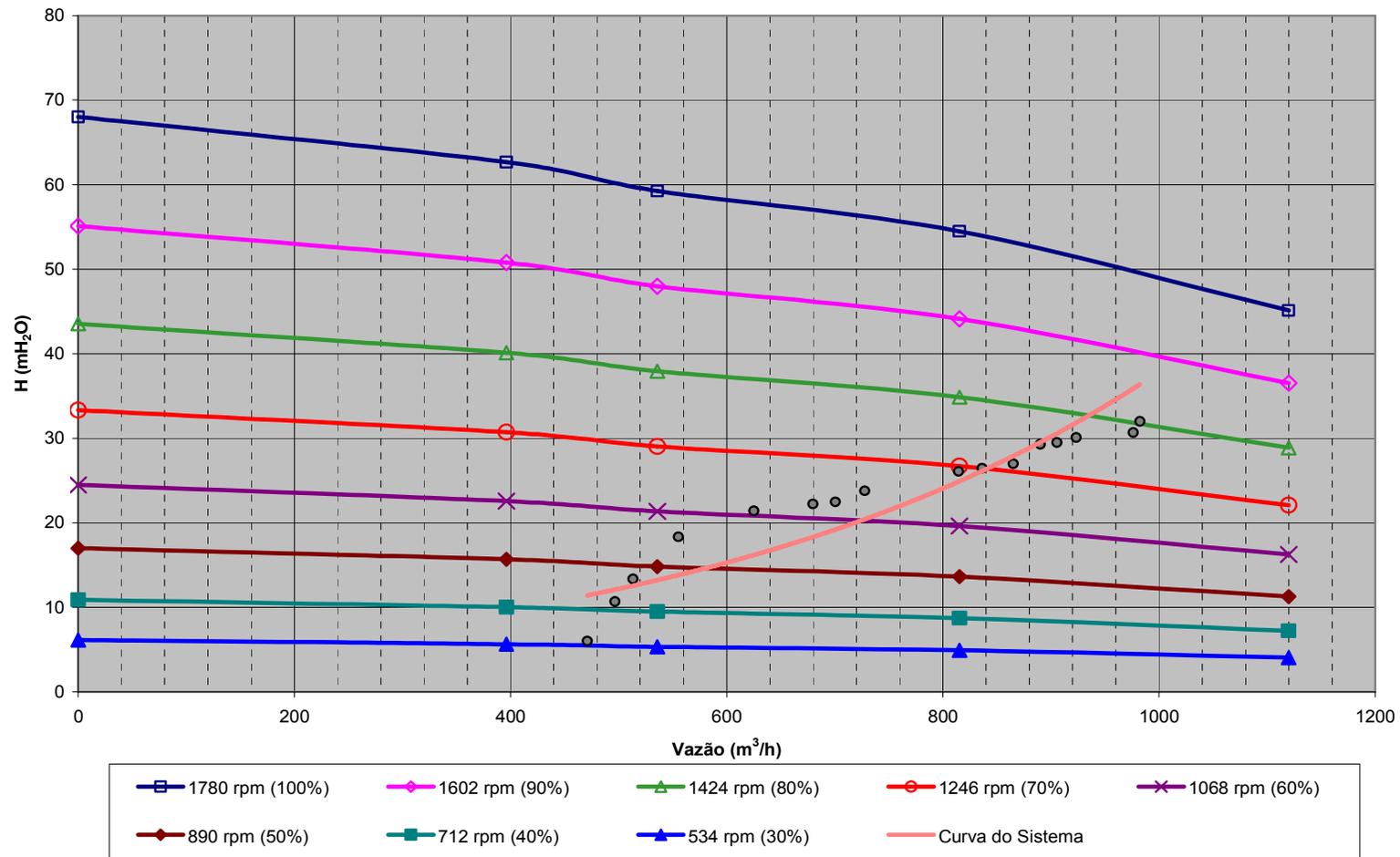


Figura 3.26 – Curva da bomba para diferentes rotações x curva do sistema (S. A. “Leste”)

utilização de um inversor de frequência nesse sistema. Cabe aqui salientar ainda que esse sistema opera por gravidade uma parte da madrugada, onde o grupo em operação é desligado.

A Figura 3.27, que apresenta as rotações com que o sistema de bombeamento opera a fim de atender a demanda de um dia típico, evidencia bem essa avaliação, observado que o tempo foi discretizado em intervalos de uma hora, onde foi tomada a média das rotações de cada período. Essa avaliação permite vislumbrar as possibilidades de ganho tomando-se a relação entre a rotação e a potência das Leis de Semelhança.

De acordo ainda com o “*Grupo de Automação*”, a recomendação dos fabricantes de Inversores é que a mínima rotação do motor elétrico seja de 50% de sua rotação nominal, pois para rotações inferiores os motores podem sofrer problemas na sua refrigeração provocando aquecimento. Em Vallilo et al. (1.981), verificamos sugestão semelhante, onde os autores apresentam como regra prática “[...] limitar a vazão mínima a valores não inferiores a 25% – 30% da vazão correspondente ao seu ponto de melhor rendimento na rotação máxima recomendada”. Além disso, outros problemas são apontados em operação de bombas com baixas vazões, como a vibração e o ruído.

3.5.2 – SABESP

As primeiras discussões sobre o assunto do emprego de variadores pela *SABESP* se deram na década de 70, onde surgiram propostas de bombeamento direto nas redes de distribuição sem a utilização de reservatórios em zonas altas, conforme Souza et al. (1.978). O crescimento da empresa, em âmbito estadual, levou a *SABESP* subdividir-se em unidades de negócios, passando a ter então cada uma delas uma vida própria, ou seja, corpo técnico, setores administrativos, operacionais, manutenção, etc.

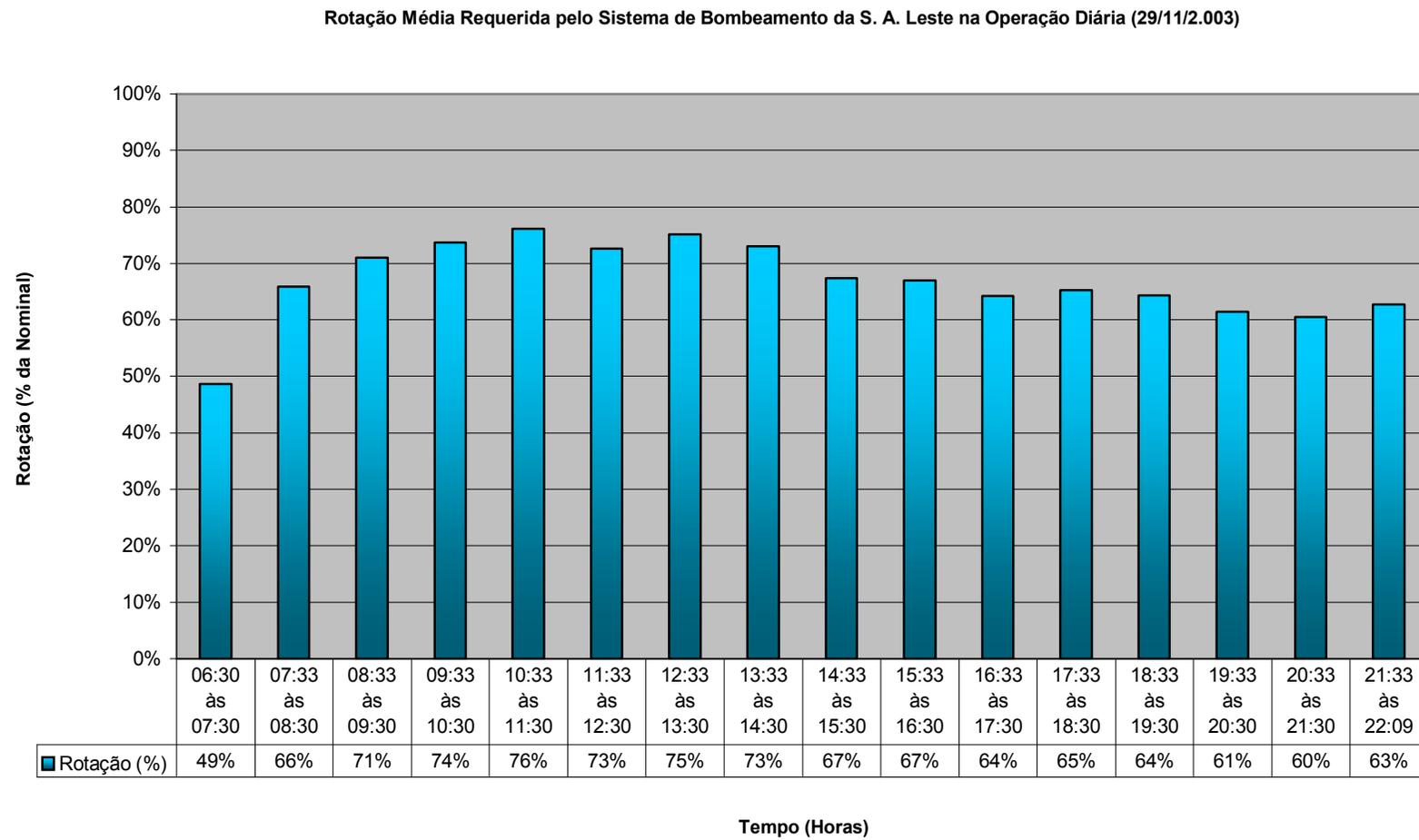


Figura 3.27 – Rotação média requerida pelo sistema de bombeamento num dia típico (S. A. “Leste”)

O contato mantido neste estudo se deu com o Departamento de Gestão de Energia, órgão subordinado à Superintendência de Manutenção da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Muito embora essa superintendência seja específica de uma das cinco unidades de negócios (Norte, Sul, Leste, Oeste e Centro), dada a sua importância, a mesma presta assessoria às demais unidades da empresa ao longo da Grande São Paulo e de todo estado.

Em relação à RMSP, todo o controle do macro sistema é feito por um CCO único, enquanto que o micro sistema é controlado por CCO's regionais. Dentro de cada unidade ainda existe uma Divisão Técnica de Água, que na verdade é quem planeja, projeta e idealiza os ajustes necessários ao sistema local, incluindo questões referentes a *soft starter* e inversores de frequência. Como se pode ver cada unidade tem um histórico sobre a evolução dos estudos de variação de velocidade. Particularmente, a unidade visitada tem estudos a partir da década de 90.

Os primeiros variadores empregados na *SABESP* foram os hidrocinéticos, cujo princípio de funcionamento se baseia em um eixo de entrada com rotação fixa e de um eixo de saída no qual a rotação varia linearmente de zero até uma rotação muito próxima à do eixo de entrada, conforme Mascheroni et al. (2.003). A partir de 1.994 começaram a ser usados o *soft starter* e o inversor de frequência em substituição aos variadores hidrocinéticos.

O uso passou a ser em larga escala, sendo empregados a partir de “Boosters” móveis, equipados com motores de potência relativamente pequena (a partir de 7,5 cv, com casos de potências de 5 cv).

Esse emprego se justificou, segundo o Departamento de Gestão de Energia, em função dos antigos “Boosters” móveis, que eram dotados de variadores hidrocinéticos (variadores mecânicos) responsáveis pela distribuição em marcha e controle da pressão, cujo consumo de energia elétrica era tão elevado como se a bomba mantivesse rotação plena, além das manutenções requeridas pelo alto desgaste imposto a esses equipamentos.

Segundo informação colhida junto à Divisão de Manutenção Norte, as quatro grandes razões para implementação de inversores de frequência no sistema de distribuição da *SABESP*, foram:

1. Necessidade de linhas de recalque operarem com distribuição em marcha;
2. Economia de energia elétrica;
3. Diminuição da manutenção dos equipamentos;
4. Melhora operacional, evitando principalmente golpes e transitórios como, por exemplo, no acionamento e na parada de bombas.

Em linhas de recalque com bombeamento exclusivo para reservatórios e sem derivações, a *SABESP* não faz uso de inversores de frequência, ou seja, são aplicados sistemas de bombeamento convencional com rotação fixa. Nestes casos, são usualmente empregadas Válvulas de Controle Automáticas (VCA) de controle de altitude em conjunto com um pressostato ou um Controlador Lógico Programável (CLP), que transmitirá informação ao sistema de bombeamento dotado de um *soft starter*, fazendo a parada ou o acionamento do mesmo.

Todo o sistema operacional da empresa já é automatizado desde a década de 80, num programa denominado “*Sistema de Controle Operacional do Abastecimento – (SCOA)*”, sendo o controle efetuado pelo CCO. Mais recentemente, com a implementação em muitos casos dos CLP’s, as interferências dos operadores foram minimizadas.

Em síntese o controle, a eficiência e a economia, são os principais motivos que levaram a empresa a investir nesse processo. Basicamente os mesmos motivos apontados pela *SANASA*.

O critério básico de uso estabelecido é o de que sempre que houver distribuição em marcha, emprega-se inversor de frequência, independente do tipo, características, potência,...etc.,

do sistema de bombeamento em análise. Já com relação ao *soft starter*, o mesmo é indicado exclusivamente para a partida e a parada de bombas em linhas ou sub-adutoras com bombeamento direto para reservatórios ou ETA's (Estações de Tratamento de Água).

Quando da avaliação do emprego de inversores de frequência, são elaborados levantamentos da curva do sistema juntamente com os técnicos de água (encarregados e operadores que efetuam manobras em campo) ou de pitometria. As informações referentes às pressões ao longo do sistema de distribuição em pontos críticos são obtidas com o auxílio de data loggers, e servem como fator de balizamento para decisão quanto ao uso ou não de inversor. A curva da bomba também é levantada.

Na maioria das vezes, segundo Divisão de Manutenção Norte, não são comparadas as curvas da bomba para diferentes rotações com a do sistema, a fim de se verificar a faixa de rotação onde a bomba mais opera. Isso só é feito em casos de operação com duas ou mais bombas.

De acordo com informações do Departamento de Gestão de Energia, no início cabia a cada unidade de negócio, a opção pela utilização de variadores de velocidade e fazer todas as especificações técnicas do equipamento. Com o tempo foi criado na empresa um “*Grupo de Padronização de Equipamentos Elétricos*”, o qual é o responsável pela criação de especificações padrões a partir da consolidação das experiências de cada unidade. Atualmente esse grupo trabalha no desenvolvimento de especificações para toda empresa, numa forma de padronização.

Segundo Hagiuda (2.004), o consumo total de energia elétrica da *SABESP* no ano de 2.003 foi da ordem de 2.045 GWh, o que representou 2,2% do total da energia elétrica consumida em todo Estado de São Paulo (Figura 3.28). Desse total consumido, as unidades de negócio da empresa na Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, foram responsáveis por 1.480 GWh, o que significa apenas 72,4% do total, ou melhor ainda, sozinha essas unidades localizadas na RMSP, respondem por 1,6% do total da energia elétrica consumida no Estado.

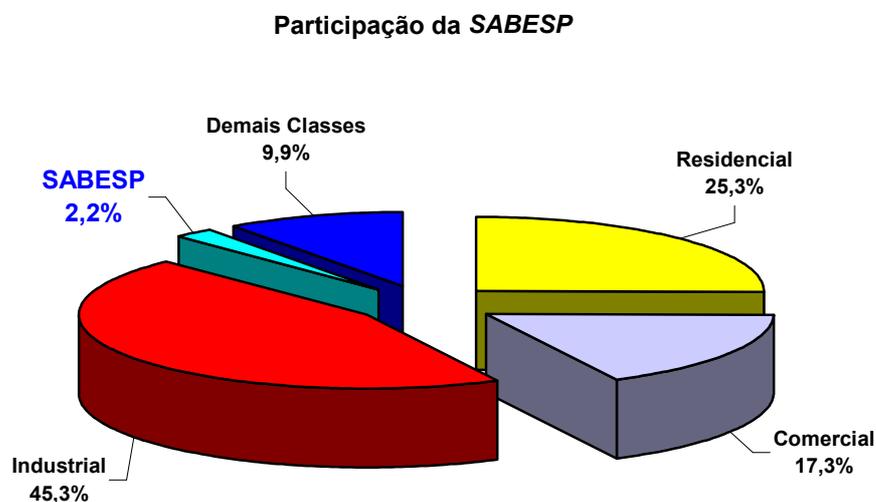


Figura 3.28 – Participação da *SABESP* no consumo estadual de energia elétrica no ano de 2.003. Fonte: Hagiuda (2.004)

Ainda em Hagiuda (2.004) é possível se verificar que, do período de 2.000 a 2.003, houve um crescimento anual de 2,9% no consumo de energia elétrica, em média (Figura 3.29). Já os custos tiveram uma oscilação muito mais significativa neste mesmo período, tendo sido registrado, em média, um aumento anual no custo da energia elétrica da ordem de 21,7% (Figura 3.30). Isso se traduziu num gasto que alcançou, somente no ano de 2.003, na *SABESP*, a astronômica cifra de R\$ 322,8 milhões.

Somente no segundo trimestre de 2.005, a *SABESP* gastou com tarifas de energia elétrica R\$ 109,1 milhões, o que representou, comparativamente com o mesmo período de 2.004, um acréscimo de 20,3%, conforme anunciado pela empresa em seu boletim intitulado “Resultados do Segundo Trimestre de 2.005”, datado de 15 de Agosto de 2.005 e disponível na página oficial da empresa na internet.

Consumo Anual de Energia Elétrica

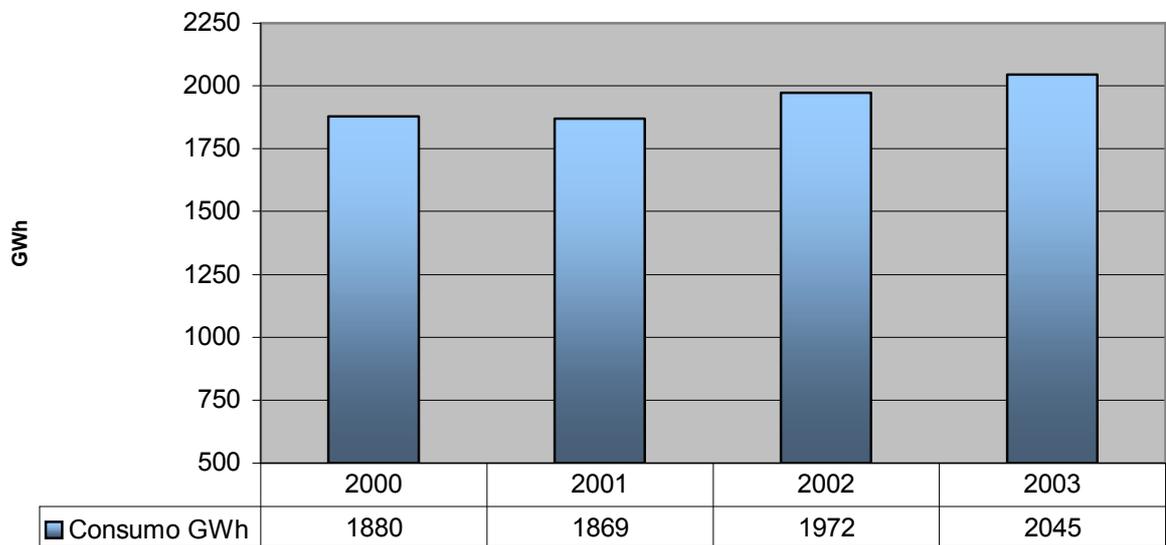


Figura 3.29 – Consumo anual de energia elétrica da SABESP. Fonte: Hagiuda (2.004)

Gasto Anual de Energia Elétrica

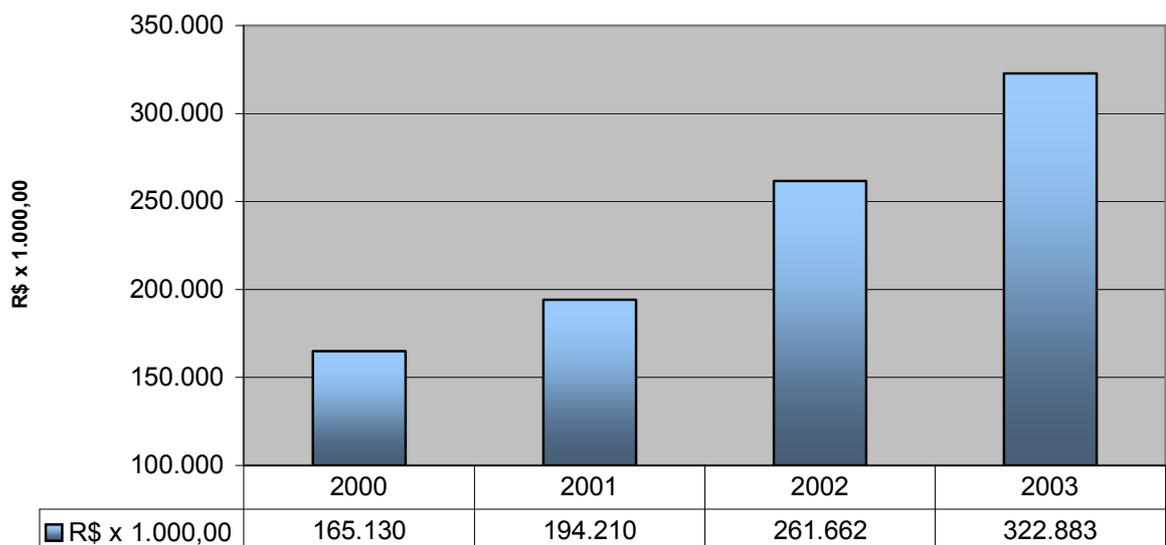


Figura 3.30 – Gasto anual contabilizado com energia elétrica na SABESP. Fonte: Hagiuda (2.004)

Curiosamente, isso ocorreu com uma redução do consumo de energia elétrica da ordem de 0,2%, comparativamente ao mesmo período de 2.004 que, segundo o mesmo boletim, foi fruto dos resultados alcançados com os investimentos feitos num programa de eficiência energética.

A partir de 2.004 a *SABESP*, visando a melhoria da eficiência energética de seus sistemas, iniciou o desenvolvimento de três programas:

1. Programa BID ⇒ Aplicação de US\$ 187 mil para estudos de melhoria da eficiência energética. A principal fonte desse recurso, US\$ 149,5 mil, veio do Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID a fundo perdido, com uma contrapartida da *SABESP* de US\$ 37,5 mil.
2. Programa Eletrobrás/PROCEL/Sanear ⇒ Aplicação de R\$ 1,3 milhões entre 2.004 e 2.005 num projeto de conservação e uso racional energia elétrica e água no sistema de distribuição de água em algumas regiões de São Paulo. A fonte desse recurso foi dividida entre a Eletrobrás/PROCEL e a *SABESP*, sendo respectivamente, R\$ 700 mil a fundo perdido e R\$ 600 mil como contrapartida. A expectativa é que esse investimento traga retorno em 14 meses com uma redução de despesa e aumento de faturamento da ordem de R\$ 92 mil/mês.
3. Programa ANEEL ⇒ Aplicação de R\$ 12,8 milhões a partir de 2.004 num projeto de redução de gastos com energia elétrica. Desse total, R\$ 11,6 milhões serão investidos pelas concessionárias de energia elétrica, atendendo a Resolução nº 394 de 2.001 da ANEEL. O restante, R\$ 1,2 milhões, serão a fundo perdido. A expectativa é a que esse investimento traga retorno em 32 meses com uma redução mensal nas despesas de energia elétrica da ordem de R\$ 460 mil/mês.

Especificamente o Programa BID, proporcionou uma reestruturação na zona alta do Setor Santana e será apresentado a seguir como modelo a título de exemplificação. Segundo Hagiuda (2.004), as principais intervenções feitas neste sistema foram:

- Setorização entre as zonas alta e baixa.
- Substituição dos conjuntos moto-bomba por novos e de menor potência.
- Adaptações hidráulicas e instalação de inversor de frequência em um dos conjuntos.
- Desligamento de um conjunto moto-bomba no horário de ponta.
- Recontratação da demanda de potência.
- Instalação de um sistema de automação local e monitoramento remoto no CCO para otimização da operação.

O primeiro passo influente nesse trabalho, se nota com a separação e o isolamento das zonas alta e baixa que compõem o Setor Santana. Em Hagiuda (2.004), fica evidente que essa etapa foi de fundamental importância, pois a partir de sua implementação foi possível reavaliar e redimensionar o sistema de bombeamento.

O sistema de recalque era composto, caracteristicamente por (Figura 3.31):

- 2 conjuntos moto-bomba de 200 cv;
- 2 conjuntos moto-bomba de 100 cv;
- 1 conjunto moto-bomba de 100 cv (reserva);
- Demanda Contratada de 480 kW no horário de ponta e 500 kW no horário fora de ponta;
- Sistema de Tarifação Horo-Sazonal – Azul (Tarifa A₄).

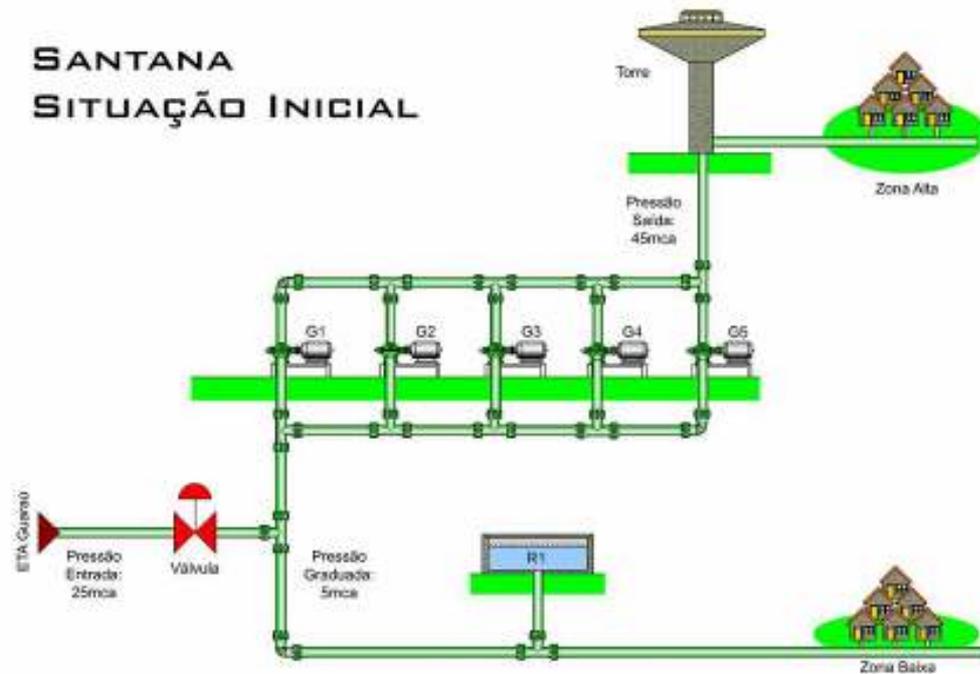


Figura 3.31 – Situação inicial do Setor Santana. Fonte: Hagiuda (2.004)

Num segundo momento, agora já estabelecido um novo limite de abastecimento, verificou-se a real necessidade de abastecimento, o que proporcionou a substituição dos conjuntos moto-bomba existentes no local e a readequação de vários fatores operacionais com pequenas adaptações hidráulicas no sistema de redes.

A nova configuração do sistema de recalque ficou assim estabelecida (Figura 3.32):

- 3 conjuntos moto-bomba de 100 cv;
- 1 conjunto moto-bomba de 100 cv (reserva);
- Demanda recontratada de 180 kW no horário de ponta e 270 kW no horário fora de ponta;
- Sistema de Tarifação Horo-Sazonal – Azul (Tarifa A₄).

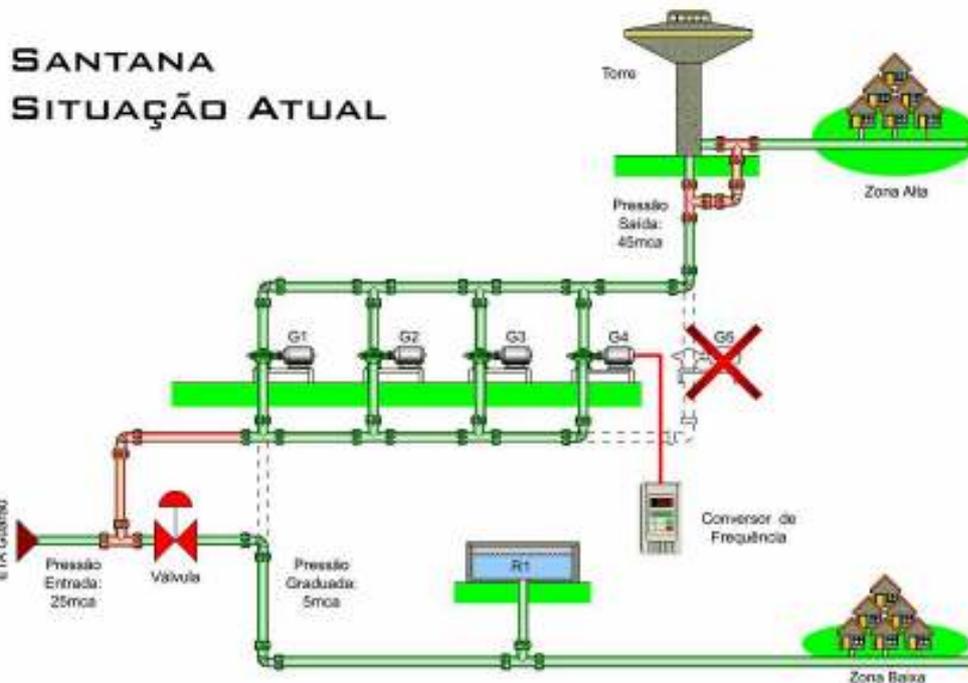


Figura 3.32 – Situação final do Setor Santana. Fonte: Hagiuda (2.004)

Entre as readequações operacionais no sistema hidráulico, se vêem três com bastante significado prático. A chegada ao sistema de bombeamento passou a vir diretamente da ETA Guarauá, e não mais a partir de uma válvula de controle. Com a reestruturação, os conjuntos moto-bomba foram reduzidos em quantidade e potência, sendo que um deles foi dotado de inversor de frequência o que de certa forma flexibiliza e muito a operação da estação. E, finalmente, foi interligada a chegada com a saída do reservatório elevado, fazendo com que o mesmo passe a trabalhar como “sobra” com as bombas recalcando diretamente na rede de distribuição. Essa é uma prática muito comum hoje em dia nos sistemas de abastecimento, devido a baixa capacidade de reserva dos reservatórios elevados e a economia que se faz com o bombeamento direto na rede, que demanda de uma potência relativamente menor. Sugestão semelhante já se verificava na década 70, conforme Souza et al. (1.978).

Segundo “Relatório da Administração” da *SABESP*, constante das Demonstrações Financeiras Padronizadas (2.004), o resultado final desse trabalho de reestruturação do Setor Santana proporcionou uma economia de energia elétrica de 100 mil kWh/mês, representando uma

redução de gastos da ordem de R\$ 29 mil/mês. O volume macromedido, como era de se esperar, também se reduziu em 17%, principalmente em virtude da nova setorização.

3.6 – ESTRUTURA TARIFÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

A política tarifária de energia elétrica no Brasil sempre foi uma questão muito presente nas discussões em âmbito nacional por se tratar de um indicador econômico e social. De um dos lados dessa discussão se encontram as concessionárias, onde o interesse no assunto se dá principalmente pelo equilíbrio financeiro, a rentabilidade e o fluxo de caixa. No lado oposto, de forma até antagônica, se encontram os consumidores, cuja preocupação se baseia diretamente no custo mensal da energia elétrica e o quanto isso representa nos seus custos totais.

Inicialmente a questão tarifária no país, segundo Haddad e Gama (2.001), foi tratada no início do século passado como uma maneira de viabilizar a expansão e o crescimento nacional. Para que empresas como a Light Canadense entrassem no país foi preciso garantia e proteção nos contratos da época, principalmente quanto à instabilidade que a moeda brasileira demonstrava no cenário mundial. Ainda segundo Haddad e Gama (2.001), um dos instrumentos utilizados para se amenizar a insegurança que a economia brasileira passava as empresas estrangeiras do ramo, foi a introdução de uma cláusula chamada “Cláusula Ouro”, onde as tarifas eram compostas em papel-moeda e em ouro.

A partir daí o que se viu foi uma forte presença do Estado no controle e gerência do setor, primeiro com a publicação do Decreto nº 24.643 de 10/07/1.934 – “Código das Águas”, onde eram dispostas regras para o uso, aproveitamento, concessão, etc., dos recursos hídricos do

Brasil, entre elas a destinação para fins energéticos (Artigos de nºs 63, 139 – 144, 150 – 169, 178 – 188 e 191 – 194). Especificamente, os Artigos de nºs 178 ao 188 do referido decreto, dispõem, mesmo que de forma primária, sobre os serviços de energia elétrica e suas tarifas, estabelecendo ainda a Divisão de Águas do Departamento Nacional da Produção Mineral como órgão competente para gerir a questão. Depois, num segundo momento, com a regulamentação dos serviços de energia elétrica pela Divisão de Águas, criou-se o regime tarifário de serviço pelo custo (Decreto nº 41.019 de 26/02/57).

Mais tarde, já em meados da década de 70, tentou-se estabelecer uma equalização das tarifas. A fixação delas ao longo dos anos acabou servindo, nas mãos do governo, como instrumento ora econômico e ora anti-inflacionário, o que culminou com o endividamento de muitas empresas e uma crise financeira sem proporções no setor.

Em 1.993, inicia-se nova fase no setor com um novo sistema de tarifas, buscando a sua recuperação. Extinguiu-se então o regime de remuneração garantida e a equalização tarifária, elegendo a ELETROBRÁS como órgão que deveria gerir os recursos, entre outros, do programa de conservação de energia elétrica, tal como o PROCEL – Programa de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica. Já a recuperação da defasagem tarifária seria feita a cada três anos com base nos custos das empresas concessionárias (Haddad e Gama – 2.001).

A política tarifária foi sendo sistematicamente modificada nos anos advindos, muito em função das evoluções e das mudanças ocorridas na economia brasileira. Especificamente, em 1.994, com a implantação do Plano Real, ficou estabelecida a condição de não poder ocorrer reajustes tarifários em prazo inferior a um ano.

Finalmente em 1.997 é criada a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, autarquia vinculada ao Ministério das Minas e Energia, cuja atribuição é definir as regras, ações e gerir o setor energético no Brasil, bem como a questão tarifária. Com relação à revisão e ao reajuste de preços e valores de tarifas de energia elétrica, a ANEEL dispõe hoje de três mecanismos para este fim, conforme Cadernos Temáticos ANEEL nº 4 (2.005):

- Reajuste Tarifário Anual (IRT) \Rightarrow Tem por objetivo restabelecer anualmente o poder de compra da receita obtida pelo concessionário. Esse índice de reajuste é obtido pela variação do IGP-M observada nos 12 meses anteriores à data do reajuste e aplicado sobre as tarifas na “Data de Referência Anterior”;
- Revisão Tarifária Periódica \Rightarrow Tem por objetivo analisar o equilíbrio econômico-financeiro da concessão, ou seja, ela se dá mais no âmbito gerencial e ocorre em geral a cada 4 anos;
- Revisão Tarifária Extraordinária \Rightarrow Tem por objetivo a reavaliação das tarifas praticadas, a qualquer tempo, por solicitação das concessionárias, visando manter o equilíbrio econômico-financeiro do contrato.

Para efeito de normalização o setor elétrico passou, a partir da criação da ANEEL em 1.997, a contar com aquele que talvez seja o mais importante instrumento regulatório, a Resolução nº 456 de 29/11/2000, a qual discursa sobre todas as condições referentes ao fornecimento de energia elétrica no país.

Com a finalidade de melhor compreender a Resolução nº 456 da ANEEL e o sistema tarifário, faz-se necessária a definição de alguns termos técnicos muito utilizados nesta área. Entre todos os termos técnicos, os mais significativos do ponto de vista do enfoque deste trabalho são apresentados a seguir.

De acordo com a Resolução nº 456, Artigo nº 2, Incisos VIII, IX, XII, XIII, XIV, XVI, XVII (alíneas *a, b, c, d, e e f*), XX, XXXV, XXXVI, XXXVII, XXXVIII, XII, Tsutiya (2.001), Haddad e Gama (2.001), definem-se:

- Demanda \Rightarrow É a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela de carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado.

- Demanda Contratada \Rightarrow É a demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, sendo ou não utilizada durante o período de faturamento. Usualmente expressa em quilowatts (kW).
- Demanda de Ultrapassagem \Rightarrow Parcela da demanda medida que excede a demanda contratada, expressa em quilowatts (kW).
- Demanda Medida \Rightarrow Maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 minutos durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).
- Energia Elétrica Ativa \Rightarrow Energia elétrica que pode ser convertida em outra forma de energia, ou seja, é a energia capaz de produzir trabalho. Expressa normalmente em quilowatts-hora (kWh).
- Energia Elétrica Reativa \Rightarrow É a energia elétrica que circula continuamente em todos os campos elétricos e magnéticos do sistema de corrente alternada sem produzir trabalho, expressa normalmente em quilovolts-ampère-reativo-hora (kVArh).
- Estrutura Tarifária Convencional \Rightarrow É caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.
- Estrutura Tarifária Horo-Sazonal \Rightarrow É caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:
 - a) Tarifa Azul – modalidade de aplicação de tarifas *diferenciadas* de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano,

bem como tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

- b) Tarifa Verde – modalidade de aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como uma única tarifa de demanda de potência.
 - c) Horário de Ponta (HP) – período definido pelas concessionárias de 3 horas diárias consecutivas, exceção feita aos Sábados, Domingos, Terça-Feira de Carnaval, Sexta-Feira da paixão, “*Corpus Christi*”, Finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico. Esse período de 3 horas está compreendido dentro do intervalo das 17:00 às 22:00 horas, sendo definido pelas concessionárias. No estado de São Paulo, segundo a Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL, concessionária de distribuição de energia elétrica do interior, o intervalo definido é das 18:00 às 21:00 horas.
 - d) Horário Fora de Ponta (HF) – período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.
 - e) Período Úmido (PU) – período de cinco meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de Dezembro de um ano a Abril do ano seguinte.
 - f) Período Seco (PS) - período de sete meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de Maio a Novembro.
- Fator de Potência (*FP*) \Rightarrow É a relação entre a potência ativa e a total, consumidas num mesmo período especificado, cujo valor não deve ser inferior a 0,92, dada pela expressão:

$$FP = \frac{EA}{\sqrt{(EA)^2 + (ER)^2}} \quad (11)$$

Onde: FP – Fator de Potência

EA – Energia Ativa

ER – Energia Reativa

- Estrutura Tarifária Monômia \Rightarrow Tarifa de fornecimento de energia elétrica aplicável exclusivamente ao consumo de energia elétrica ativa.
- Estrutura Tarifária Binômia \Rightarrow Conjuntos de tarifas de fornecimento constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável.
- Tensão Primária de distribuição \Rightarrow Tensão disponibilizada no sistema elétrico da concessionária com valores padronizados iguais ou superiores a 2,3 kV.
- Tensão secundária de distribuição \Rightarrow Tensão disponibilizada no sistema elétrico da concessionária com valores padronizados inferiores a 2,3 kV.
- Tarifa de Ultrapassagem \Rightarrow Tarifa aplicada sobre a diferença entre a demanda medida e a contratada, quando exceder os limites estabelecidos.

A Resolução nº 456 de 20/11/2.000 da ANEEL, classifica as unidades consumidoras em dois grupos, A e B.

O grupo A, especificamente, consumidores de Alta Tensão (Tsutiya – 2.001), se destina àqueles cujo fornecimento de tensão seja igual ou superior a 2,3 kV ou, ainda, aos consumidores atendidos com tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo nos termos de Artigo 82 da

citada resolução, o qual impõe como condição que a tensão de fornecimento seja, exclusivamente, secundária além de que um dos requisitos listados abaixo seja atendido:

- Consumo igual ou superior a 30 MWh, em no mínimo, 3 ciclos completos e consecutivos de 6 meses anterior à opção;
- Celebração de contrato de fornecimento com demanda contratada igual ou superior a 150 kW.

Esse grupo ainda é caracterizado pela estruturação tarifária binômia, ou seja, o faturamento é composto pela energia elétrica ativa medida e a demanda faturável (Resolução nº 456 da ANEEL). A Tabela 3.4 a seguir apresenta a subdivisão desse grupo A:

Tabela 3.4 – Subdivisão da tensão de fornecimento do Grupo A. Fonte: Resolução nº 456 da ANEEL, Inciso XXII (2.000)

Subgrupos	Tensão de Fornecimento
A ₁	Igual ou superior a 230 kV
A ₂	de 88 kV a 138 kV
A ₃	de 69 kV
A _{3A}	de 30 kV a 44 kV
A ₄	de 2,3 kV a 25 kV
AS	Consumidores de Baixa Tensão ligados em área de distribuição subterrânea, desde que satisfeitas algumas condições.

Já o grupo B, consumidores de Baixa Tensão (Tsutiya – 2.001), se destina aos consumidores cujo fornecimento de tensão é inferior a 2,3 kV ou que possuam potência instalada inferior a 75 kVA ou, ainda, aos consumidores atendidos com tensão superior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo nos termos definidos nos artigos 79 e 81, os quais versam sobre os locais e atividades fim (áreas de veraneio ou turismo e atividade de pousada, hotelaria, parques esportivos e agropecuários permanentes) e desde que a potência instalada em projetores de iluminação não

seja superior a $\frac{2}{3}$ (dois terços) da carga total instalada. Esse grupo é caracterizado ainda pela estruturação tarifária monômnia, ou seja, o faturamento é dado simplesmente pelo consumo de energia elétrica ativa. A Tabela 3.5 abaixo apresenta a subdivisão desse grupo B:

Tabela 3.5 – Subdivisão da tensão de fornecimento do Grupo B. Fonte: Resolução nº 456 da ANEEL, Inciso XXIII (2.000)

Subgrupos	Classificação
B ₁	Residencial e Residencial de Baixa Renda
B ₂	Rural, Coop. Rural de Eletrificação, Irrigação
B ₃	Demais Classes
B ₄	Iluminação Pública
B _{4A}	Rede de Distribuição
B _{4B}	Bulbo de Lâmpada
B _{4C}	Nível de IP acima do Padrão
AS	Subterrâneo

A diferença entre os dois grupos, além dos grupos de faturamento (alta e baixa tensão), tem início a partir do pedido de fornecimento, o qual sendo do grupo A deverá celebrar um contrato de fornecimento, enquanto que os do grupo B aceitam simplesmente os termos do contrato de adesão (Art. 3º, Inciso I, alíneas *d* e *e*).

De acordo com Tsutiya (2.001), o sistema tarifário dispõe de vários tipos de tarifas cuja escolha, muitas vezes, é facultada ao consumidor. Basicamente, as tarifas de energia elétrica podem ser: convencional ou horo-sazonal, subdividindo-se ainda esta última em tarifa azul e verde.

A tarifa convencional se caracteriza pelo preço único praticado independentemente do horário de consumo, sendo aplicada aos dois grupos (A e B), porém normalmente utilizada para unidades enquadradas no grupo B (baixa tensão), cujo atendimento se dá com tensão inferior a 2,3 kV. Já a tarifa horo-sazonal, que tem como característica básica a prática diferenciada de tarifas em função dos horários de consumo, também pode ser aplicada a qualquer unidade

enquadrada nos dois grupos (A e B). Essa opção tarifária subdivide-se ainda em outras duas categorias de tarifas, azul e verde, tendo atrativos que podem compensar ao consumidor, se adequado os horários de maior consumo do mesmo com os de tarifa reduzida.

A tarifa azul é definida como uma modalidade tarifária para aplicação de preços diferenciados de demanda de potência e de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano.

Conforme o Artigo 50 da Resolução nº 456 da ANEEL, os preços para esta tarifa são compostos da seguinte forma:

I. Demanda de Potência (kW)

- a) Um preço definido para o horário de ponta (HP);
- b) Um preço definido para o horário fora de ponta (HF).

II. Consumo de Energia (kWh)

- a) Um preço definido para o horário de ponta em período úmido (HPPU);
- b) Um preço definido para o horário fora de ponta em período úmido (HFPU);
- c) Um preço definido para o horário de ponta em período seco (HPPS);
- d) Um preço definido para o horário fora de ponta em período seco (HFPS).

A tarifa verde, por sua vez, é definida como a modalidade tarifária para aplicação de um preço único de demanda e de preços diferenciados de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano.

Conforme o Artigo 51 da Resolução nº 456 da ANEEL, os preços para esta tarifa são compostos da seguinte forma:

I. Demanda de Potência (kW) – Um preço único.

II. Consumo de Energia (kWh)

- a) Um preço definido para o horário de ponta em período úmido (HPPU);
- b) Um preço definido para o horário fora de ponta em período úmido (HFPU);
- c) Um preço definido para o horário de ponta em período seco (HPPS);
- d) Um preço definido para o horário fora de ponta em período seco (HFPS).

A Resolução apresenta em seu Artigo 56 as considerações referentes aos limites da tarifa de ultrapassagem, ou seja, trata da parcela de demanda de potência efetivamente medida, que supera a respectiva demanda de potência contratada, e sobre a qual será aplicada a tarifa de ultrapassagem. Nesse caso específico, será aplicada tarifa de ultrapassagem quando:

- a) Superar em mais de 5% para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;
- b) Superar em mais de 10 % para unidade consumidora atendida em tensão de fornecimento inferior a 69 kV.

Ainda com relação ao Artigo 56, o § 1º estabelece que a tarifa de ultrapassagem, no caso de unidade consumidora faturada na estrutura tarifária convencional, será de 3 vezes o valor normal.

Os Artigos 22 e 23 dispõem sobre os contratos de fornecimento para os grupos B e A, respectivamente. No caso de demanda contratada, o Artigo 23 prevê, no § 3º, que o valor mínimo contratável é de 30 kW para unidade com estrutura tarifária convencional ou em pelo menos um dos segmentos horo-sazonais, excetuando os casos em que a concessionária estabelecer a tensão de fornecimento nos termos do Artigo 7.

Finalmente, o Artigo 20, inciso VII, alínea “b”, desta discutida resolução estabelece a classe “Serviço Público” e a subclasse “Água, Esgoto e Saneamento” para efeito de aplicação de tarifa de energia elétrica.

Até Junho de 1968, segundo Tsutiya (2.001), era concedido um subsídio de 80% nas tarifas de energia elétrica para as empresas de Saneamento Básico, com o passar do tempo isso foi sendo reduzido até que em 1990 esse valor chegou a 15%, índice mantido até hoje.

Os faturamentos ocorrerão em intervalos de aproximadamente 30 dias, observados o mínimo de 27 e o máximo de 33 dias, conforme Resolução nº 456 da ANEEL em seu Artigo 40. O levantamento dos valores consumidos de energia elétrica ativa é feito a partir de medidores instalados no local da ligação. O mesmo aparelho é capaz de registrar, simultaneamente, tanto a demanda medida no período como o correspondente fator de potência.

O Artigo 48 da mesma resolução estabelece os valores mínimos faturáveis, aplicáveis à fatura mensal das unidades consumidoras do Grupo B, sendo:

- I. Monofásico e Bifásico a 2 condutores – Valor em moeda corrente equivalente a 30 kWh;
- II. Bifásico a 3 condutores – Valor em moeda corrente equivalente a 50 kWh;
- III. Trifásico – Valor em moeda corrente equivalente a 100 kWh.

Já o Artigo 49 estabelece sobre o faturamento das unidades consumidoras do Grupo A:

- I. Demanda Faturável – Um único valor, sendo o maior entre a demanda medida e a demanda contratada;
- II. Consumo de Energia Elétrica Ativa – Um único valor, sendo o maior entre a energia elétrica contratada (se houver) e a energia elétrica efetivamente medida;

III. Consumo de Energia Elétrica e Demanda de Potências Reativas Excedentes – Quando o fator de potência, indutivo ou capacitivo, for inferior a 0,92.

Ainda no Artigo 49, o § 1º estabelece que em não havendo condições para definir os consumos em horários de ponta e fora de ponta, será tomada da forma proporcional ao nº de horas de cada segmento.

Observa-se neste breve relato sobre o sistema tarifário vigente no Brasil, que cada uma das possibilidades trás consigo uma série de condições, restrições e exigências que devem ser cuidadosamente avaliadas, evitando-se assim gastos adicionais com uma escolha equivocada. Outro fator importante, alertado por Tsutiya (2.001), se refere ao fato de que a opção por este ou aquele sistema de tarifas se dá pela celebração de um contrato, cujo prazo de vigência mínima é de 1 ano. Na Figura 3.33, extraída de Tsutiya (2.001), é feito um resumo do sistema tarifário e os seus itens de faturamento por tipo de tarifa, onde é possível compreender essa complexa estrutura.

O aumento de tributação é um dos principais fatores que tem onerado as tarifas de energia elétrica. A inclusão do Imposto Sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestação de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação – ICMS sobre as mesmas, atualmente representa 18% sobre o total da conta e, mais recentemente, o discutível Encargo de Capacidade Emergencial – ECE, ou mais comumente conhecido como “Seguro Apagão”, cuja cobrança vigorou até 2.006, representava algo em torno de 2% da tarifa em kWh.

As Tabelas 3.6 e 3.7 a seguir apresentam as taxas e tarifas vigentes, conforme Resolução da ANEEL nº 313 publicada no Diário Oficial da União de 07/04/2.006, para leituras a partir de 08/04/2.006, inclusive, nos municípios atendidos pela concessionária Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL. Essa concessionária de energia elétrica adicionará ainda os valores do Programa de Integração Social (PIS) e de Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) sobre as tarifas.

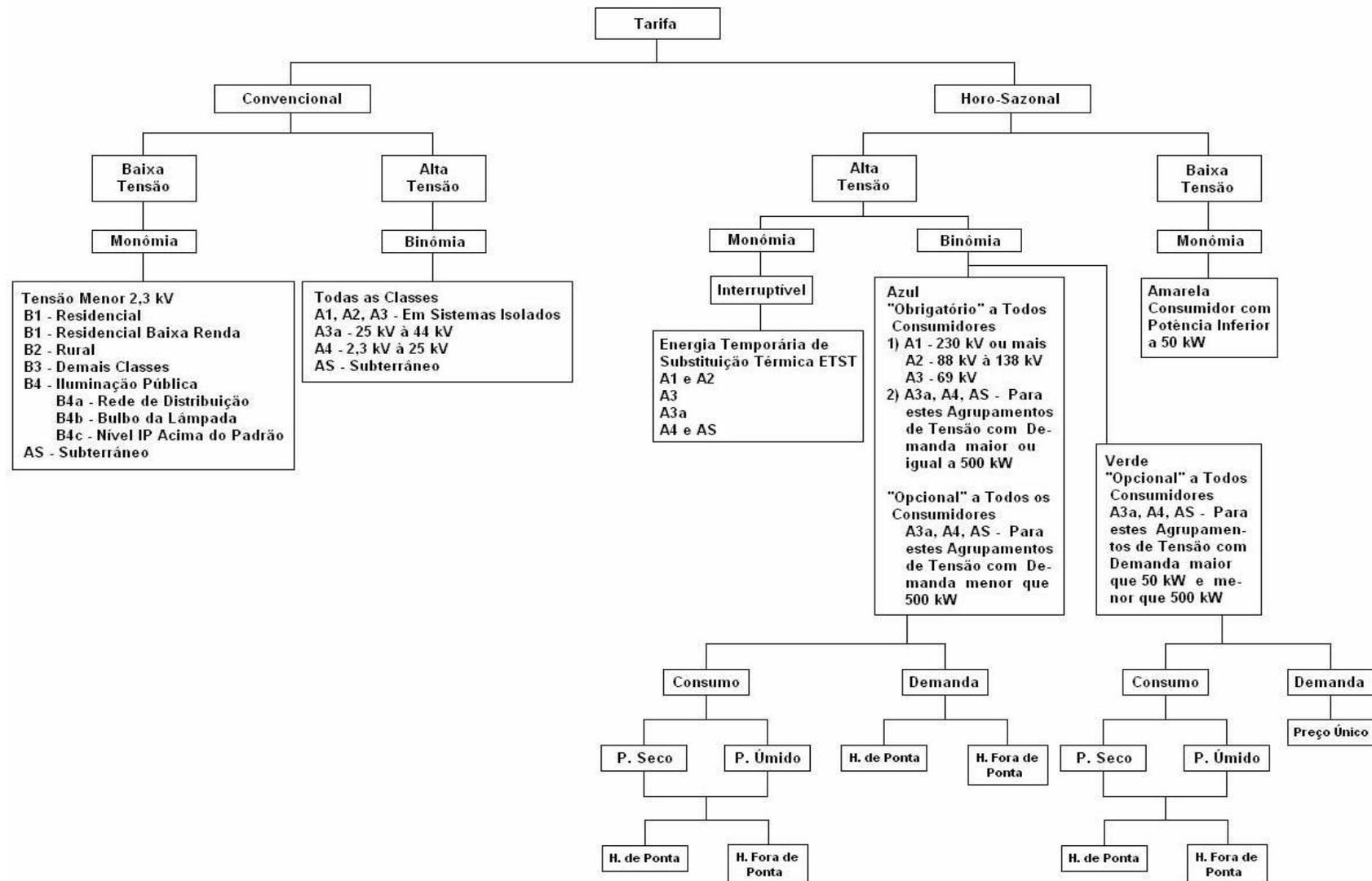


Figura 3.33 – Estrutura do sistema brasileiro de tarifação de energia elétrica. Fonte: Tsutiya (2.001)

Tabela 3.6 – Taxas e tarifas para o fornecimento de energia elétrica na categoria convencional.

Fonte: CPFL – http://agencia.cpf.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp (Acesso em 06/11/2.006)

Convencional	Consumo (R\$/MWh)	Demanda (R\$/kWh)	Ultrapassagem (R\$/kW)
Grupo A			
A3a (de 30 a 44 kV)	176,39	27,58	82,74
A3a (Residencial e Rural)	168,22	26,30	78,90
A4 (de 2,3 kV a 25 kV)	177,05	29,81	89,43
A4 (Residencial e Rural)	168,85	28,43	85,29
A4 (Coop. Eletrificação Rural)	90,59	6,18	18,54
AS (Subterrâneo)	185,25	44,07	132,21
AS (Residencial e Rural)	176,66	42,03	126,09
Grupo B			
	Consumo (R\$/MWh)	Desconto	
Residencial - Monofásico / Bifásico / Trifásico	326,45	-	
Baixa Renda - Monofásico ≤ 220 kWh - Carga ≤ 6,2 kW			
0 a 30 kWh	110,61	66,12	
31 a 80 kWh	189,61	41,92	
81 a 100 kWh	190,37	41,68	
101 a 200 kWh	285,53	12,53	
201 a 220 kWh	317,25	2,82	
> 220 kWh	317,25	2,82	
Rural			
Rural	176,34	-	
Coop. Eletrificação Rural	114,05	-	
Serviço Público de Irrigação	162,19	-	
No Residencial / Rural	294,99	-	
Iluminação Pública			
B4a - Rede de Distribuição	144,97	-	
B4b - Bulbo da Lâmpada	159,11	-	

Observando os valores da categoria horo-sazonal, na tarifa azul, da Tabela 3.7, é possível verificar com relação a demanda de potência, que as mesmas no horário de ponta são, em média, 316% mais altas que aquelas do horário fora de ponta. Já com relação ao consumo, para o período seco, as tarifas no horário de ponta são, em média, 68% mais altas que aquelas do horário fora de ponta. Praticamente a mesma diferença, em média, se obtém para o período úmido.

Tabela 3.7 – Taxas e tarifas para o fornecimento de energia elétrica na categoria horo-sazonal. Fonte: CPFL – http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp

(Acesso em 06/11/2.006)

Horo-Sazonal	Demanda (R\$/kWh)		Consumo (R\$/MWh)				Ultrapassagem R\$/kW	
	Ponta	Fora de Ponta	Período Seco		Período Úmido		Ponta	Fora de Ponta
			Ponta	Fora de Ponta	Ponta	Fora de Ponta		
Tarifa Azul								
A2 (de 88 a 138 kV)	16,26	2,43	265,92	164,63	240,25	149,54	48,78	7,26
A2 (Residencial e Rural)	15,51	2,31	253,60	157,01	229,12	142,61	46,53	6,93
A3 (69 kV)	28,14	6,14	267,24	165,27	240,96	149,70	84,41	18,43
A3 (Residencial e Rural)	26,84	5,85	254,86	157,61	229,80	142,76	80,51	17,58
A3a (de 30 a 44 kV)	27,86	7,36	274,21	166,17	247,85	150,66	83,59	22,07
A3a (Residencial e Rural)	26,57	7,02	261,51	158,48	236,37	143,68	79,73	21,05
A4 (de 2,3 a 25 kV)	29,56	7,90	274,89	166,50	248,47	150,94	88,71	23,69
A4 (Residencial e Rural)	28,20	7,54	262,16	158,79	236,96	143,95	84,60	22,59
A4 (Coop. Eletrificação Rural)	16,34	5,45	107,25	50,99	99,24	45,06	49,02	16,35
AS (Subterrâneo)	30,94	12,11	287,60	174,20	260,02	157,90	92,83	36,32
AS (Residencial e Rural)	29,51	11,54	274,28	166,13	247,97	150,59	88,53	34,63
Tarifa Verde								
A3a (de 30 a 44 kV)		7,36	721,55	161,93	695,98	150,66		22,08
A3a (Residencial e Rural)		7,02	688,11	154,43	663,72	143,68		21,06
A4 (de 2,3 kV a 25 kV)		7,90	756,78	166,50	730,38	150,94		23,70
A4 (Residencial e Rural)		7,54	721,72	158,79	696,54	143,95		22,62
A4 (Coop. Eletrificação Rural)		5,45	485,17	50,99	477,21	45,06		16,35
AS (Subterrâneo)		12,11	791,94	174,20	764,35	157,90		36,33
AS (Residencial e Rural)		11,54	755,25	166,13	728,93	150,59		34,62

Quando se compara somente a tarifa de ponta do período úmido com a do período seco, se verifica uma diferença, em média, de 10% a mais no valor das tarifas do período seco. Com relação a tarifa fora de ponta do período úmido comparada com a do período seco, a diferença, em média, é de 11% a mais no valor das tarifas do período seco. Praticamente a mesma diferença.

Observando agora os valores da categoria horo-sazonal, na tarifa verde, da Tabela 3.7, somente com relação a tarifa de consumo no período seco se verifica, em média, uma assustadora diferença de 434% entre os horários de ponta e fora de ponta. Na mesma situação, porém para o período úmido, se verifica uma também assustadora diferença média de 472%. Esse último valor chega a ser, até certo ponto, incompreensível, visto se tratar de período úmido.

Conhecer perfeitamente toda a sua instalação é o primeiro passo para quem tem por objetivo reduzir os gastos com o custo de energia elétrica. Na maioria das vezes existem boas opções como a classificação correta da classe da instalação, alteração de estrutura tarifária, regularização da demanda contratada, etc., o que dispensaria investimentos para se atingir os mesmos objetivos. O segundo passo, e talvez mais importante que o primeiro, é conhecer a fundo o sistema tarifário vigente e buscar adequá-lo à rotina operacional da instalação que se pretende otimizar.

“If I could ever made any valuable discoveries, it has been owing more to patient attention, than to any other talent.”

Isaac Newton

4. – MATERIAIS E MÉTODO

A partir dos questionamentos iniciais deste trabalho, que é a avaliação da performance operacional do inversor de frequência em sistemas de bombeamento, foram desenvolvidos estudo de casos com foco principal voltado para real eficiência do emprego desse dispositivo. Como base para o desenvolvimento desses referidos estudos, foram selecionados dois sistemas de bombeamento da *SANASA – Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A*, empresa de saneamento da cidade de Campinas, no estado de São Paulo.

Os sistemas escolhidos são de tamanhos representativos dentro da realidade operacional da empresa, sendo eles: a Casa de Bombas “João Erbolato” e a Casa Bombas “Pulmão” (Figura 4.1). Ambos são de grande importância estratégica por estarem localizados em áreas adensadas e centrais da cidade, com inversores de frequência instalados e em funcionamento, já há algum tempo. Um deles, a C. B. “Pulmão”, já havia sido objeto de discussão no capítulo anterior, referente ao “*Estado da Arte*” no uso de inversor de frequência por empresas de saneamento e, para uma análise de sua real eficiência, foi escolhido nessa nova fase do trabalho.

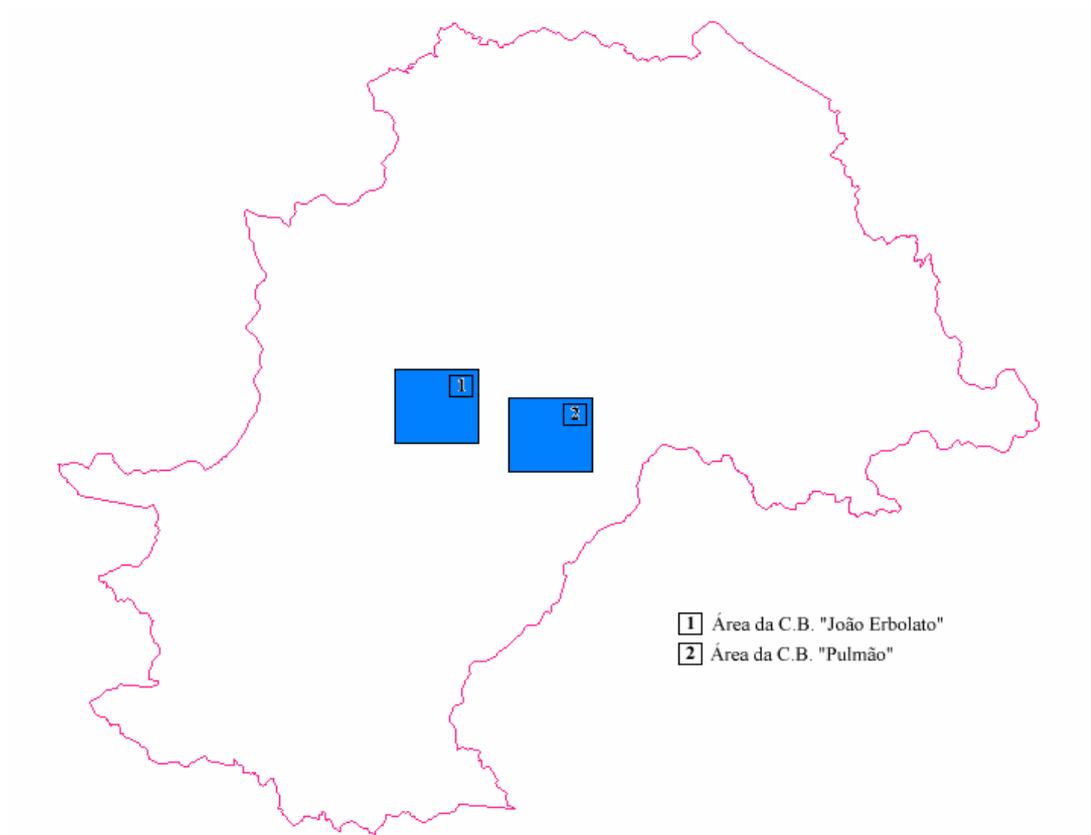


Figura 4.1 – Localização dos dois sistemas em estudo dentro do limite do município

4.1 – CASA DE BOMBAS “JOÃO ERBOLATO”

Essa casa de bombas está localizada na região centro-oeste da cidade no Setor Jardim Chapadão, instalada dentro do C.R.D. Norte / Sul que é abastecido através de uma derivação da

S.A. Norte I. A região é composta, predominantemente, por consumidores residenciais, boa parte deles verticalizados, e comerciais, contando ainda com poucas atividades industriais de pequeno porte e uma grande concentração de unidades militares, entre elas a Escola Preparatória de Cadetes do Exército – EsPCEx e a 11ª Brigada de Infantaria Leve – GLO (Garantia da Lei e da Ordem), perfazendo um total de 4.570 ligações, 6.381 economias e uma população estimada em 40.000 habitantes.

A adução de água se dá até uma caixa de sucção da qual o sistema de bombeamento se utiliza para operação de recalque. O bombeamento se desenvolve a partir da casa de bombas através de uma linha recalque de material Polyarm em diâmetro de 400 mm por uma extensão de 1.311,00 m, até um anel na Rua Orlando Carpino (Ponto “A”), ao redor do antigo Reservatório Elevado do Castelo, hoje desativado, onde é feita a distribuição diretamente na rede (Figura 4.2).

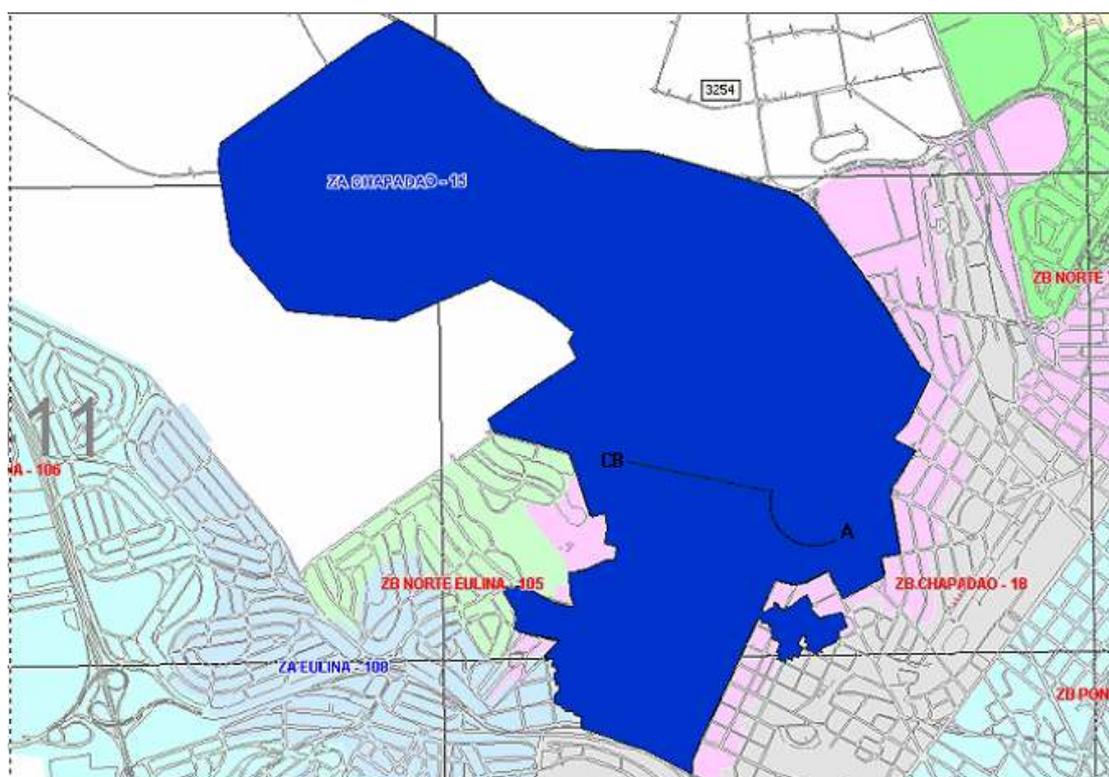


Figura 4.2 – Limite da zona alta do Setor Chapadão, localização da C. B. “João Erbolato” e caminhamento da Linha de Recalque até o ponto de distribuição direta (Ponto “A”)

Esse sistema de recalque é dotado de dois conjuntos moto-bomba, sendo um principal para operação diária e outro reserva. O conjunto principal que normalmente opera é uma bomba da marca Mark Peerless (atualmente produzida pela Mark Grandfus), modelo 8AE17, potência de 250 cv, diâmetro do rotor de 380 mm, altura monométrica de 50 mH₂O, vazão de 900 m³/h e 1.785 rpm., acoplado a um motor elétrico de indução da marca WEG, modelo 315SM0390, trifásico, potência de 250 cv, 1.785 rpm, categoria de isolamento “B” e categoria de partida “N”.

O conjunto reserva é dotado de uma bomba da marca Sulzer, modelo SM 302-320, potência de 250 cv, diâmetro do rotor de 325 mm, altura manométrica de 50 mH₂O, vazão de 900 m³/h e 1.750 rpm, acoplado a um motor elétrico assíncrono da marca Arno, modelo E 280 M, trifásico, potência de 250 cv, 1.780 rpm, categoria de isolamento “F” e categoria de partida “A”. As curvas originais de ambas as bombas se encontram disponíveis nos “Anexos” deste trabalho. A Figura 4.3 apresenta uma visão do arranjo desta casa de bombas.



Figura 4.3 – Vista geral da Casa de Bombas “João Erbolato”

Essa estação se encontra enquadrada num regime de tarifação de energia elétrica Convencional – “Grupo A – A4 (De 2,3 a 25 kV)”, com demanda contratada de 154 kW.

O sistema de operação normal desta unidade se desenvolve num ciclo contínuo de 24 horas ininterruptas do conjunto principal. O conjunto reserva não tem sido acionado, nem esporadicamente. A experiência na operação deste sistema, permitiu à *SANASA* definir como critério um nível de pressão fixo na saída do bombeamento, estabelecido em 53 mH₂O, independente do dia e da hora. Todo esse sistema já é totalmente tele-comandado com acionamento remoto através do CCO, que recebe informações “on-line” das pressões, vazões e níveis operacionais.

Esse valor na saída do bombeamento é suficiente para manter uma pressão dinâmica no ponto crítico (antigo Reservatório Elevado do Castelo), em torno de 12 mH₂O ao longo do dia e uma pressão no período noturno de 18 mH₂O, com o sistema tendendo ao regime “quase” estático. Como segurança contra algum efeito de sobrepressão, o sistema possui uma estrutura de controle interligada ao Reservatório Semi-Enterrado do C.R.D. Jardim Chapadão, cuja função é aliviar valores de pressão acima da faixa de trabalho ao redor do Reservatório Elevado do Castelo, acima descrita. Nesse caso específico, uma válvula de controle automática (VCA) localizada na estrutura de controle se abre, aduzindo água ao Reservatório Semi-Enterrado e aliviando o sistema. Contudo, sendo este um setor de dimensão razoável e com uma topografia bastante irregular, nos pontos mais baixos se verificam valores de pressão relativamente elevados, o que fez com que a *SANASA* implementasse uma área de redução de pressão controlada por uma outra VCA dentro dessa zona alta.

O testes nesse sistema de bombeamento se desenvolveram com a aquisição de dados em campo entre os dias 16 e 29/05/2.006. Uma equipe do Setor de Pitometria e Macromedição da *SANASA* foi alocada para medições “in loco”. Foram empregados os seguintes equipamentos nesta “campanha”:

- 2 Data-Loggers de pressão, marca Technolog, modelo Metrolog P P/D 200 m, faixa de leitura de 0 a 200 mH₂O e erro de 0,5% do fundo de escala;
- 3 Cosmos-Data-Loggers, marca Meinecke, modelo CDL – 1U, saída de 4 à 20 mA;

- 1 microcomputador, AMD – K6 II, 256 Mb de RAM, Processador 400 MHz, apenas com a função de acumular dos dados lidos através dos aparelhos;
- 1 FLUKE© para aquisição de todos os parâmetros elétricos do sistema.

§ Obs. – As curvas de calibração, erros e especificações dos equipamentos se encontram inseridas nos Anexos deste trabalho.

Os equipamentos foram instalados em pontos estratégicos do sistema, sendo o FLUKE© (Figura 4.4) no painel elétrico para aquisição dos dados de tensão, corrente, potência, fator de potência, frequência e potência consumida. Os dois Data-Loggers de pressão foram instalados um a montante e outro a jusante do conjunto moto bomba principal em operação (Figura 4.5). Dois dos Cosmos-Data-Loggers foram instalados: o primeiro junto ao medidor de eletromagnético de vazão, marca CONAUT, já disponível na unidade para aquisição dos dados de vazão e, o segundo, junto ao inversor de frequência, para aquisição dos dados de rotação do conjunto moto-bomba (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Instalação dos equipamentos de aquisição de dados



Figura 4.5 – Posicionamento dos data-loggers de pressão no sistema de bombeamento

Como o medidor de vazão da unidade está localizado na entrada da caixa de sucção, portanto antes do sistema de recalque, houve a necessidade da aquisição ao longo do tempo dos dados do nível da referida caixa através de um transmissor de pressão manométrica, marca SMAR, modelo LD-301, que foi instalado no local associado ao terceiro e último Cosmos-Data-Logger (Figuras 4.6 e 4.7). As curvas de calibração do medidor de vazão e do transmissor de pressão também se encontram inseridas nos Anexos deste trabalho.

Através de uma rotina na planilha Excel, foram feitas as correções nas combinações entre as vazões lidas e os níveis da caixa de sucção no mesmo momento, ou seja, a cada instante de tempo o nível da caixa era comparado com a sua leitura anterior, caso o nível indicasse queda, esse volume referente a diferença das leituras era transformado em vazão e adicionado à leitura do medidor. Do contrário, se o nível indicasse aumento, o volume referente a diferença era transformado em vazão e subtraído da leitura do medidor.

Foi solicitado, junto da *SANASA*, a operação desse bombeamento pelo sistema convencional em alguns dias, ou seja, operando o conjunto moto-bomba em rotação nominal



Figura 4.6 – Aquisição dos dados de nível da caixa de sucção



Figura 4.7 – Transmissor de pressão SMAR instalado para leitura e aquisição dos dados de nível da caixa de sucção

e com o controle da vazão através de uma válvula gaveta, cunha de borracha, localizada na saída da estação. Como a unidade é operada pelo CCO através de tele-comando, foi possível o atendimento da solicitação por dois dias, porém somente no horário das 9:00 às 16:30 hs., período em que foi destinado um operador para o local que fazia todas as intervenções no sistema para o controle da vazão. Esse teste de operação convencional se desenvolveu nos dias 25 e 26/05/2.006.

Os equipamentos foram configurados para uma leitura a cada 10 segundos (tempo base), sendo que a cada 3 minutos (intervalo de gravação) era feita a média das 18 leituras e o resultado gravado na memória uma vez. Com isso, foi possível fazer um longo período de teste com todos os dados obtidos do sistema a cada 3 minutos.

De todo o período de dados acumulados no microcomputador e nas memórias dos data-loggers, excluindo aqueles em que ocorreram imprevistos operacionais que requereram ações diferentes da rotina, além da perda de alguns dados devido a falha num dos equipamentos, foi possível selecionar dois dias de operação com o inversor de frequência, como também os dois dias com operação convencional. Procurou-se respeitar um certo padrão sazonal nessa seleção de dias, a fim de se manter perfis semelhantes de demanda. Desta forma, foram selecionados os dados coletados dentro da mesma semana nos dias 22 e 23/05/2.006 (segunda e terça-feira) para operação com o inversor de frequência e nos dias 25 e 26/05/2.006 (quinta e sexta-feira) para operação convencional.

Desses quatro dias selecionados foram efetivamente utilizados os dias 22 e 26/05/2.006 na avaliação, segunda e sexta-feira respectivamente, dias de maiores consumos dentro da semana. A partir dos dados coletados, selecionados e devidamente tratados, se iniciou a interpretação e a avaliação deles.

4.2 – CASA DE BOMBAS “PULMÃO”

Essa casa de bombas está localizada na região leste da cidade na saída das Estações de Tratamento de Água (ETA) 3 e 4, o sistema de recalque recebe água diretamente do Reservatório Semi-Enterrado do “Pulmão”. A região é composta, predominantemente, por consumidores residenciais de classe alta e média alta, comerciais, incluindo um grande Shopping Center e um grande Hipermercado, além de uma favela, perfazendo um total de 12.858 ligações, 18.044 economias e uma população estimada em 90.000 habitantes.

A adução de água se dá diretamente do Reservatório Semi-Enterrado do “Pulmão” à Casa de Bombas de mesmo nome, dentro da área da ETA. O bombeamento se desenvolve a partir dessa unidade através de uma Sub-Adutora denominada “Leste”. A S.A. “Leste” tem por finalidade, no panorama operacional atual da *SANASA*, a adução de água ao Centro de Reservação e Distribuição (C.R.D.) “Jd. Paranapanema”, além da distribuição direta ao longo de seu caminhamento a 13 bairros e uma favela. Somente o C.R.D. “Jd. Paranapanema” é o responsável pelo abastecimento do Jd. Paranapanema e imediações (5 bairros), como também alimenta o C.R.D. “Jd. Carlos Lourenço”, o qual atende a outros 7 bairros.

A S.A. “Leste” é construída em material de ferro fundido, com diâmetros de 500 e 400 mm em uma extensão total de 6.054,50 m. A topologia desta Sub-Adutora já foi apresentada no capítulo 3 deste trabalho (Figura 3.22 – página 54). A Tabela 4.1, a seguir, apresenta a divisão dessa linha em trechos a partir da saída do bombeamento, com as respectivas derivações (blocos), cotas e diâmetros ao longo do seu caminhamento. A Figura 4.8 ilustra cada um desses blocos.

Tabela 4.1 – Divisão da S. A. “Leste” em trechos ao longo do caminhamento

S.A. Leste					
Trechos	Extensão (m)	Diâmetro (mm)	Material	Bloco	Cota (m)
Saída Pulmão	62,00	500	Ferro Fundido	--	727,970
Saída Pulmão até A	1.998,00	500	Ferro Fundido	4	706,156
A até B	1.158,00	500	Ferro Fundido	5	671,346
B até I	506,80	500	Ferro Fundido	--	675,089
I até D	204,10	500	Ferro Fundido	3	692,303
I até E	282,90	500	Ferro Fundido	--	700,000
E até F	798,70	500	Ferro Fundido	2	711,138
E até Paranapanema	1.044,00	400	Ferro Fundido	1	727,306
Σ	6.054,50				

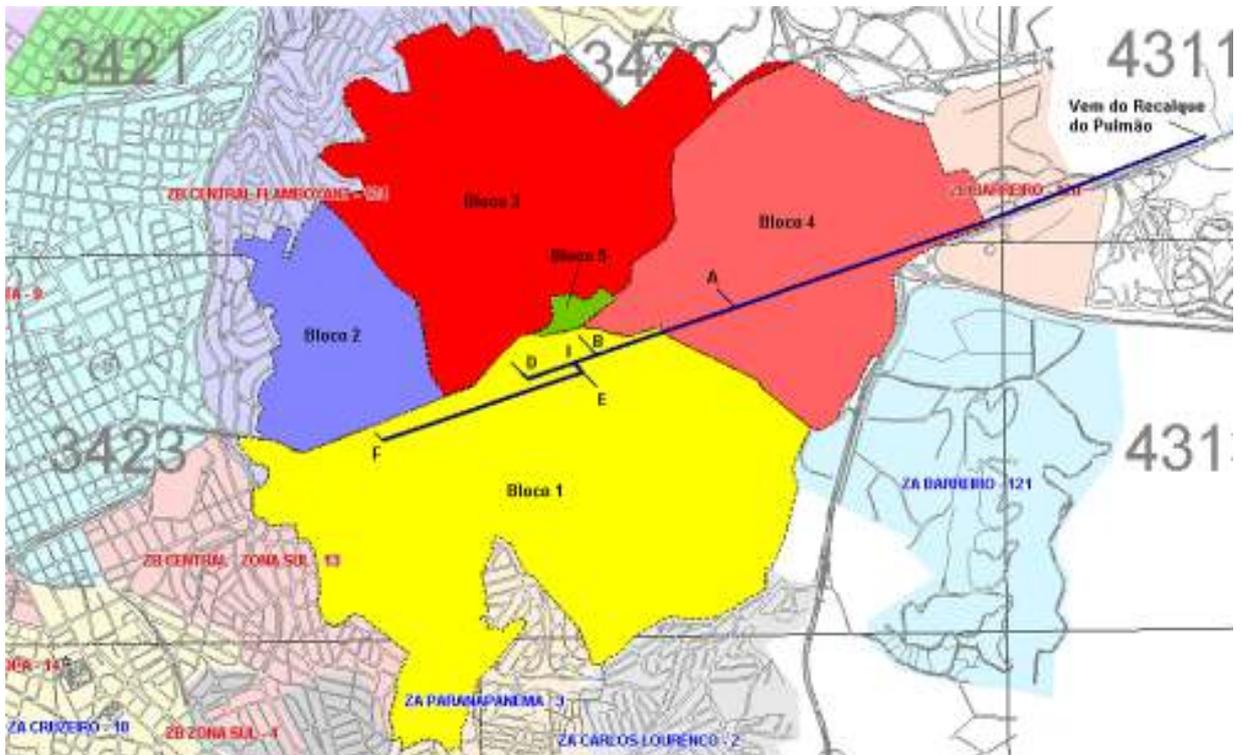


Figura 4.8 – Limite da área de influência da C. B. “Pulmão” com as divisões em blocos associados às derivações da S. A. “Leste”

Esse sistema de recalque é dotado de dois conjuntos moto-bomba que operam alternadamente. O conjunto do Grupo 1 é dotado de uma bomba da marca Worthington, modelo 10 LR 15 “A”, potência de 300 cv, diâmetro do rotor de 375 mm, altura monométrica de 46,10 mH₂O, vazão de 1.080 m³/h e 1.775 rpm., acoplado a um motor elétrico de indução da marca GE, modelo 48.2854.210, trifásico, potência de 300 cv, 1.780 rpm e categoria de isolamento “B”.

O conjunto do Grupo 2 é dotado também de uma bomba da marca Worthington, modelo 10 LR 15 “A”, potência de 300 cv, diâmetro do rotor de 362,5 mm, altura manométrica de 39,40 mH₂O, vazão de 1.080 m³/h e 1.775 rpm, acoplado a um motor elétrico de indução trifásico da marca GE, modelo 48.2854.2501, trifásico, potência de 300 cv, 1.780 rpm e categoria de isolamento “B”. As curvas originais de ambas as bombas se encontram disponíveis nos “Anexos” deste trabalho. A Figura 4.9 mostra uma vista geral desta casa de bombas.

Essa estação se encontra enquadrada num regime de tarifação de energia elétrica Horosazonal – Categoria Azul – “A4 (De 2,3 a 25 kV)”, com demanda contratada de 270 kW.



Figura 4.9 – Vista geral da Casa de Bombas “Pulmão”

O sistema de operação normal desta unidade se desenvolve num ciclo que vai das 5:00 hs. até às 23:00 hs. com os grupos trabalhando alternadamente, ou seja, cada dia um dos grupos é quem entra em operação na estação. Fora desse horário, das 23:00 hs. às 5:00 hs. do dia subsequente, a unidade permanece desligada operando por gravidade através de uma estrutura de “by-pass” onde existe uma válvula de retenção.

Esse sistema de recalque, conforme descrito anteriormente, bombeia água para o C.R.D. do “Jd. Paranapanema”, tendo ainda quatro pontos de distribuição direta. O principal referencial deste sistema é o próprio C.R.D. “Jd. Paranapanema” onde, por critérios empíricos, a *SANASA* definiu um valor da pressão de chegada em torno de 15 mH₂O, independente do dia e da hora, durante o período de operação do sistema de recalque. O operador do “Pulmão”, se comunica via rádio pela manhã com o CCO / Equipe volante que vai fazendo o acompanhamento no C.R.D. “Jd. Paranapanema” da pressão de chegada na caixa de sucção. Essa equipe ou o CCO estabelece o nível de vazão na saída do bombeamento em função desse parâmetro. Ao longo do dia se fazem checagens constantes através dos dados disponíveis na tela do CCO, e um aumento ou redução da vazão é solicitada ao operador do “Pulmão”, conforme a necessidade.

Além desse referencial o operador ainda tem num manômetro, localizado imediatamente na saída do bombeamento, outro parâmetro que, também segundo critérios empíricos da *SANASA*, deve ficar entre 20 e 30 mH₂O durante a operação da estação (Figura 4.10).

O C.R.D. “Jd. Paranapanema” já é totalmente tele-comandado com acionamento remoto do CCO, que recebe informações “on-line” das pressões, vazões e níveis operacionais. No “Pulmão” ainda não existe o tele-comando, contudo as informações estão também disponíveis “on-line” na tela do CCO.

O testes nesse sistema de bombeamento se desenvolveram com a aquisição de dados em campo entre os dias 31/05/2.006 e 12/06/2.006. Novamente, uma equipe do Setor de Pitometria e Macromedição da *SANASA* forneceu o suporte necessário, tendo sido utilizado neste novo teste os seguintes equipamentos:



Figura 4.10 – Manômetro instalado na saída do bombeamento

- 5 Data-Loggers de pressão, marca Technolog, modelo Metrolog P P/D 200 m, faixa de leitura de 0 a 200 mH₂O e erro de 0,5% do fundo de escala;
- 2 Cosmos-Data-Loggers, marca Meinecke, modelo CDL – 1U, saída de 4 à 20 mA;
- 1 microcomputador, AMD – K6 II, 256 Mb de RAM, Processador 400 MHz, apenas com a função de acumular dos dados lidos através dos aparelhos;
- 1 FLUKE© para aquisição de todos os parâmetros elétricos do sistema.

§ Obs. – As curvas de calibração, erros e especificações dos equipamentos se encontram inseridas nos Anexos deste trabalho.

Os equipamentos foram instalados em pontos estratégicos do sistema, sendo um Data-Logger de pressão a jusante do conjunto moto bomba em operação e outro imediatamente após a válvula borboleta, também na saída do bombeamento. Essa válvula borboleta é manobrada quando o sistema opera pelo método convencional de controle de vazão, ou seja, sem o inversor

de frequência. O terceiro Data-Logger de pressão foi instalado na chegada da caixa de sucção do C.R.D. “Jd. Paranapanema”. Os outros dois Data-Loggers foram instalados nas derivações para os blocos 3 e 4 (Pontos “A” e “D”), pois nesses locais não existem estruturas de controle com medidores de vazão na entrada. As demais entradas de blocos, pontos “B”, “F” e no C.R.D. “Jd. Paranapanema”, já contam com essas estruturas.

Um Cosmos-Data-Logger foi instalado junto ao medidor eletromagnético de vazão, marca CONAUT, na saída do bombeamento para aquisição dos dados da vazão recalçada. O outro Cosmos-Data-Logger foi instalado juntamente com o FLUKE© no painel elétrico para aquisição dos dados de rotação da bomba e demais parâmetros elétricos do sistema, respectivamente (Figuras 4.11 e 4.12).

Assim como no teste desenvolvido na C. B. “João Erbolato”, foi solicitado junto da *SANASA* a operação desse bombeamento pelo sistema convencional em alguns dias, ou seja, operando o conjunto moto-bomba em rotação nominal e com o controle da vazão através de uma válvula borboleta, localizada na saída da estação. Nesse caso específico, onde a unidade já conta



Figura 4.11 – Aquisição dos dados de vazão



Figura 4.12 – Aquisição dos dados elétricos e rotação

com um operador fixo no local durante todo o período de operação do recalque, não houve qualquer restrição no atendimento da solicitação, apenas uma adequação na rotina. Esse teste de operação convencional se desenvolveu nos dias 07, 08 e 09/06/2.006.

Os equipamentos foram configurados da mesma maneira do primeiro teste, ou seja, com uma leitura a cada 10 segundos (tempo base), sendo que a cada 3 minutos (intervalo de gravação) era feita a média das 18 leituras e o resultado gravado na memória uma vez. Com isso, foi também possível fazer um longo período de teste com todos os dados obtidos do sistema a cada 3 minutos.

De todo o período de dados acumulados no microcomputador e nas memórias dos Data-Loggers, foi possível selecionar dois dias de operação com o inversor de frequência, como também outros dois dias com operação convencional. Procurou-se também respeitar um certo padrão sazonal nessa seleção dos dias, com a finalidade de manter-se perfis semelhantes de demanda. Desta forma, foram selecionados os dados coletados nos dias 01 e 02/06/2.006 (quinta e sexta-feira) para operação com o inversor de frequência e nos dias 08 e 09/06/2.006 (quinta e

sexta-feira) para operação convencional. Esses quatro dias foram necessários devido a rotina de operação alternada dos grupos.

Para uma avaliação mais conclusiva a respeito dessa unidade especificamente, foi desenvolvido um modelo matemático-computacional através do EPANET¹ que procurou representar fielmente a S. A. “Leste” e a C. B. “Pulmão”, objeto desse estudo (Figura 4.13). Foram utilizados os dados levantados em campo para a calibração desse modelo-matemático, bem como as regras operativas definidas pela SANASA e hoje em aplicação, buscando-se assim representar a situação real de operação.

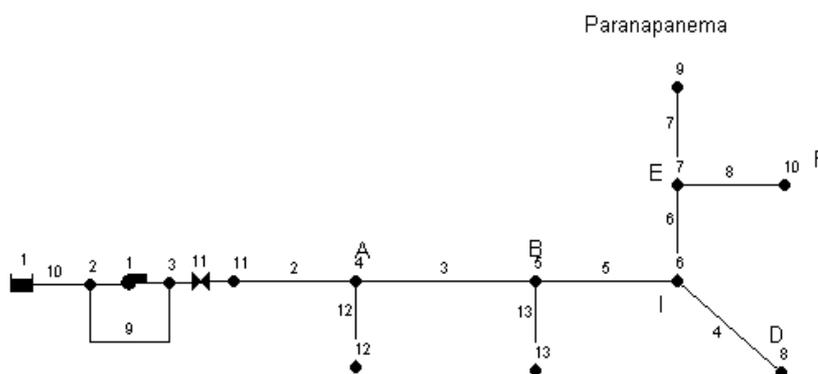


Figura 4.13 – Modelo matemático-computacional desenvolvido no EPANET

Também se desenvolveu, através do Toolkit do EPANET¹, um programa de “Auditoria Energética” que, baseado nos resultados gerados nas simulações do modelo-matemático descrito acima, foi capaz de avaliar os consumos diários de energia elétrica da unidade (Figuras 4.14 a 4.16). Finalmente, um terceiro e último modelo matemático-computacional já existente, baseado em algoritmo genético multi-objetivo com restrições (Non-Dominated Sorting Genetic-Algorithm 2 – NSGA2), que foi desenvolvido por Deb et al. (2002), foi incorporado ao Toolkit do EPANET, criando uma rotina de busca de “rotações ótimas” que viessem a atender com excelência às demandas operacionais desse sistema.

¹ EPANET e o “Programmer’s Toolkit” foram desenvolvidos pela Water Supply e Water Resource Division da U.S. Environmental Protection Agency’s National Risk Management Research Laboratory

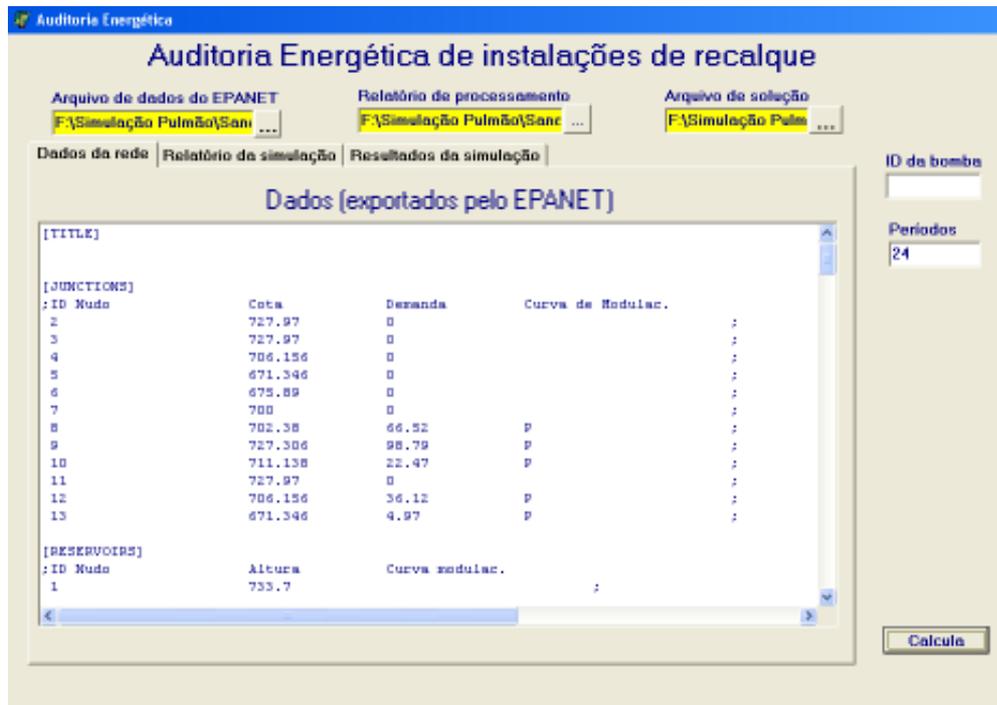


Figura 4.14 – Tela 1 do programa de “Auditoria Energética” com os dados exportados pelo EPANET e utilizando o Toolkit

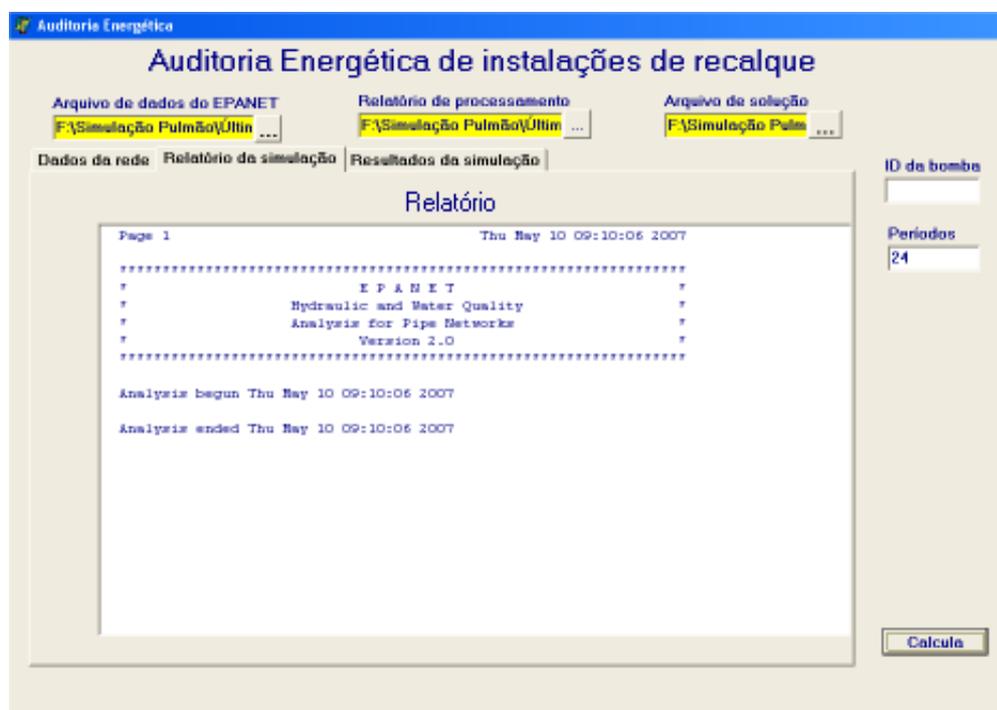


Figura 4.15 – Tela 2 do programa de “Auditoria Energética” com o relatório da simulação bem sucedida

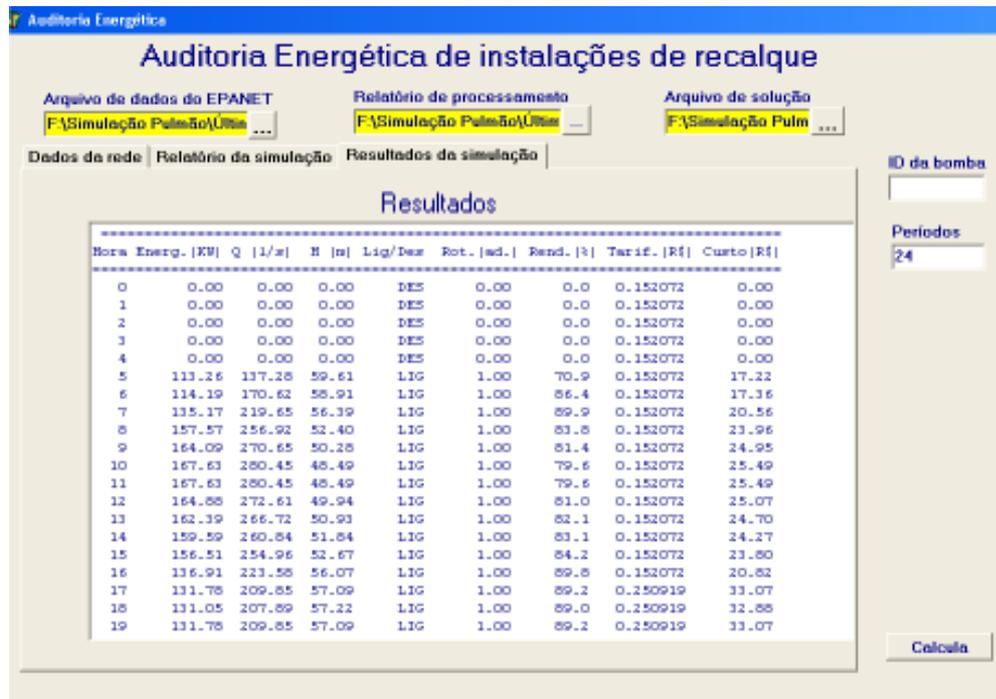


Figura 4.16 – Tela 3 do programa de “Auditoria Energética” com os resultados obtidos

Utilizando os três modelos matemático-computacionais apresentados, foi possível reproduzir a operação da C. B. “Pulmão” ao longo de um dia típico para três cenários de interesse:

- Cenário 1: “operação convencional da unidade com o controle de vazão por válvula de bloqueio”
- Cenário 2: “operação com inversor de frequência seguindo os critérios definidos pela SANASA”
- Cenário 3: “operação com inversor de frequência seguindo as “rotações ótimas” encontradas no modelo otimizador”.

No cenário 1, a válvula 11, localizada entre os nós 3 e 11 do modelo do EPANET, fez a função de uma válvula redutora de pressão (VRP), sendo que sua regulagem de saída variava a

cada hora segundo a média das pressões daquele período, por exemplo, entre as 9:00 e 10:00 hs. da manhã a regulagem de saída da VRP assumia o valor médio das pressões desse mesmo período. O valor médio das pressões a cada hora do dia foi levantado em campo durante os testes.

O cenário 2 reproduziu, da mesma forma que o cenário 1, a média das rotações a cada intervalo de 1 hora. Essa média das rotações também foi levantada a partir dos dados obtidos em campo durante os testes, seguindo estritamente os critérios operacionais empíricos definidos pela *SANASA* e que são praticados na operação desse sistema.

Para o cenário 3, foi estabelecido como ponto crítico e de referência a chegada de água na caixa de sucção do C.R.D. “Jd. Paranapanema” (nó 9). Nesse ponto, foi definido como critério uma pressão de 10 mH₂O durante todo o período, valor este que atende ao mínimo estabelecido pela NBR 12.218.

Finalmente, foram eleitas todas as derivações da S.A. “Leste” (pontos “A”, “B”, “D” e “F”, além do próprio C.R.D. “Jd. Paranapanema”) como pontos de interesse para avaliação da performance operacional do sistema. De posse das “rotações ótimas” geradas pelo modelo otimizador foram feitas todas as simulações no EPANET e no programa de “Auditoria Energética”. O resultado final nos permitiu avaliar a performance operacional do sistema e aferir do custo diário e mensal previstos em cada um dos cenários estudados.

“Nossas dívidas são traidoras e nos fazem perder o que, com frequência, poderíamos ganhar, por simples medo de arriscar.”

William Shakespeare

5. – RESULTADOS

5.1 – CASA DE BOMBAS “JOÃO ERBOLATO”

A partir dos dados coletados e devidamente tratados, passou-se a etapa de avaliação. Inicialmente, somente com os dados dos dias de operação convencional foram calculadas as rotações que seriam necessárias para se reproduzir as vazões e cargas medidas na saída da estação. No gráfico da Figura 5.1 é integralizado a cada hora a média dessas rotações.

Observa-se claramente que esse sistema trabalha de uma maneira bastante uniforme, com pouquíssimas variações, em rotações entre 85 e 90% da nominal. Notadamente, numa avaliação preliminar, isso já seria uma condição pouco recomendável para emprego de um inversor, haja vista que pouco seria o ganho numa relação custo-benefício. Outro fator relevante é

o próprio perfil da curva da bomba, que nesse caso é bastante plano e não recomendável no emprego com inversor de frequência devido a baixa variação de carga com a mudança da vazão, conforme observado por Souza et al. (1.978).

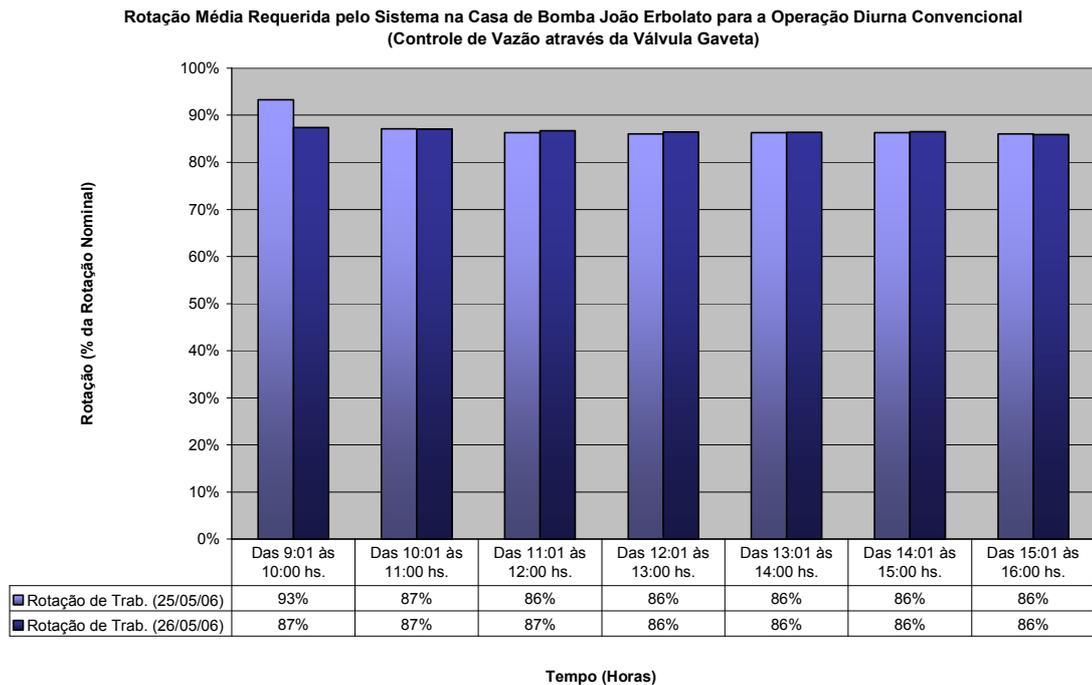


Figura 5.1 – Rotações médias necessárias na operação convencional da C.B. “João Erbolato”

Nos dias com operação pelo inversor de frequência essa avaliação se confirma. O gráfico da Figura 5.2 demonstra, efetivamente, que as rotações de trabalho se situam numa pequena faixa de 82 a 86% da rotação nominal do conjunto moto-bomba.

Obviamente, por menos que se varie a velocidade de operação do conjunto, haverá algum ganho em termos de economia de energia elétrica. Entretanto, como todos os parâmetros da bomba se alteram com a mudança das rotações, há que se discutir as questões de rendimento para uma avaliação mais conclusiva.

Fazendo o acúmulo desses valores de energia consumida em ambas as situações operacionais e comparando-os entre si, se obtém o ganho em termos de economia de energia elétrica. Na Figura 5.3 é esboçada essa comparação.

Rotação Média na Casa de Bomba João Erbolato Operando com Inversor de Frequência - 22 e 23/05/06

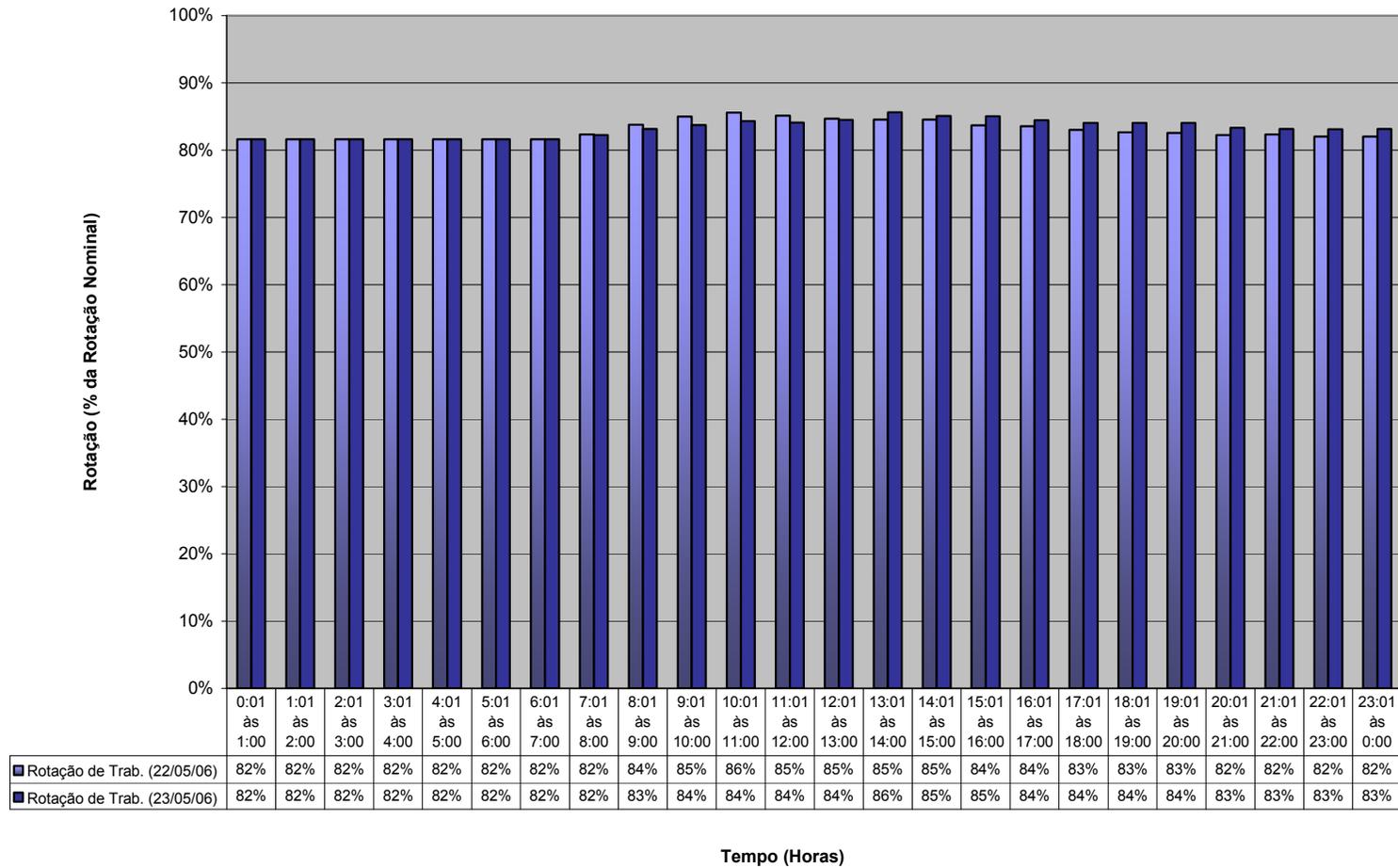


Figura 5.2 – Rotações médias utilizadas na operação com o uso de inversor de frequência na C.B. “João Erbolato”

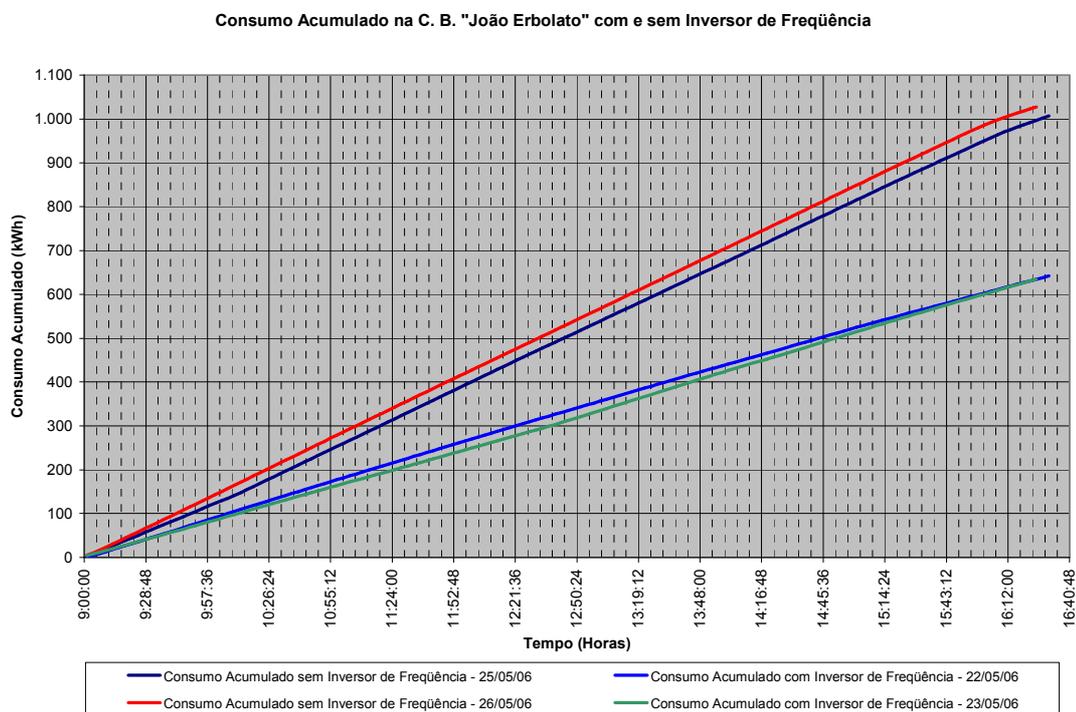


Figura 5.3 – Comparação do consumo acumulado de energia elétrica com e sem o uso de inversor de freqüência

Utilizando-se então dos demais dados de vazão, carga e rotação para operação com inversor de freqüência, adquiridos em campo, bem como as curvas de rendimento do conjunto moto-bomba em estudo para a rotação nominal, foi possível calcular as curvas de pontos homólogos e dos rendimentos em diferentes rotações. Foram condensados num único gráfico esses resultados, o que torna mais elucidativa as análises que se farão (Figura 5.4).

Embora tenham sido usadas somente as Leis de Semelhança para avaliação do rendimento em outras faixas de rotação, sabe-se que a correção do rendimento pode sofrer variações com a rotação (curva de colina). Essa correção pode ser feita introduzindo-se os rendimentos na equação de potência (capítulo 3 – equação (3) – página 41), considerando para isto o rendimento η_1 em rotação nominal e o rendimento η_2 para uma rotação qualquer, que pode ser obtido a partir da expressão empírica 12 a seguir. Comolet (1.961) também propôs uma outra expressão empírica para essa correção (equação 13). Contudo, os valores encontrados em ambas as expressões representaram diferenças muito pequenas, comparativamente àqueles encontrados

através das Leis de Semelhança para as variações de rotações observadas. Essas diferenças foram, em média, de 1,8 e 1,3% utilizando-se as equações 12 e 13, respectivamente. A Tabela 5.1 apresenta essas comparações.

$$\eta_2 = 1 - \left[(1 - \eta_1) \times \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{0,1} \right] \quad (12)$$

$$\eta_2 = \frac{\eta_1}{\eta_1 + (1 - \eta_1) \times \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{0,17}} \quad (13)$$

Onde:

η_1 – representa o rendimento do conjunto moto-bomba correspondente à rotação N_1

η_2 – representa o rendimento do conjunto moto-bomba correspondente à rotação N_2

N_1 e N_2 – representam as rotações do conjunto nas situações 1 e 2 (rpm)

A mencionada correção da equação 3 está apresentada na expressão 14 a seguir.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{N_2^3}{N_1^3} \times \frac{\eta_2}{\eta_1} \quad (14)$$

Tabela 5.1 – Quadro comparativo entre as diferentes expressões para correção do rendimento a partir da mudança de rotação

Correção dos Rendimentos para Diferentes Rotações		
Leis de Semelhança	Exp. de Potência Corrigida (Eq. 12)	Exp. de Comolet (Eq. 13)
90,0%	90,2%	89,7%
80,0%	80,4%	79,4%
60,0%	60,9%	59,1%
30,0%	31,5%	29,2%

Com base nos resultados alcançados, apresentados na Tabela 5.1 acima, optou-se por manter a correção dos rendimentos pelas Leis de Semelhança. A Tabela 5.2 sintetiza o enquadramento e a distribuição de toda a faixa de vazão verificada ao longo de um dia de operação normal dessa unidade.

Tabela 5.2 – Enquadramento da faixa de vazão de um dia típico em relação ao rendimento do conjunto moto-bomba

Faixa de Rendimento	30 - 60%	60 - 80%	> 80%	60 - 80%
Intervalo de Vazão (m³/h)	125,02 - 228,63	228,64 - 356,28	356,29 - 500,56	500,57 - 583,04
Número de Ocorrências	118	154	144	64
Porcentagem em relação ao Total	25%	32%	30%	13%
Faixa Horária	Das 2:30 às 7:00 Hs. Das 18:30 às 19:30 Hs.	Das 7:00 às 8:00 Hs. Das 17:00 às 18:30 Hs.	Das 8:00 às 10:00 Hs. Das 12:00 às 17:00 Hs.	Das 10:00 às 12:00 Hs. Das 19:30 às 2:30 Hs.

Analisando então o gráfico da Figura 5.4, na operação de um dia típico deste sistema de bombeamento, observa-se que não existe praticamente nenhuma variação de carga ao longo da faixa de vazão, a pressão de saída permanece constante próxima de 53 mH₂O. Isso já seria um indicador mais do que suficiente para o não uso de inversor de frequência.

Em 25% do dia, mais especificamente, aqueles correspondentes às vazões do período das 2:30 às 7:00 hs. e das 18:30 às 19:30 hs., o sistema opera no seu pior intervalo de rendimento, entre 30 e 60%. Em pelo menos 70% das horas do dia, ou seja, cerca de 17 horas, o conjunto opera entre 30 e 80% de rendimento, numa faixa de vazão que vai 125,02 até 356,28 m³/h e acima de 500,56 m³/h. O bombeamento é mais eficiente com vazões entre 356,29 até 500,56 m³/h, onde o rendimento do conjunto moto-bomba supera a faixa de 80%. Contudo, isso corresponde somente a 30% do dia, ou em termos de intervalo de tempo, 7 horas.

C. B. "João Erbolato" - Curva da Bomba para Diferentes Rotações x Demanda do Sistema, Associada ao Rendimento Real da Bomba

112

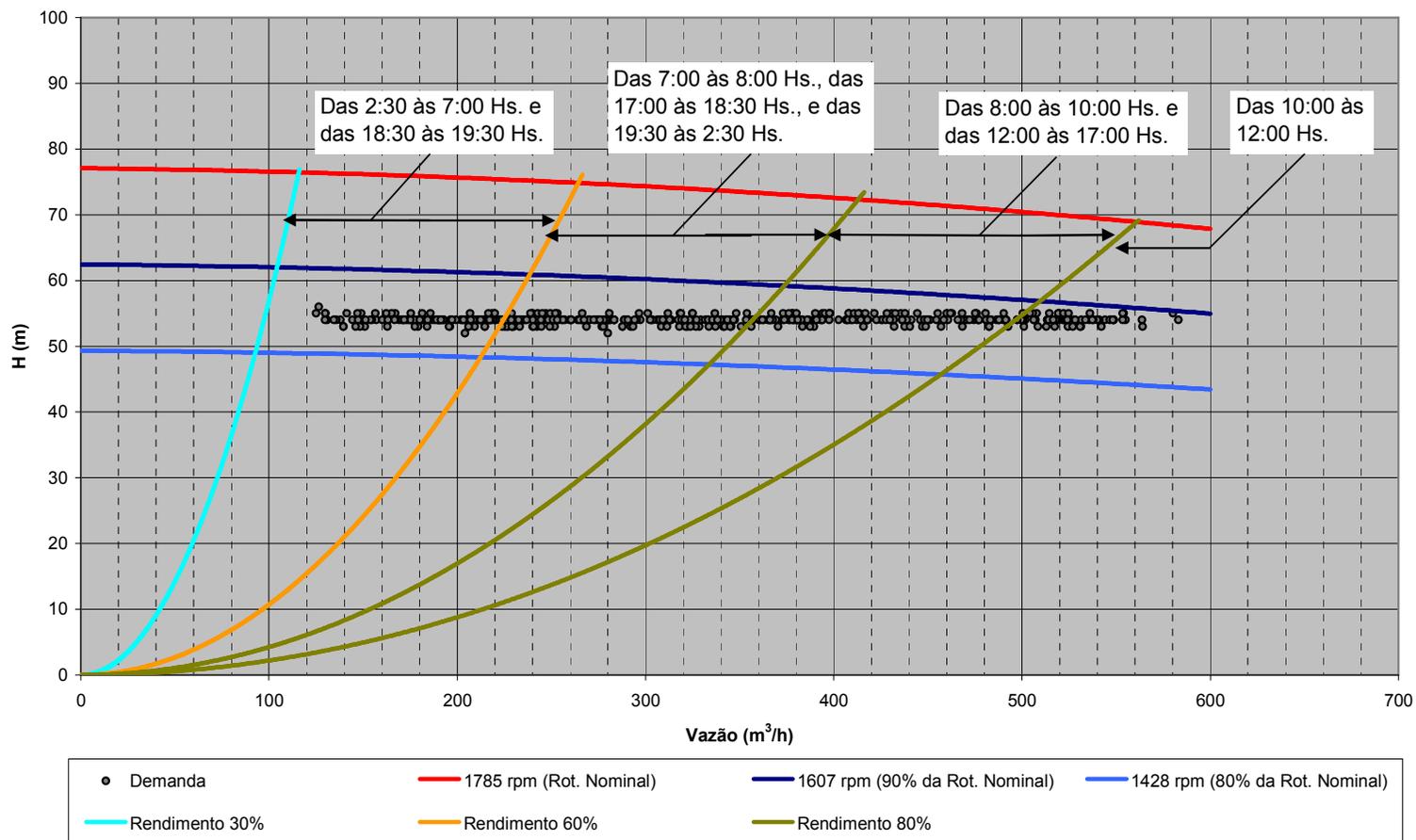


Figura 5.4 – Curva da bomba para diferentes rotações × Demanda do sistema, associado às curvas de rendimento da bomba e seus pontos homólogos

Muito embora a tarifação dessa unidade seja o padrão “Convencional – Grupo A – A4”, o comportamento operacional denota uma dificuldade na escolha de outra modalidade de tarifa que fosse mais vantajosa do que a atual, uma vez que, um dos horários de pior rendimento é justamente dentro do período horo-sazonal, onde os valores da tarifa de energia elétrica são mais elevados (Tabela 5.2). Nesse caso, seria também necessária a verificação da possibilidade de alteração da rotina operacional o que parece, numa avaliação primária, difícil sem investimentos em obras, tal como o emprego de um Reservatório Elevado. O Reservatório Elevado do Castelo, disponível hoje no sistema, é antigo e de baixíssima capacidade (volume de 100 m³), além do que necessitaria de reformas e outras adequações, visto que já não opera há muito tempo.

Observando a área correspondente à zona alta do Setor Chapadão, se verifica uma certa incoerência, pois se trata de uma área de recalque com desníveis geométricos bastante significativos e pontos bastante distintos entre seus limites extremos. A incoerência mencionada se reflete no aparecimento de regiões com excesso de pressão, fato evidenciado pela existência de uma válvula de controle automática (VCA) redutora de pressão dentro da própria área, ou seja, para se atender ao ponto crítico de baixa pressão, ao redor do Reservatório Elevado do Castelo, com valores mínimos (em torno de 10 mH₂O), criam-se regiões com excessos de pressão em outros pontos. Nesse caso específico, o mais recomendado seria a reavaliação do limite de setorização e a criação de uma zona baixa diminuindo assim a área correspondente à zona alta.

Haveria a necessidade de um alto investimento na construção de um reservatório semi-enterrado para suprir as necessidades de demanda dessa parcela, porém o próprio sistema de bombeamento poderia ser redimensionado em função do novo limite da zona alta o que, de certa forma, também traria uma significativa economia ao longo do tempo.

A Figura 5.5 esboça a “*curva neutra*” relativa a demanda de um dia típico nesse sistema onde o comportamento discutido fica bem evidenciado.

Uma outra possibilidade a ser avaliada seria apenas a troca do conjunto moto-bomba atual por um mais adequado à demanda do sistema. Preferencialmente, que cobrisse de forma mais eficiente a faixa de vazão entre 228,64 até 500,56 m³/h, onde o sistema opera 62% do dia, associando isso ainda às curvas de melhores rendimentos, ou seja, que o ponto de vazão máxima

estivesse situado à direita da curva de melhor rendimento. Certamente isso proporcionaria bons resultados, uma vez que na maior parte do tempo o conjunto flutuaria dentro dos melhores limites de rendimento, conforme sugerido por Souza et al. (1.978), Europump and Hydraulic Institute (2.004) e Gambica (2.007).

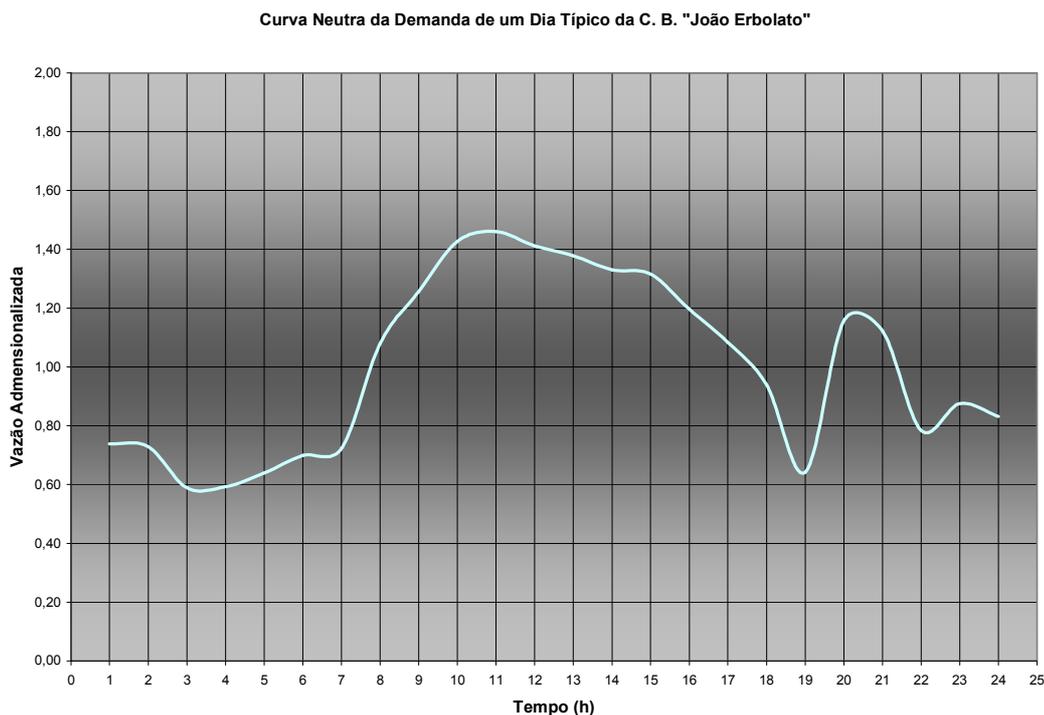


Figura 5.5 – “Curva Neutra” relativa à demanda num dia típico da C. B. “João Erbolato”

Nos catálogos de dois fabricantes, disponíveis na Internet (IMBIL – <http://www.hidrovector.com.br/catalogo-eletronico.asp> – Acesso em 02/04/2.007 e KSB – <http://www.ksb.com.br> – Acesso em 13/04/2.007), foi possível selecionar quatro bombas cujas características atendem à faixa de vazão mencionada no parágrafo anterior com bons níveis de rendimento. As características dessas bombas estão inseridas na Tabela 5.3.

O maior atrativo dos conjuntos selecionados está ainda por conta da potência que, segundo os fabricantes, para se atender aos requisitos de vazão e carga desse sistema, não seriam superiores a 152,0 cv. O conjunto atualmente em operação tem uma potência de 250 cv.

Tabela 5.3 – Características das bombas selecionadas em catálogos. Fonte: IMBIL e KSB

Bomba	1	2	3	4
Fabricante	IMBIL	IMBIL	KSB	KSB
Linha	Bipartida	Bipartida	Bipartida	Bipartida
Modelo	150-450 D	150-450 A	RDL 200-400 B	ETA 150-40
Rotação (rpm)	1775	1775	1750	1760
Diâmetro do Rotor (mm)	391	378,8	395	396
Vazão (m ³ /h)	580	580	580	580
Altura Manométrica (m)	55	55	55	55
Potência (cv)	150,2	144,7	148,0	152,0
NPSH _R (m)	4,22	4,78	4,29	3,55

Cabe aqui salientar, que o simples fato da bomba ser de uma potência menor, não significa que todos os resultados serão positivos, uma vez que o seu rendimento também diminuirá. Em bombas pequenas, com potência de até 10 cv, se observam rendimentos muito baixos. Nas Figuras 5.6 e 5.7, são mostradas curvas de rendimento de duas bombas com potência de 5,09 e 10,32 cv. Nelas se nota que em rotação nominal o máximo rendimento já seria 66,7 e 68,3%, respectivamente. Exemplificando os dois casos, para uma vazão de 30 m³/h / carga de 25,00 m e uma vazão de 40 m³/h / carga de 40,00 m, esses rendimentos seriam de 54,5 e 57,4%. No rendimento global do conjunto e para uma rotação inferior à nominal esse valor, que já é baixo, se tornaria pior.

Na análise ora formulada da busca por bombas melhores que atendam às características desse sistema de bombeamento especificamente, a avaliação torna-se bastante interessante, pois operando qualquer uma das quatro bombas selecionadas de forma convencional (Tabela 5.3), ou seja, sem o uso de um inversor de frequência, no atendimento das características e demandas diárias verificadas, extraídas a partir dos dados levantados em campo, parece ser muito mais vantajoso do ponto de vista de economia do que o conjunto atual operando com inversor de frequência. Além disso, essa mudança permitiria uma reconstrução da demanda de potência junto a concessionária de energia elétrica, o que refletiria também no custo final. As Figuras do número 5.8 ao 5.17 apresentam as curvas características destas bombas.

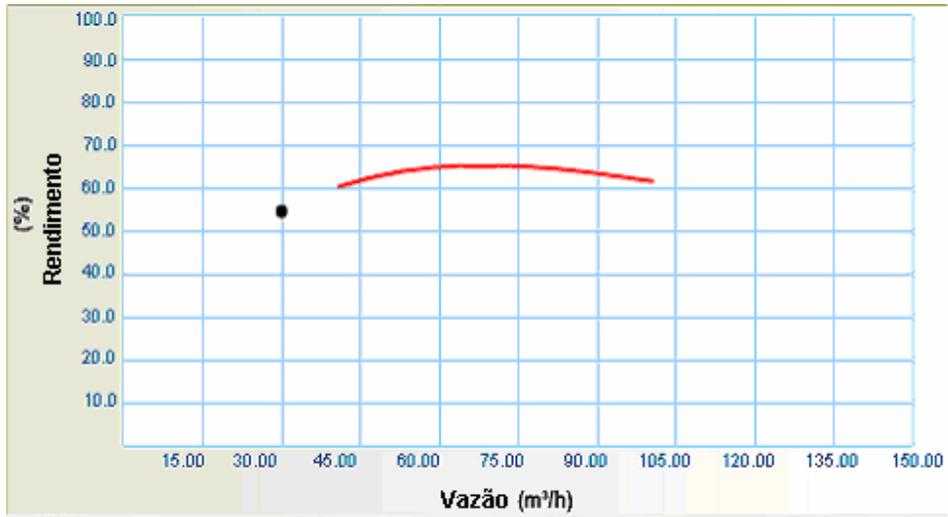


Figura 5.6 – Curva do rendimento – Modelo 75-330 A – $Q = 30 \text{ m}^3/\text{h}$ / $H = 25,00 \text{ m}$. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

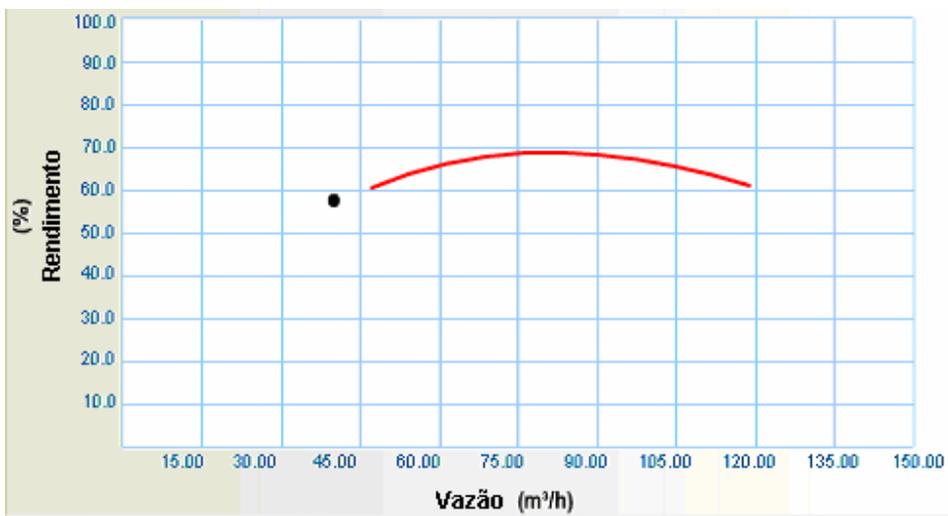


Figura 5.7 – Curva do rendimento – Modelo 75-330 A – $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ / $H = 40,00 \text{ m}$. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

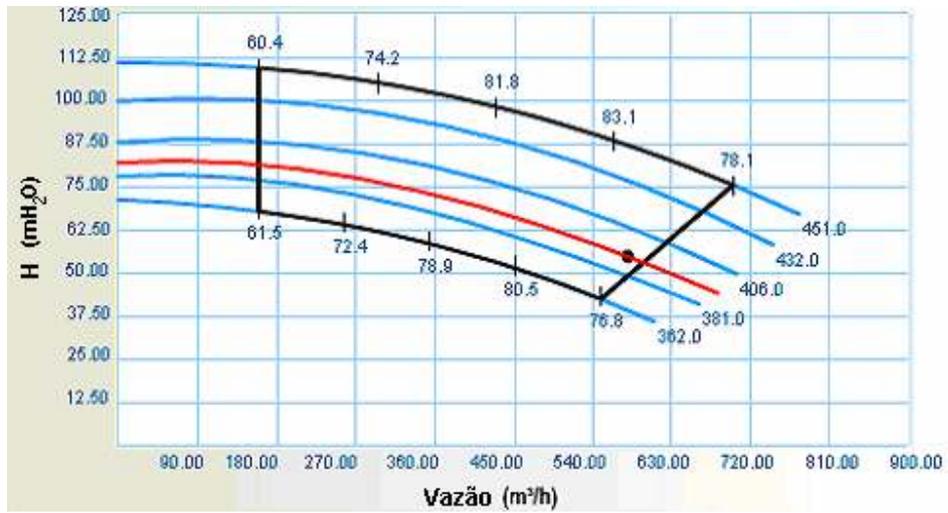


Figura 5.8 – Curva característica da bomba bipartida – Modelo 150-450 D. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

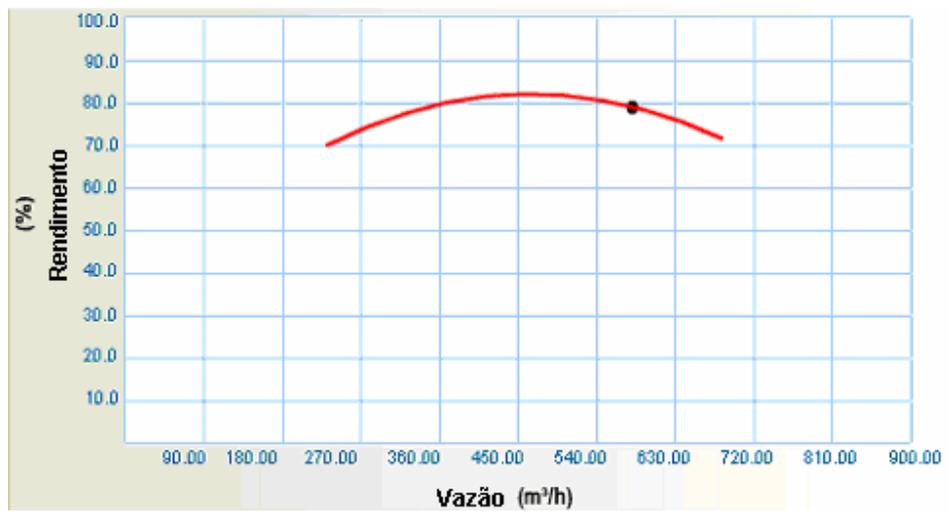


Figura 5.9 – Curva do rendimento da bomba bipartida – Modelo 150-450 D. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

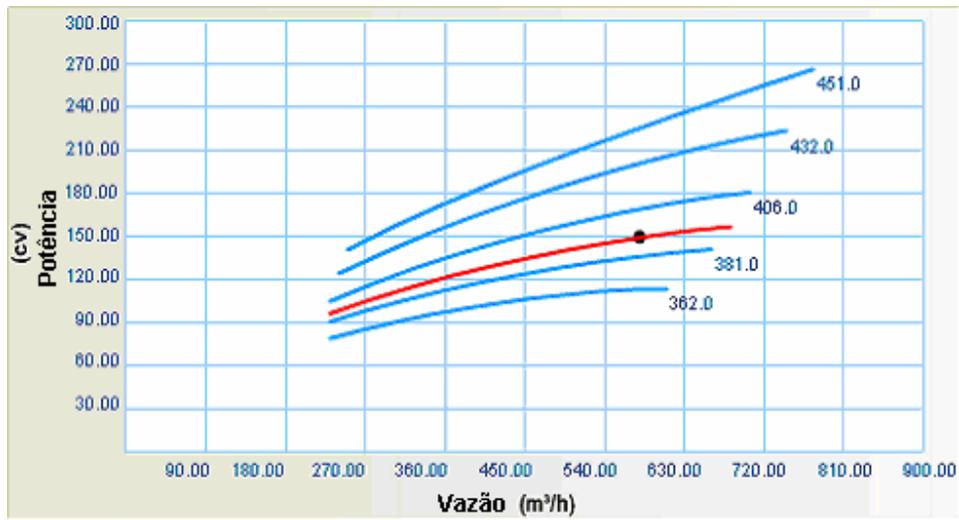


Figura 5.10 – Curva da vazão x potência da bomba bipartida – Modelo 150-450 D. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

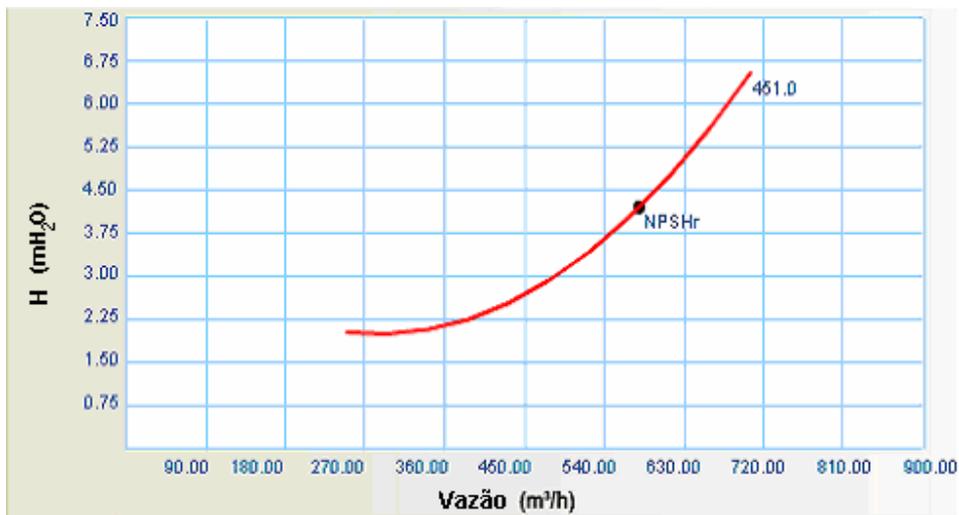


Figura 5.11 – Curva do NPSH_R da bomba bipartida – Modelo 150-450 D. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

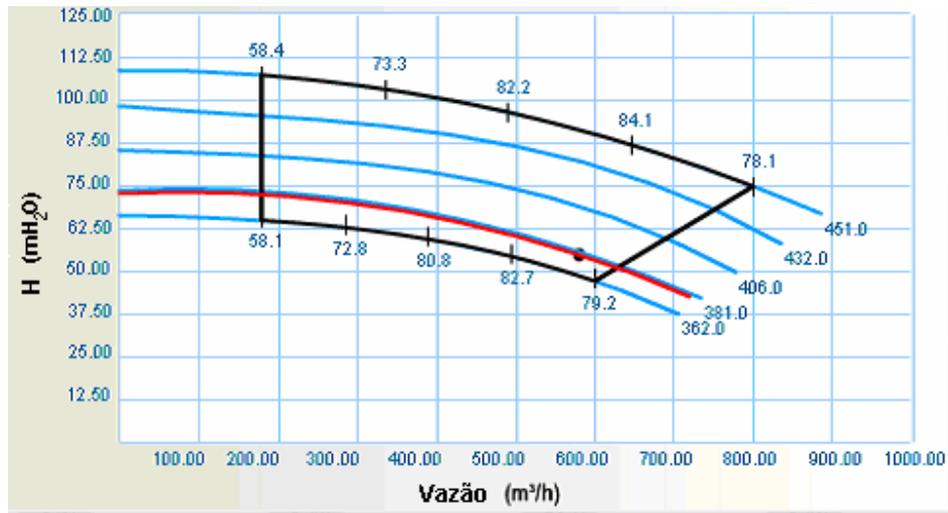


Figura 5.12 – Curva característica da bomba bipartida – Modelo 150-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

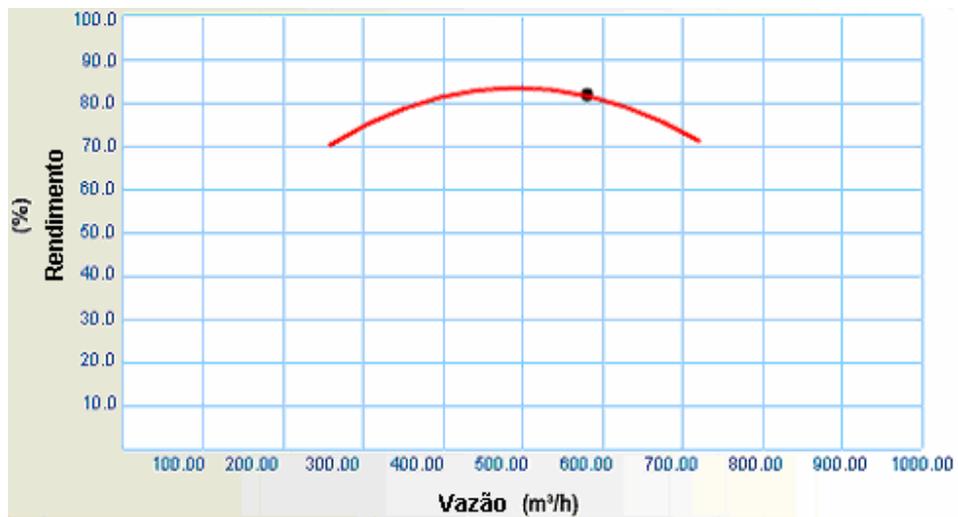


Figura 5.13 – Curva do rendimento da bomba bipartida – Modelo 150-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

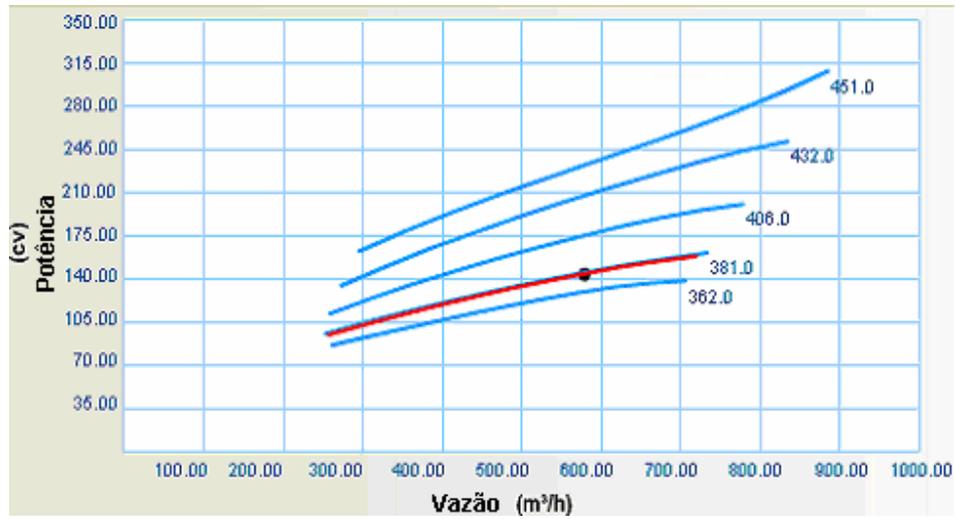


Figura 5.14 – Curva da vazão x potência da bomba bipartida – Modelo 150-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

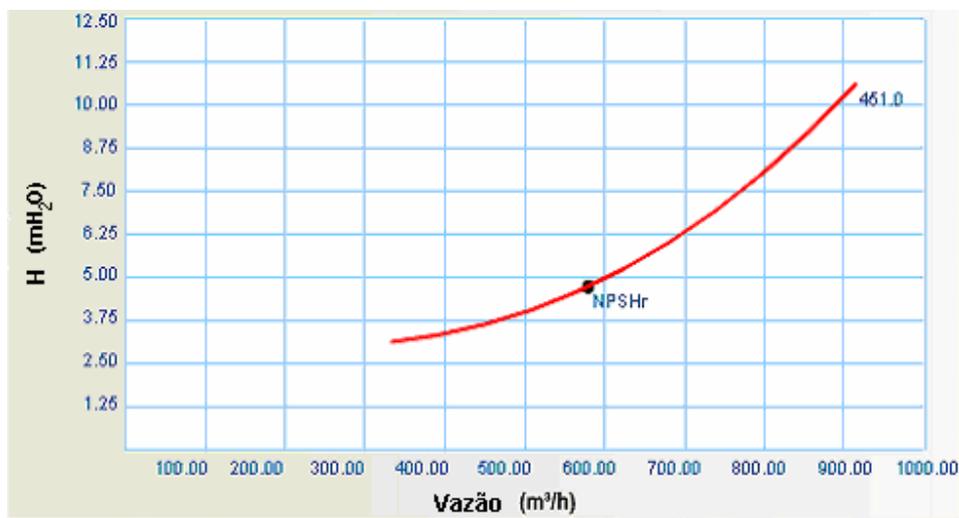


Figura 5.15 – Curva do NPSH_R da bomba bipartida – Modelo 150-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB ETA	Tamanho Size Tamaño	150-40	
Oferta n° Project - No. Oferta - n°		Item n° Item - No. Pos - n°		
				1760 rpm 1160 rpm

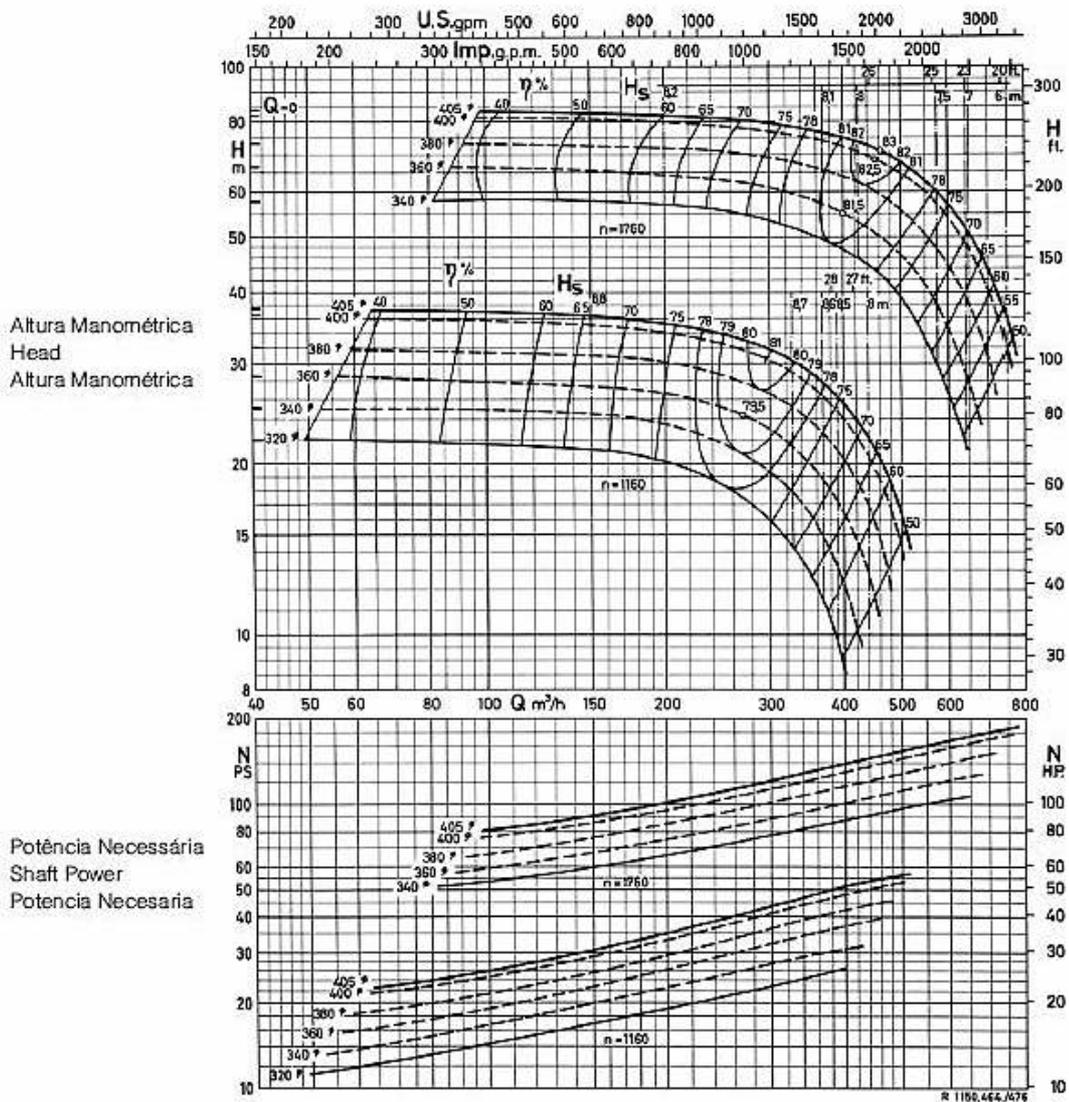


Figura 5.16 – Curva da bomba bipartida – Modelo ETA 150-40. Fonte: Catálogo KSB

KSB RDL 200-400 B

1750 rpm

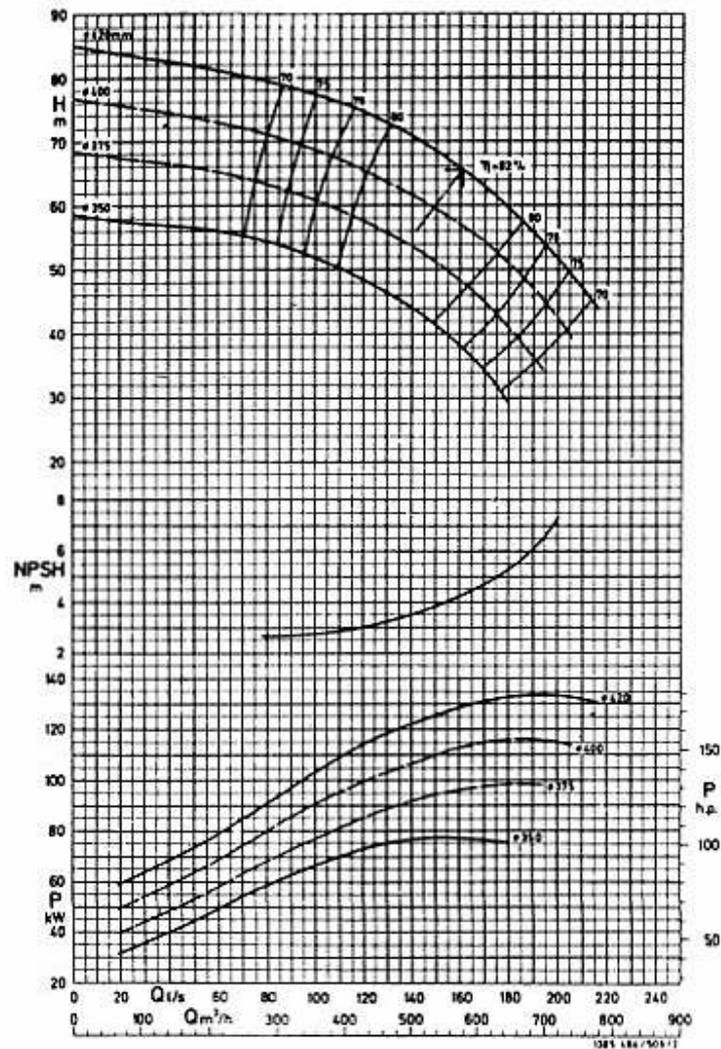


Figura 5.17 – Curva da bomba bipartida – Modelo RDL 200-400 B. Fonte: Catálogo KSB

O mínimo $NPSH_D$ do local verificado durante o período de testes foi de 4,73 m. Nesse caso, a bomba 2 (Modelo 150-450 A), levando-se em consideração esse nível mínimo verificado, poderia apresentar um leve problema de cavitação para vazão máxima de 580 m³/h. Nas demais faixas de vazão não ocorreria esse problema, visto que o $NPSH_R$ também diminui. Isso poderia ser corrigido trabalhando com um nível mínimo da caixa de sucção num patamar um pouco superior do que o atual.

As demais bombas analisadas aqui atenderiam perfeitamente ao solicitado com bons intervalos de rendimento.

As curvas referentes ao $NPSH_R$ de cada uma das bombas selecionadas e apresentadas nesse trabalho se referem ao diâmetro máximo do rotor para os respectivos modelos escolhidos (Figuras 5.11, 5.15 e 5.17). Entretanto, consultando ambos os fabricantes sobre a curva específica de $NPSH_R \times Q$ para cada um dos diâmetros de rotor efetivamente selecionados, os mesmos informaram que quando é disponibilizada no catálogo apenas a curva para o diâmetro de rotor máximo entende-se que, em teoria, não há variação de valores para os demais diâmetros, ou seja, ao longo da faixa de vazão o valor do $NPSH_R$ ficaria praticamente o mesmo para todos os diâmetros de rotor possíveis em um determinado modelo de bomba.

Ainda segundo os fabricantes, poderão ocorrer em alguns casos um aumento do $NPSH_R$ com a diminuição do diâmetro do rotor apenas no final da curva (faixa correspondente às máximas vazões daquele modelo de bomba) e com valores da ordem de 0,50 m. Esse comportamento é verificado em testes com protótipos. Nesses casos, os catálogos apresentam as curvas de $NPSH_R$ já acrescidas desse valor para cobrir essa pequena diferença, muitas vezes inviável de se apurar.

5.2 – CASA DE BOMBAS “PULMÃO”

Assim como o ocorrido com os dados da C. B. “João Erbolato”, iniciou-se o tratamento dos dados coletados para só então interpretar e avaliar essas informações.

Como esta unidade trabalha com dois grupos de bombas, operando em dias alternados, foram levantadas as curvas reais de cada um dos conjuntos em operação convencional, ou seja, com o controle de vazão pela válvula borboleta localizada imediatamente após o bombeamento. Concomitantemente, foram levantados os respectivos rendimentos dos mesmos em relação à potência consumida e ao trabalho produzido. Na Figuras 5.18 e 5.19 são apresentados esses resultados.

Observando essas duas figuras vê-se um perfil com boa variação de carga, a do Grupo 2 até um pouco mais do que a do Grupo 1 o que, conforme discutido anteriormente, é um bom indicador quando se fala em emprego de inversor de frequência. Já com relação ao rendimento, o conjunto do Grupo 1 apresenta uma performance ligeiramente melhor para a rotação nominal, porém isso será melhor discutido adiante quando se levarem em consideração as mudanças de rotação e a faixa de vazão em que mais se opera.

Numa análise individual dos grupos, operando separadamente nos dias 01 e 02/06/2.006, com o uso do inversor de frequência instalado no local, pode-se verificar a faixa de rotações que os mesmos operam ao longo de um dia típico para suprir a demanda do sistema. Na Figura 5.20 foram inseridas as rotações desses dois dias, tendo sido integralizado esses valores a cada hora.

Observa-se claramente que esse sistema trabalha com boa variação da rotação ao longo do período. As rotações estiveram entre 45 e 85% da nominal, chegando a um valor médio diário de 72% para ambos os grupos. Todavia, isso não significa dizer que o inversor de frequência está sendo bem empregado e tampouco que os resultados alcançados sejam os melhores em termos de justificar o emprego do dispositivo.

Obviamente, por menor que seja essa variação da velocidade de operação do conjunto, haverá algum ganho em termos de economia de energia elétrica. Entretanto, novamente dizendo, como todos os parâmetros da bomba se alteram com a mudança das rotações, há que se discutir as questões de rendimento para uma avaliação mais conclusiva.

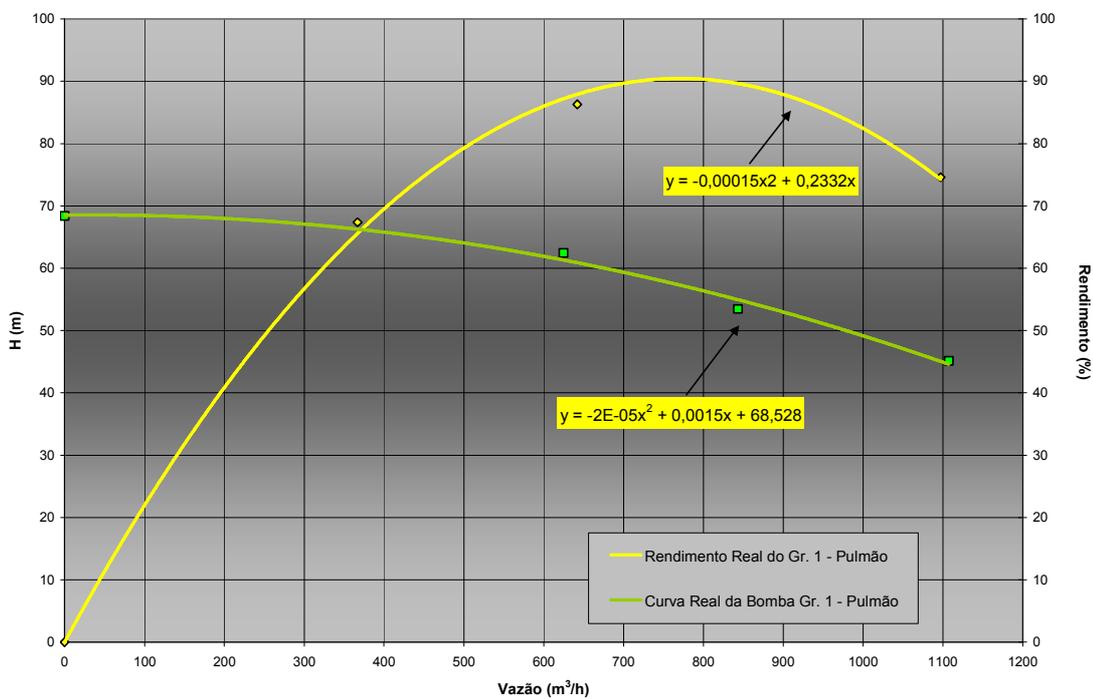


Figura 5.18 – Curva da bomba e rendimento do Grupo 1 da C. B. “Pulmão” em operação convencional

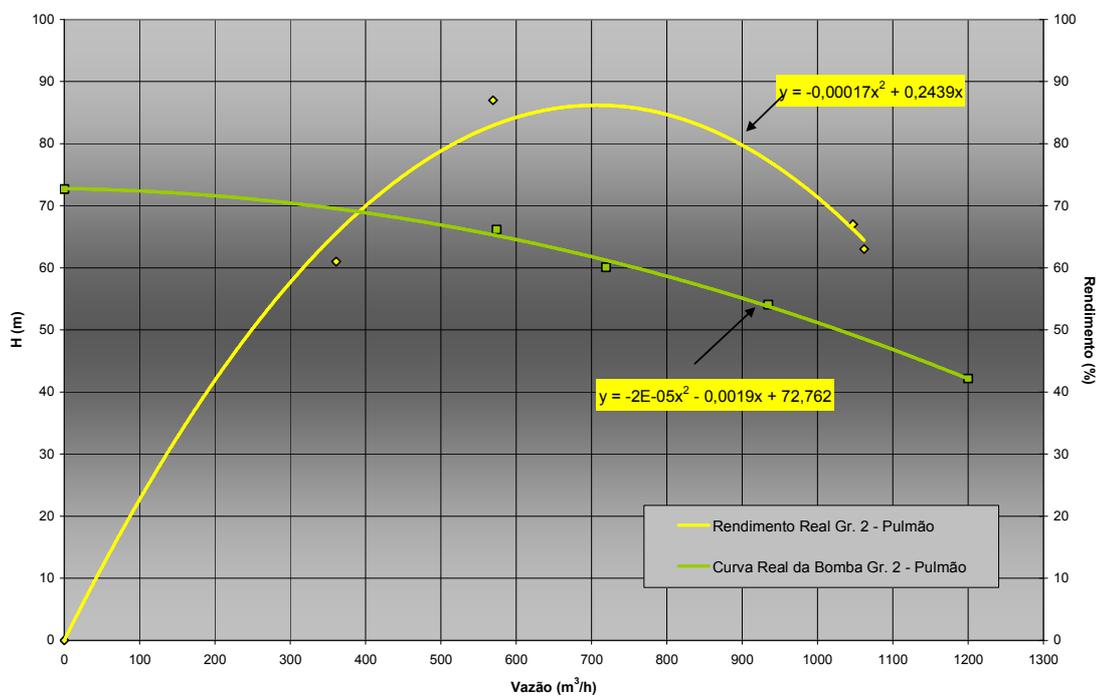


Figura 5.19 – Curva da bomba e rendimento do Grupo 2 da C. B. “Pulmão” em operação convencional

Rotação média na Casa de Bomba "Pulmão" operando com Inversor de Frequência

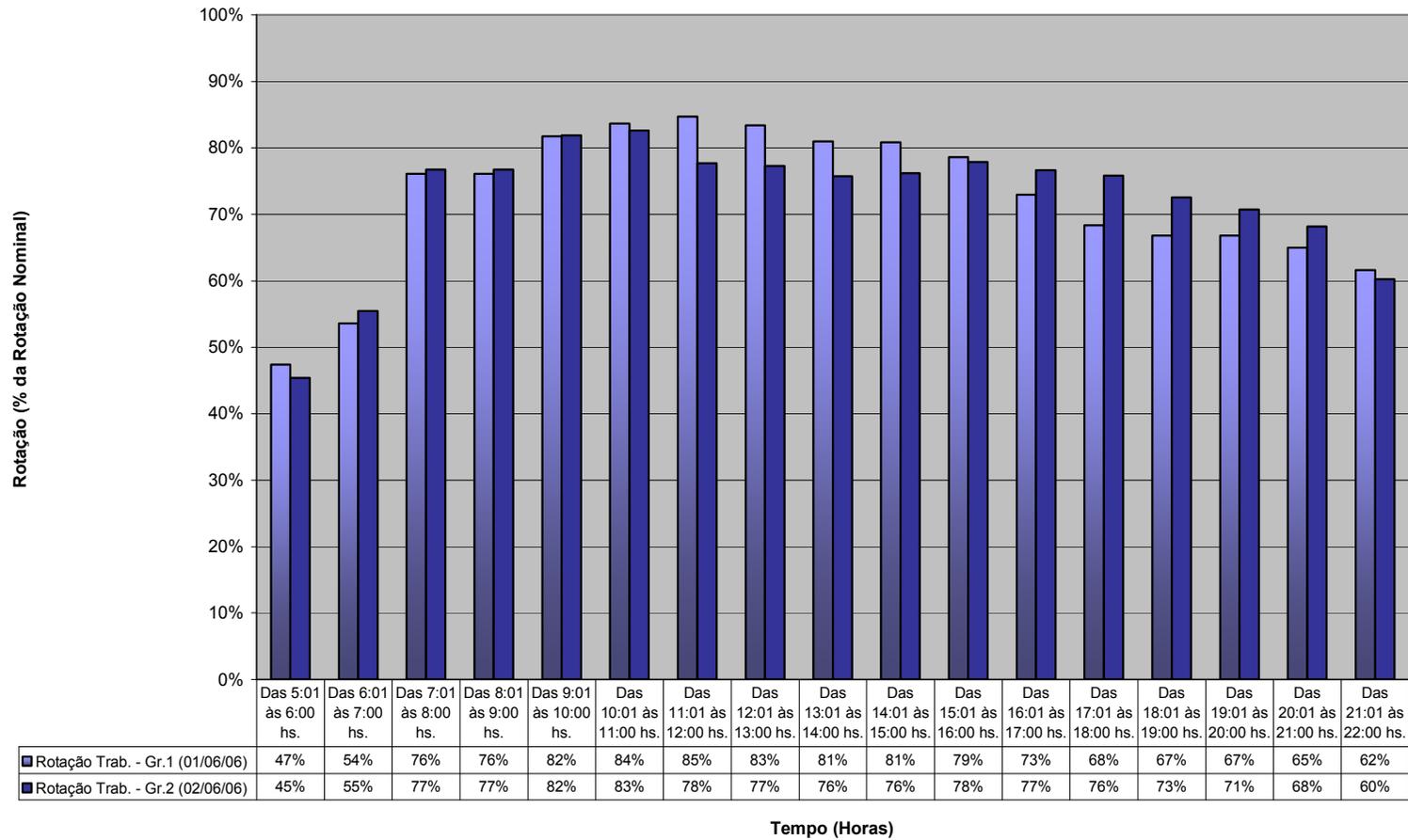


Figura 5.20 – Rotações médias necessárias na operação de um dia típico da C. B. “Pulmão” com inversor de frequência

Tomando-se então os dados de dois dias de operação pelo inversor (01 e 02/06/2.006) e dos outros dois dias de operação sem o inversor (08 e 09/06/2.006), foi possível calcular a energia consumida nesses quatro dias. Fazendo o acúmulo desses valores de energia consumida em ambas as situações operacionais e comparando-os entre si, se obtém o ganho em termos de economia de energia elétrica. A Figura 5.21 abaixo esboça essa comparação.

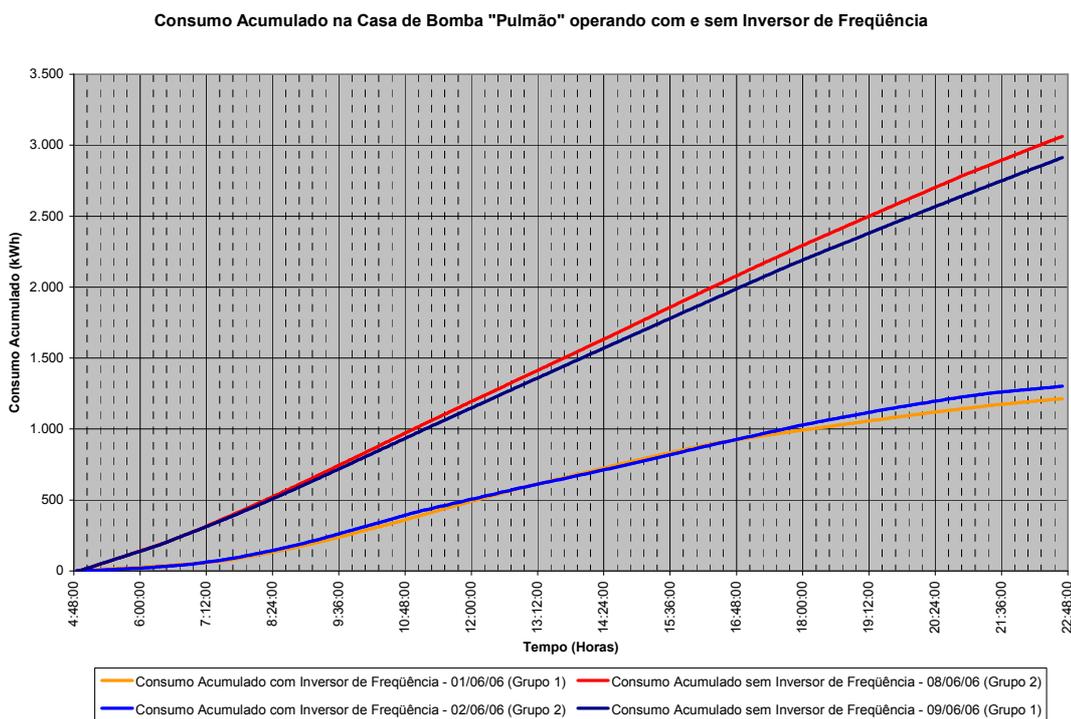


Figura 5.21 – Comparação do consumo acumulado de energia elétrica com e sem o uso de inversor de freqüência

Da mesma forma, utilizando-se então dos dados de vazão, carga e rotação para operação com inversor de freqüência, adquiridos em campo, bem como as curvas de rendimento do conjunto moto-bomba em estudo para a rotação nominal (Figuras 5.18 e 5.19), foi possível calcular as curvas de pontos homólogos dos rendimentos em diferentes rotações para os dois conjuntos. Assim, os resultados foram condensados em dois gráficos distintos, correspondentes ao dia de trabalho de cada grupo (Figuras 5.22 e 5.23).

Casa de Bombas "Pulmão" - Gr. 1 - Curva da bomba para diferentes rotações x Demanda do sistema, associada ao rendimento da bomba - 01/06/2.006

128

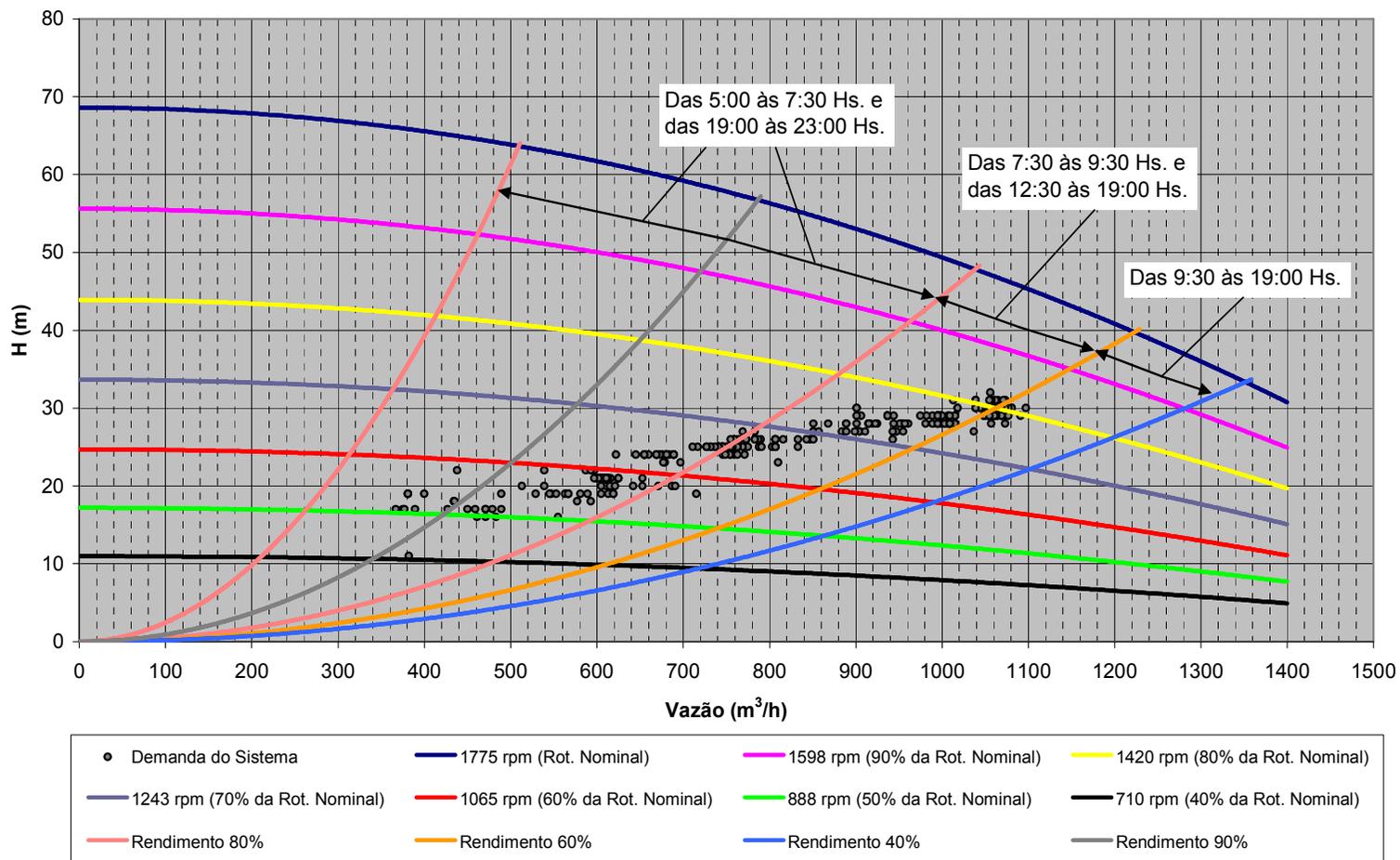


Figura 5.22 – Curva da bomba para diferentes rotações x Demanda do sistema, associada às curvas de rendimento da bomba e seus pontos homólogos – Grupo 1

Casa de Bombas "Pulmão" - Gr. 2 - Curva da bomba para diferentes rotações x Demanda do sistema, associada ao Rendimento da bomba - 02/06/2.006

129

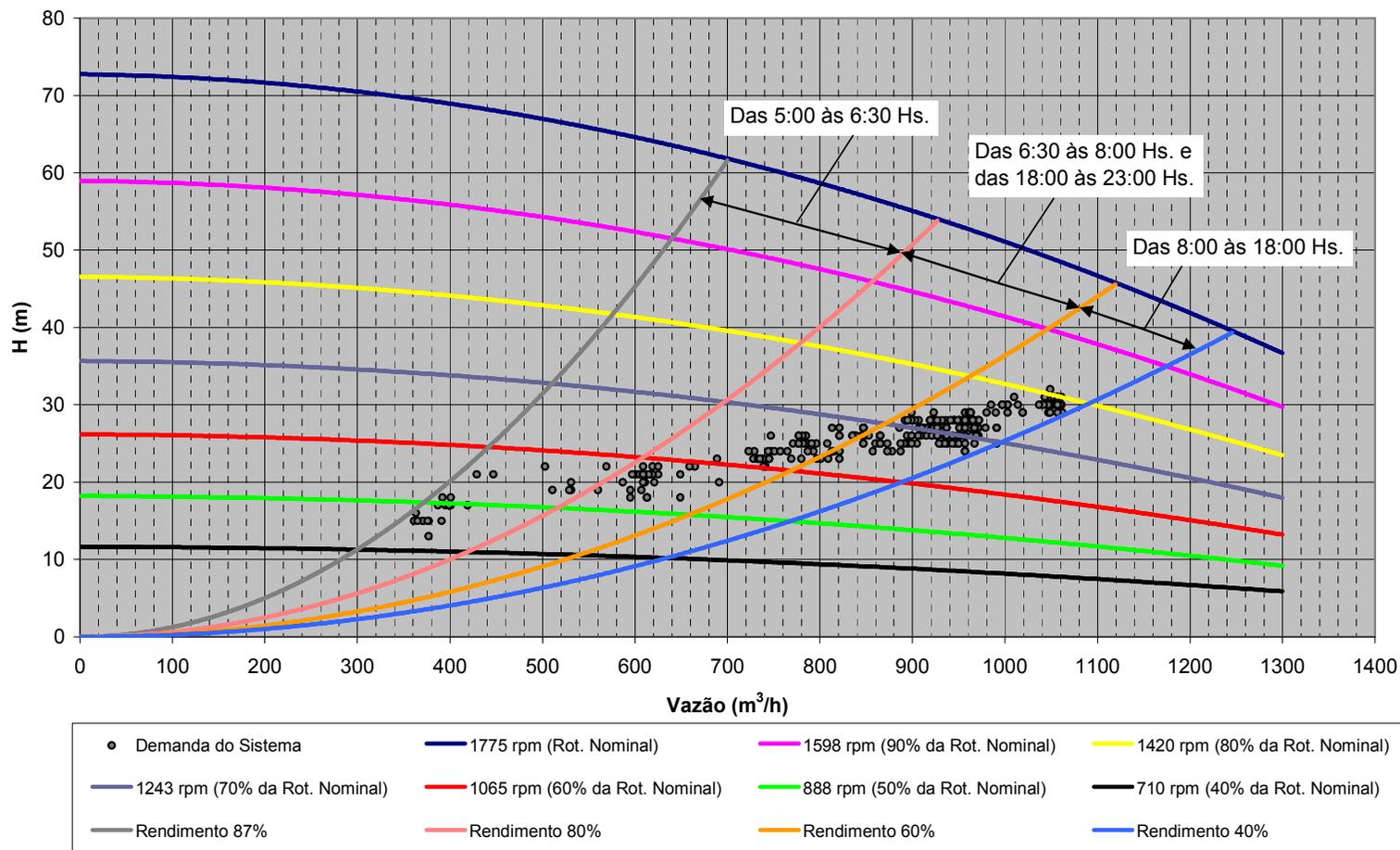


Figura 5.23 – Curva da bomba para diferentes rotações x Demanda do sistema, associado às Curvas de rendimento da bomba – Grupo 2

Conforme discutido anteriormente, também nesse caso será mantida a correção dos rendimentos pelas Leis de Semelhança dada a pequena variação verificada entre as equações estudadas. As Tabelas 5.4 e 5.5 sintetizam os enquadramentos e as distribuições de toda a faixa de vazão verificada ao longo dos dois dias de operação normal de cada grupo dessa unidade.

Tabela 5.4 – Enquadramento da faixa de vazão de um dia típico em relação ao rendimento do conjunto moto-bomba do Grupo 1

Faixa de Rendimento	> 80%	60 - 80%	40 - 60%
Intervalo de Vazão (m³/h)	367,00 - 810,00	833,00 - 1.057,00	1.061,00 - 1.097,00
Quantidade de Ocorrências	127	170	60
Porcentagem em relação ao Total	36%	47%	17%
Faixa Horária	Das 5:00 às 7:30 Hs. Das 19:00 às 23:00 Hs.	Das 7:30 às 9:30 Hs. Das 12:30 às 19:00 Hs.	Das 9:30 às 12:30 Hs.

Tabela 5.5 – Enquadramento da faixa de vazão de um dia típico em relação ao rendimento do conjunto moto-bomba do Grupo 2

Faixa de Rendimento	> 80%	60 - 80%	40 - 60%
Intervalo de Vazão (m³/h)	361,00 - 595,00	607,00 - 910,00	911,00 - 1.062,00
Quantidade de Ocorrências	33	128	200
Porcentagem em relação ao Total	9%	36%	55%
Faixa Horária	Das 5:00 às 6:30 Hs.	Das 6:30 às 8:00 Hs. Das 18:00 às 23:00 Hs.	Das 8:00 às 18:00 Hs.

Inicialmente fazendo uma análise do Grupo 1 (Figura 5.22 – Tabela 5.4), se verifica que o conjunto trabalhou, predominantemente, num intervalo de rendimento de 40 a 80%, ou seja, em 64% do dia, correspondentes a uma faixa de vazão de 833,00 à 1.097,00 m³/h. Todavia, os melhores rendimentos se situaram em baixas vazões que, embora representem apenas 36% do dia, envolveram pelo menos 2 horas do horário de pico. Nas outras duas horas do horário de pico, esses níveis de rendimento baixaram para um intervalo de 60 a 80% de rendimento.

Da mesma forma, porém com um comportamento um pouco distinto, provavelmente devido a característica sazonal do dia, o Grupo 2 (Figura 5.23 – Tabela 5.5) apresentou predominância num intervalo de rendimento de 40 a 80%, ou seja, em 91% do dia, correspondentes a uma faixa de vazão de 607,00 à 1.062,00 m³/h. No caso específico desse grupo, não houve aproveitamento algum do melhor intervalo de rendimento durante o horário de pico.

Como se vê nesse exemplo em estudo, o ganho com inversor de frequência é uma questão muito relativa. No geral, o que existem são conjuntos dimensionados bem além da necessidade e que, com raríssimas exceções, jamais chegarão a serem utilizados em sua plenitude. Numa boa parcela da bibliografia consultada essa observação é corrente.

Quando se associam as questões do rendimento à discussão, se tem a real sensibilidade quanto ao ganho que em muitos casos chegam a causar frustração. As Figuras 5.24 e 5.25 esboçam a “*curva neutra*” para cada um dos grupos.

Com relação à tarifação, essa unidade operacional está enquadrada no padrão “Horo-Sazonal – Categoria Azul – A4”. Numa avaliação em relação às faixas de vazões e aos intervalos de rendimento dos conjuntos, essa modalidade de cobrança de energia elétrica parece bem adequada às características da C. B. “Pumão”. Nas duas “*curvas neutras*” apresentadas (Figuras 5.24 e 5.25), onde se observa um perfil relativamente aproximado, os picos de demanda máxima se situaram no período da manhã, ou seja, fora do horário de pico. Contudo, o dimensionamento dos conjuntos parece de certa forma inadequado. Se por um lado a faixa de vazão atende às necessidades do sistema, por outro as cargas estão além da necessidade.

Curva Neutra da Demanda de um Dia Típico da C. B. "Pulmão" - Grupo 1

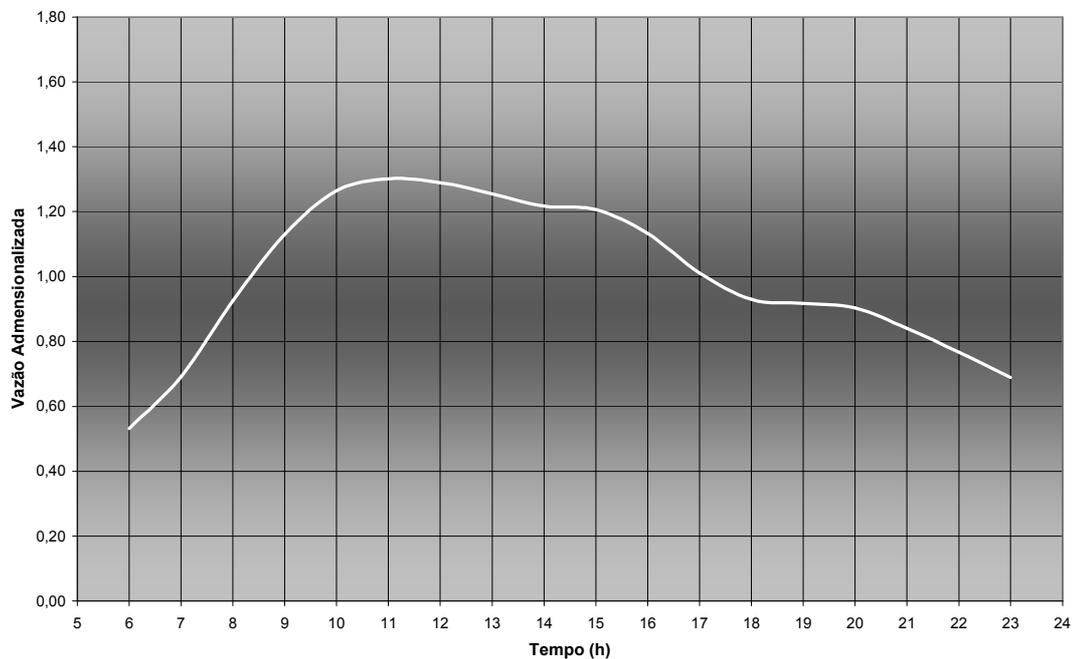


Figura 5.24 – “Curva Neutra” relativa à demanda de um dia típico da C. B. “Pulmão” com operação do Grupo 1

Curva Neutra da Demanda de um Dia Típico da C. B. "Pulmão" - Grupo 2

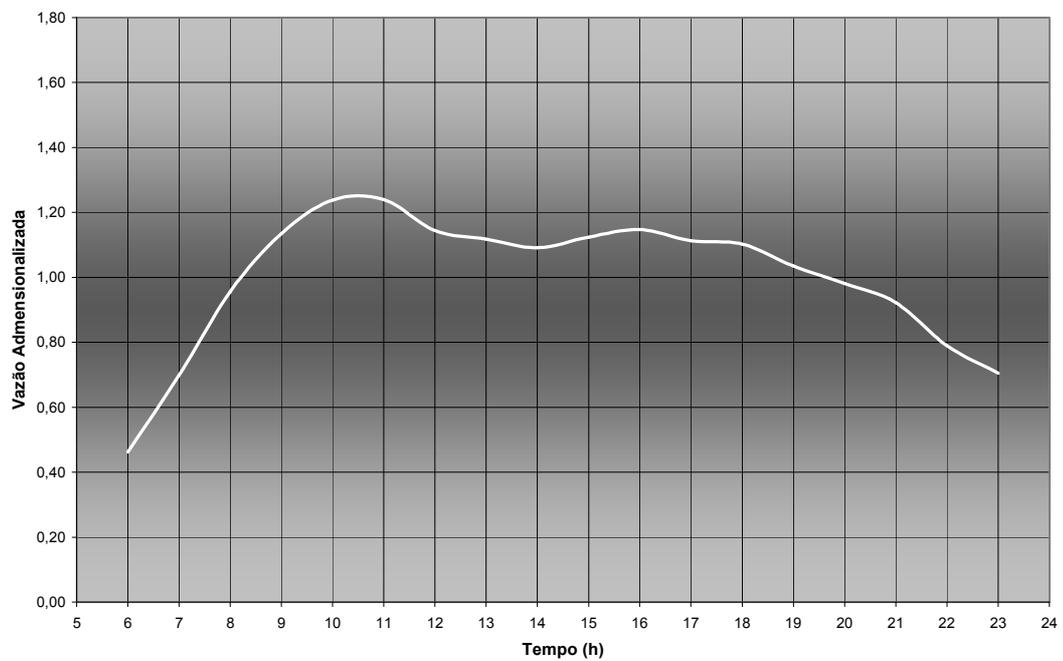


Figura 5.25 – “Curva Neutra” relativa à demanda de um dia típico da C. B. “Pulmão” com operação do Grupo 2

Novamente aqui um redimensionamento dos conjuntos traria um ganho mais efetivo, pois para cargas menores haveria uma potência consumida também menor. A faixa de vazão entre 700,00 até 1.100 m³/h, onde o sistema opera, em média, 76% do tempo (considerando os dois conjuntos), cobriria muito bem a maior parte do dia, isso sempre associado às curvas de melhores rendimentos, ou seja, que o ponto de vazão máxima estivesse situado à direita da curva de melhor rendimento.

Nos catálogos dos mesmos fabricantes consultados anteriormente, disponíveis na Internet (IMBIL – <http://www.hidrovector.com.br/catalogo-eletronico.asp> – Acesso em 02/04/2.007 e KSB – <http://www.ksb.com.br> – Acesso em 13/04/2.007), foi possível selecionar duas bombas que atendem à faixa de vazão mencionada no parágrafo anterior com bons níveis de rendimento. As características dessas bombas seguem na Tabela 5.6 abaixo.

Tabela 5.6 – Características das bombas selecionadas em catálogos. Fonte: IMBIL e KSB

Bomba	1	2
Fabricante	IMBIL	KSB
Linha	Bipartida	Bipartida
Modelo	250-450 A	ETA 250-40
Rotação (rpm)	1750	1760
Diâmetro do Rotor (mm)	318,2	340
Vazão (m ³ /h)	1.100,00	1.100,00
Altura Manométrica (m)	31	31
Potência (cv)	152,04	166,7
NPSH _R (m)	7,29	7,43

Da mesma forma, como o estudo de caso da unidade anterior, o grande atrativo destes conjuntos selecionados está ainda por conta da potência que, segundo os fabricantes, não seriam superiores a 166,7 cv. O conjunto atualmente em operação tem uma potência de 300 cv, ou seja, quase que o dobro. Essa substituição ainda permitiria uma recontração da demanda de potência junto a concessionária de energia elétrica, o que refletiria também no custo final. As Figuras do 5.26 ao 5.30 apresentam as diversas curvas características destas bombas.

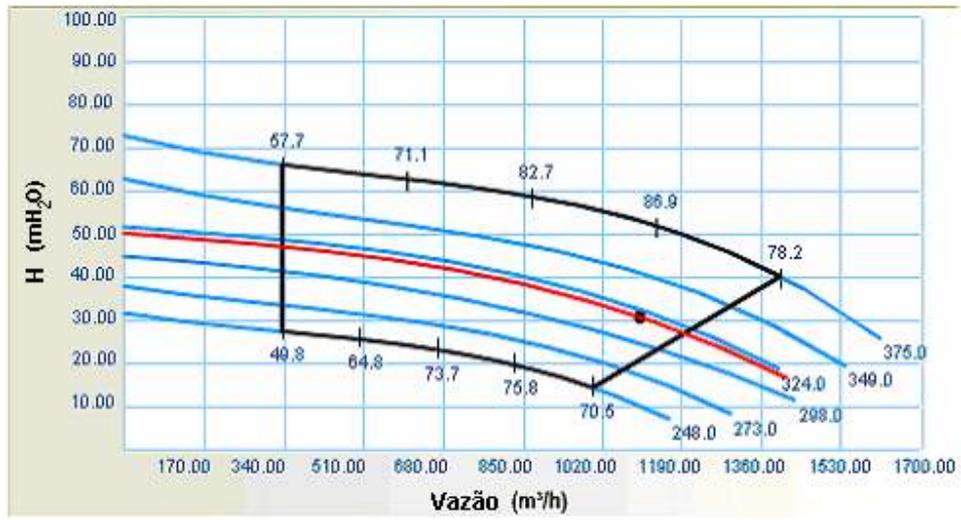


Figura 5.26 – Curva característica da bomba bipartida – Modelo 250-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

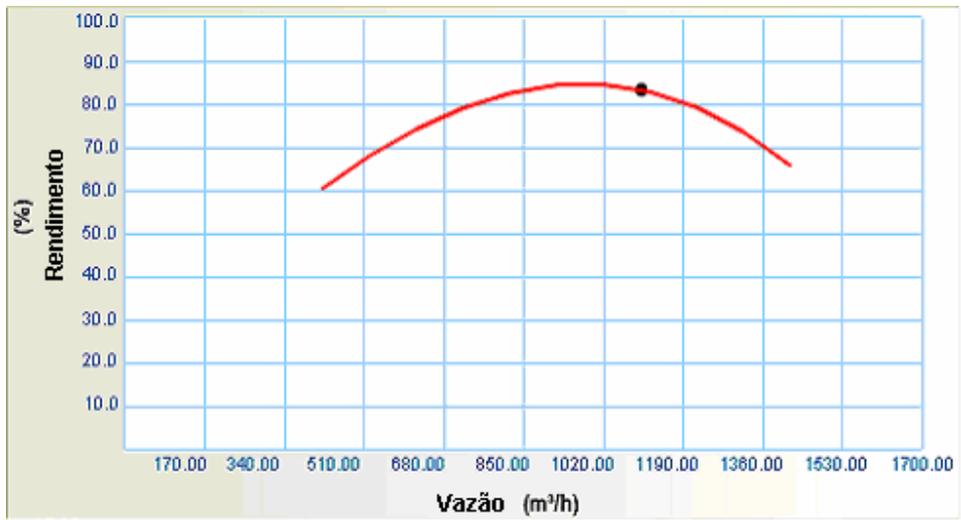


Figura 5.27 – Curva do rendimento da bomba bipartida – Modelo 250-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

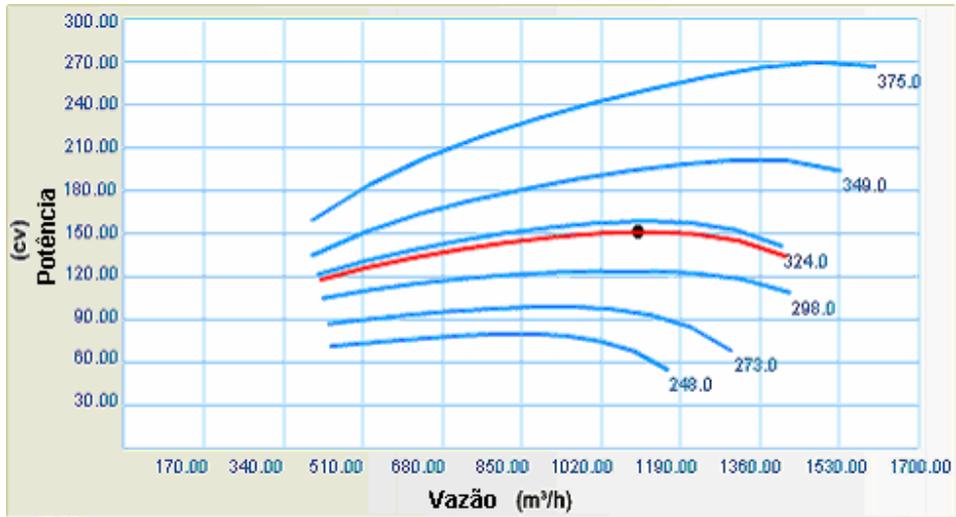


Figura 5.28 – Curva da vazão x potência da bomba bipartida – Modelo 250-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

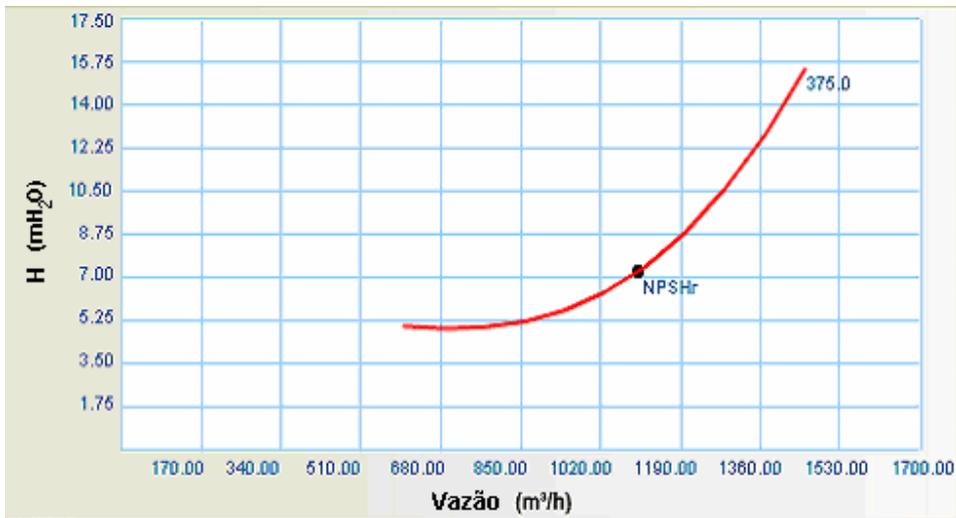


Figura 5.29 – Curva do NPSH_R da bomba bipartida – Modelo 250-450 A. Fonte: Catálogo Eletrônico IMBIL

Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB ETA	Tamanho Size Tamaño	250-40		
Oferta nº	_____	Item nº	_____		
Project - No.	_____	Item - No.	_____	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1760 rpm 1160 rpm
Oferta - nº	_____	Pos - nº	_____		

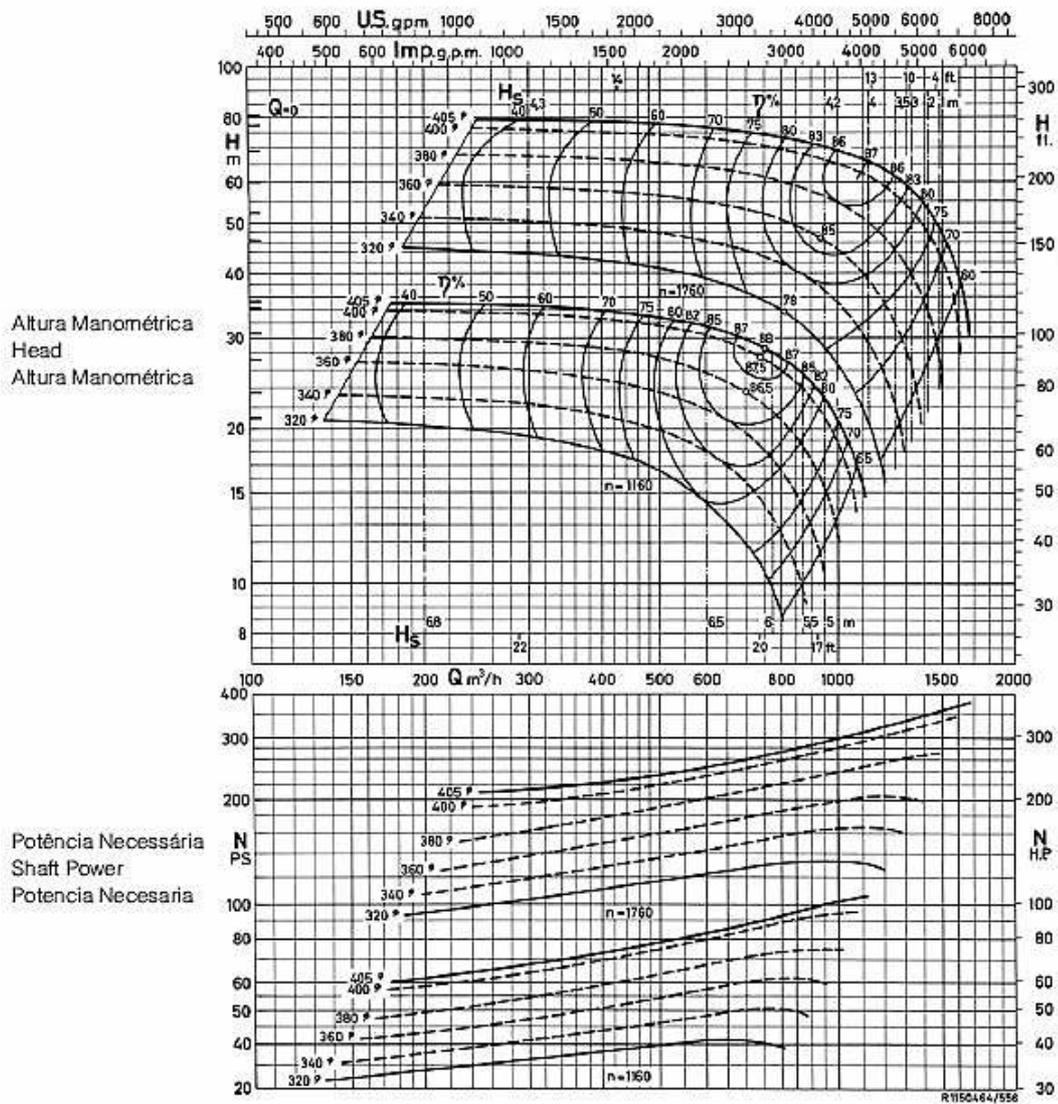


Figura 5.30 – Curva da bomba bipartida – Modelo ETA 250-40. Fonte: Catálogo KSB

Quanto ao parâmetro $NPSH_R$ não haveria problema algum, visto que o mínimo $NPSH_D$ do local, verificado durante o período de testes foi de 8,03 m, enquanto que o requerido pelos modelos selecionados é de 7,29 e 7,43 m, respectivamente.

Passando agora a estudar essa casa de bombas através dos modelos matemático-computacionais desenvolvidos para este estudo, foi possível compor três cenários de simulações desta unidade operacional especificamente. As Figuras 5.31 à 5.36 apresentam os resultados destas simulações somente com referência às pressões verificadas na saída do bombeamento, na chegada do C.R.D. “Jd. Paranapanema” e nas demais derivações com distribuição direta da S.A. “Leste” (Pontos “A”, “B”, “D” e “F”).

Na Figura 5.31, que representa as pressões na saída da C. B. “Pulmão”, já se pode notar a enorme diferença entre as pressões geradas no bombeamento a partir dos três cenários estudados. A operação através de inversor de frequência promove, de imediato, uma redução na pressão de saída da ordem de 48,3%, ou seja, para se atender às demandas, em operação convencional, a válvula de bloqueio dissipa quase metade de toda carga gerada pela bomba.

Os resultados verificados entre as comparações dos cenários 1 e 2 mostram que, em termos de pressão nos pontos de interesse, a operação do sistema pelo inversor de frequência (cenário 2), reproduziu praticamente a mesma situação da rotina operacional da unidade trabalhando pelo sistema convencional (cenário 1). Observa-se ainda que houve algum aumento da pressão na maioria dos pontos de interesse, principalmente, na faixa horária onde ocorrem as maiores demandas. Na faixa horária correspondente ao intervalo das 9:00 às 17:00 hs., as pressões aumentaram 3,7%, em média, nessa comparação entre os cenários 1 e 2.

Especificamente o cenário 3, aquele que reflete a operação otimizada do sistema de bombeamento, se mostrou o mais regular e benéfico de todos. Há evidências dessa observação em todos os pontos do sistema. Mesmo numa comparação entre os cenários 2 e 3, observa-se ainda uma boa possibilidade de ganho intuindo que, embora já se opere com um inversor de frequência (cenário 2), ainda há a possibilidade de se encontrar melhores resultados e rotinas operacionais sem que isso altere ou afete as demandas de um dia típico.

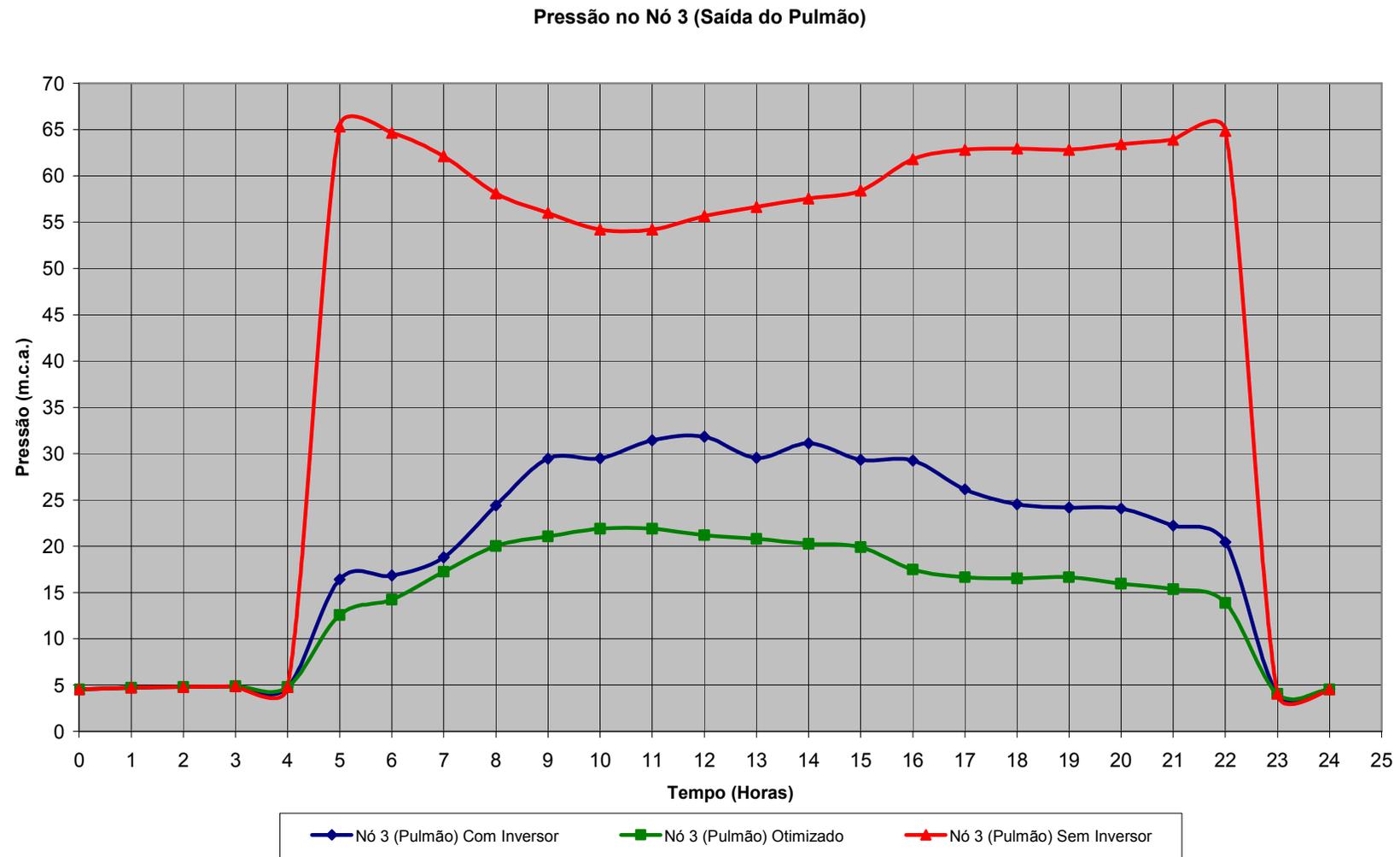


Figura 5.31 – Pressões na saída da C. B. “Pulmão” (Nó 3) para os três cenários de operação simulados

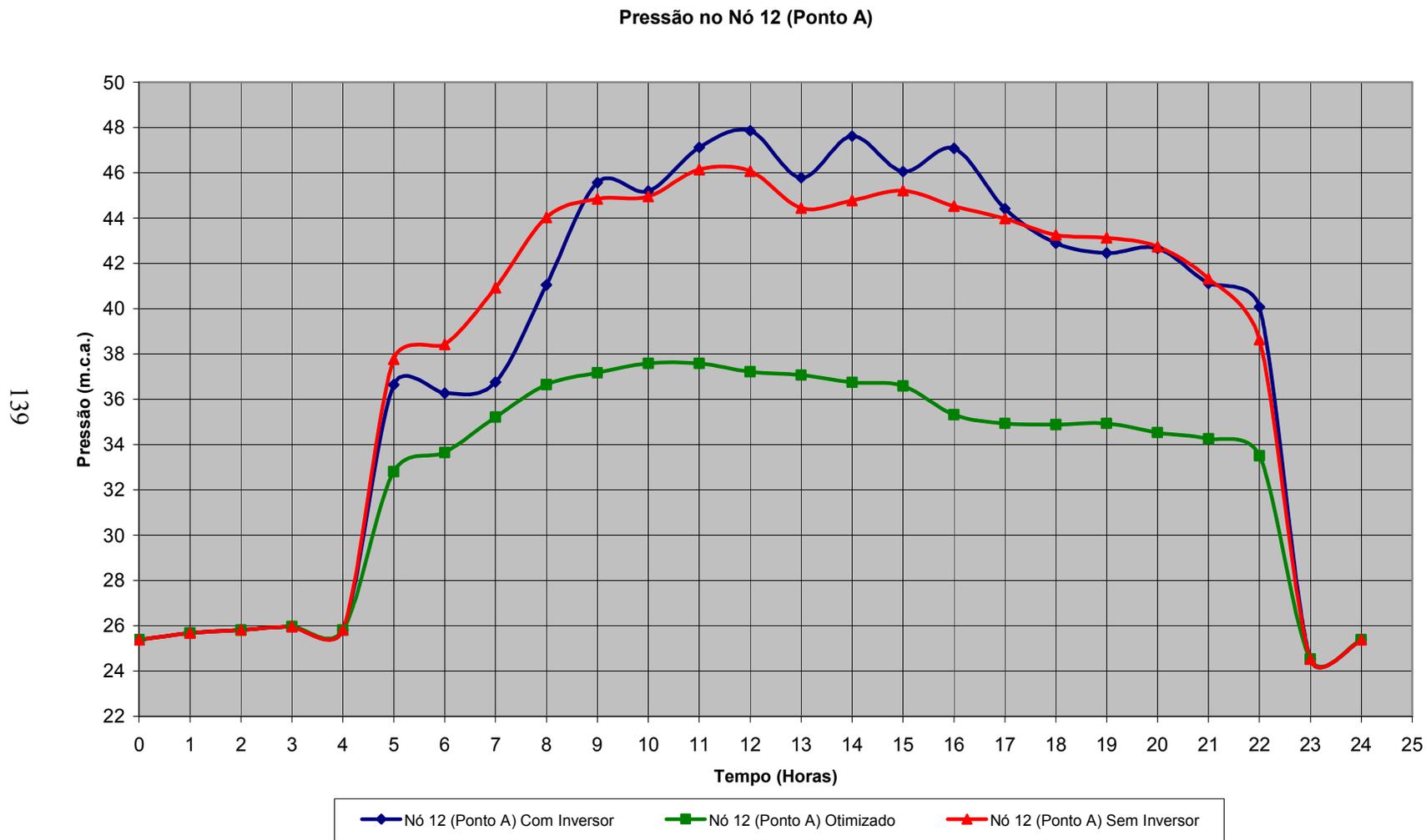


Figura 5.32 – Pressões no Ponto “A” (Nó 12) para os três cenários de operação simulados

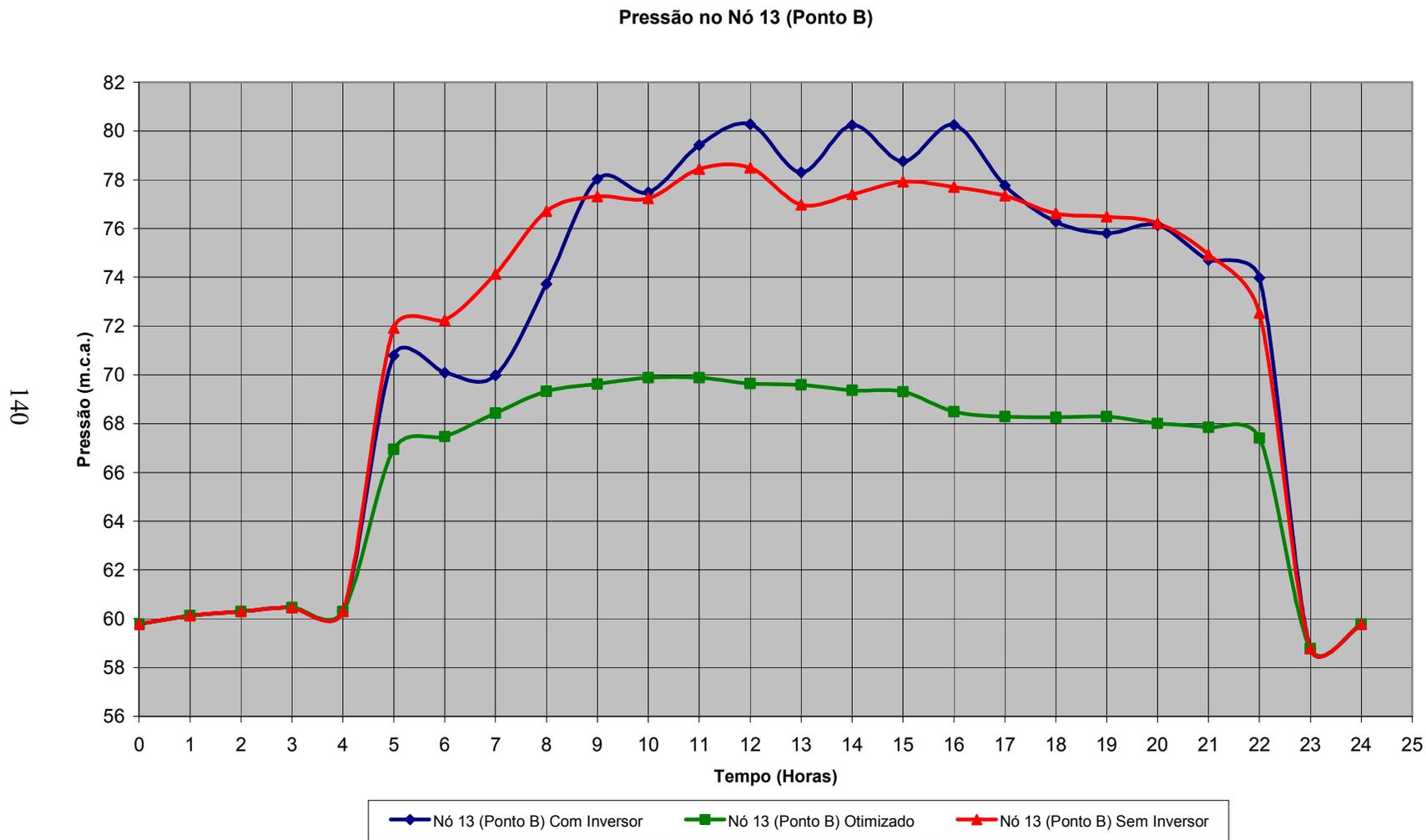


Figura 5.33 – Pressões no Ponto “B” (Nó 13) para os três cenários de operação simulados

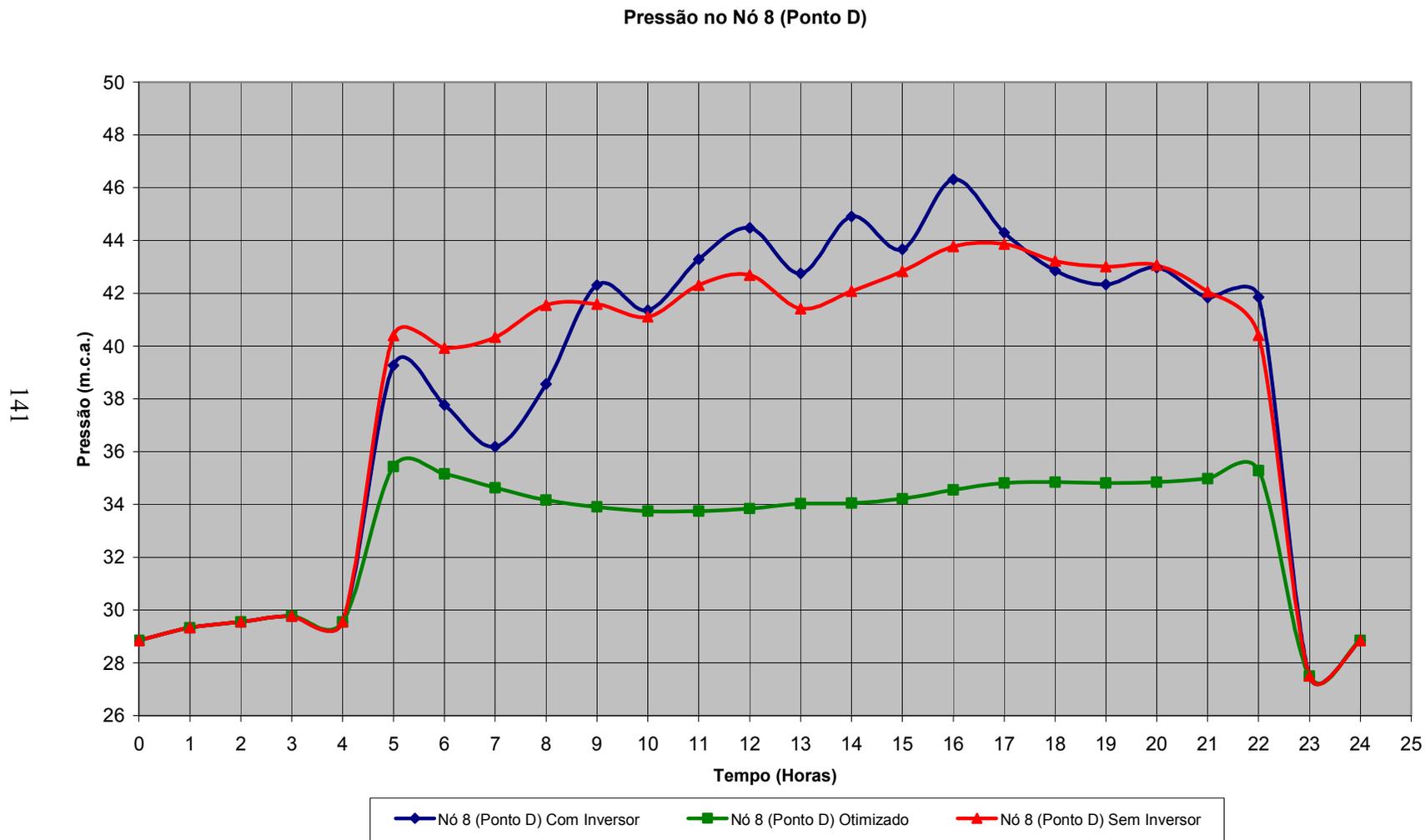


Figura 5.34 – Pressões no Ponto “D” (Nó 8) para os três cenários de operação simulados

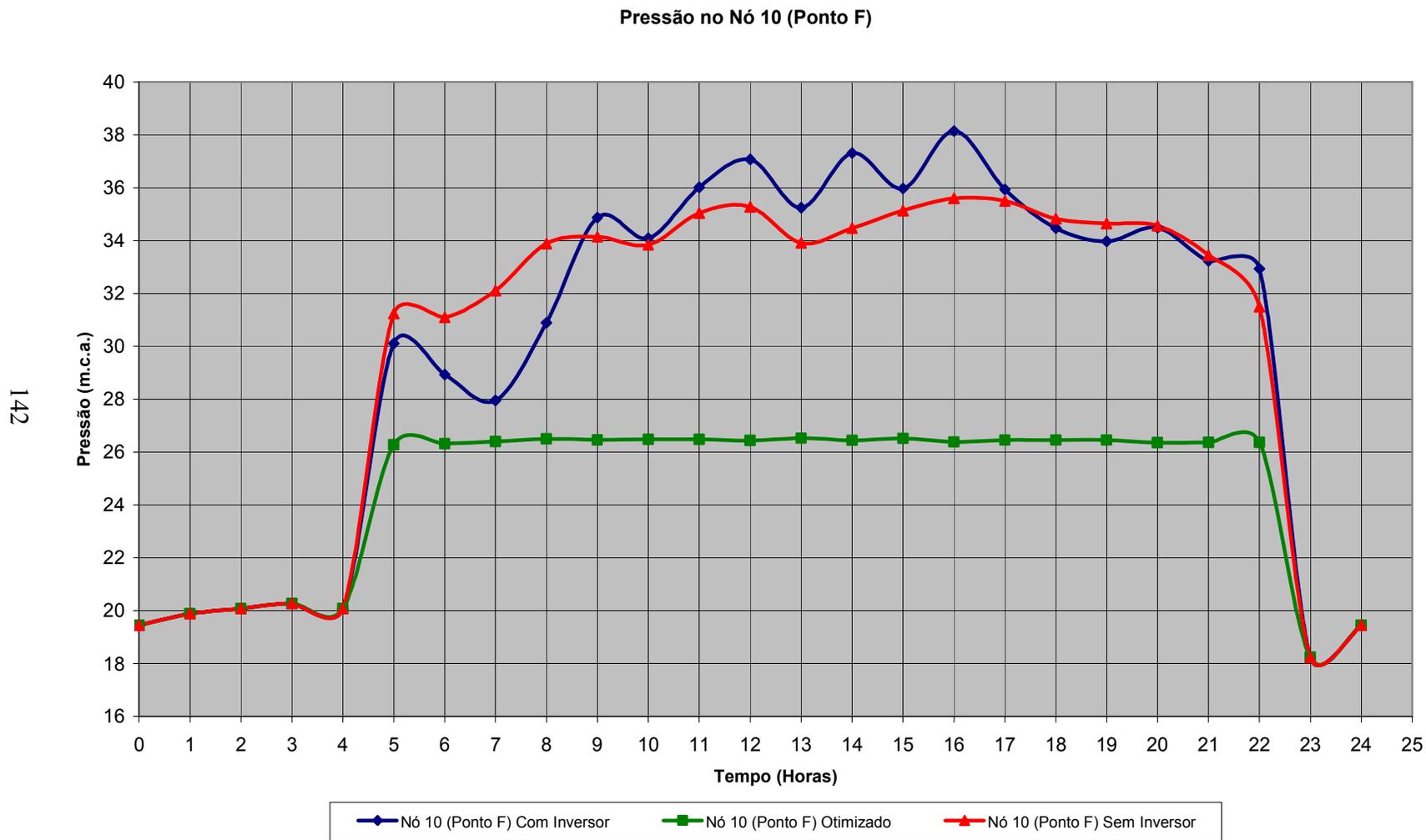


Figura 5.35 – Pressões no Ponto “F” (Nó 10) para os três cenários de operação simulados

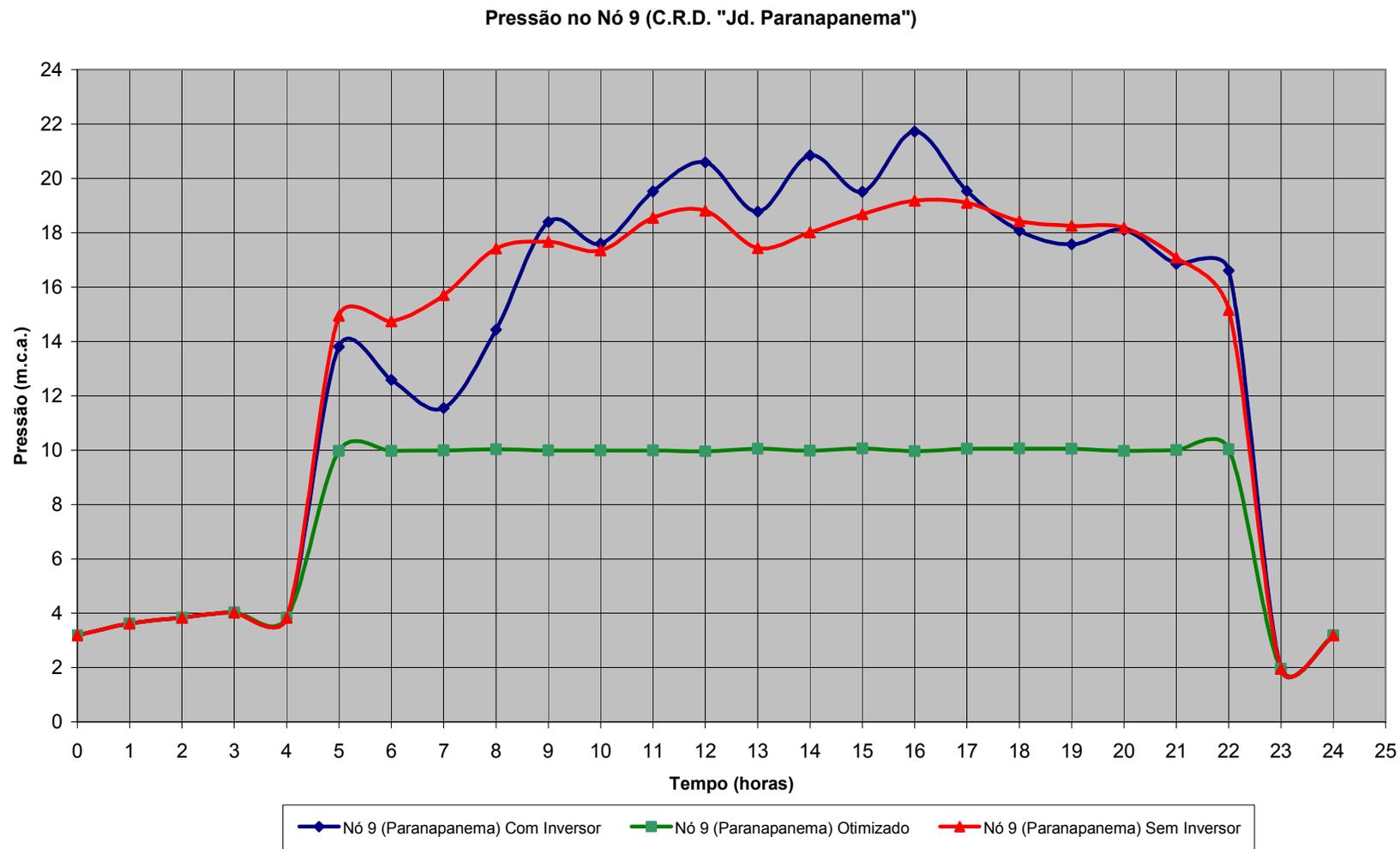


Figura 5.36 – Pressões na chegada da caixa de sucção do C.R.D. “Jd. Paranapanema” (Nó 9) para os três cenários de operação simulados

As rotações obtidas na otimização foram, em média, 5% menores do que na operação com o inversor de frequência seguindo a rotina empírica da *SANASA*. A Figura 5.37 apresenta a comparação das rotações médias horárias dos cenários 2 e 3.

Nas Figuras 5.35 e 5.36 (Ponto F e C.R.D. “Jd. Paranapanema”), que representam os pontos fisicamente mais distantes e os mais desfavoráveis de todo o sistema, os resultados apresentados foram os mais interessantes em termos de performance operacional. Ao se eleger unicamente a pressão de 10 mH₂O para o C.R.D. “Jd. Paranapanema”, obteve-se um resultado perfeitamente estável em ambos os pontos, assegurando uma distribuição uniforme, contínua e isenta de oscilações que poderiam gerar inclusive regimes transitórios no sistema.

A operação otimizada também foi a que reproduziu os menores níveis de pressão em todos os pontos, por todo período de simulação. Isso também representa ganhos em relação às perdas físicas de água, uma vez que, sendo o vazamento proporcional à pressão da rede, a redução obtida com as “rotações ótimas” promoverá uma redução também nos índices de perda física e, conseqüentemente, haverá redução da produção, redução da operação do sistema de bombeamento e redução do consumo de energia elétrica, por conseguinte.

Finalmente, a utilização do modelo de “Auditoria Energética” para os três cenários estudados apresentou resultados que evidenciam um prognóstico excelente de redução do consumo de energia elétrica.

Cabe aqui salientar que a simulação dos cenários apresentados mostrou que os rendimentos empregados pelo EPANET sempre eram tomados à rotação nominal, o que não era condizente com as condições de semelhança, nem com os resultados observados em campo e tampouco com as contas de energia elétrica da unidade estudada. Em outras palavras, no estudo de caso utilizando o EPANET, a condição de simulação com bomba a rotação nominal e com rotação variada para uma mesma vazão apresentaram os mesmos valores de rendimentos (Figura 5.38 – Ponto “A”).

Rotações Médias Horárias de Operação com o Inversor de Frequência x Otimizada

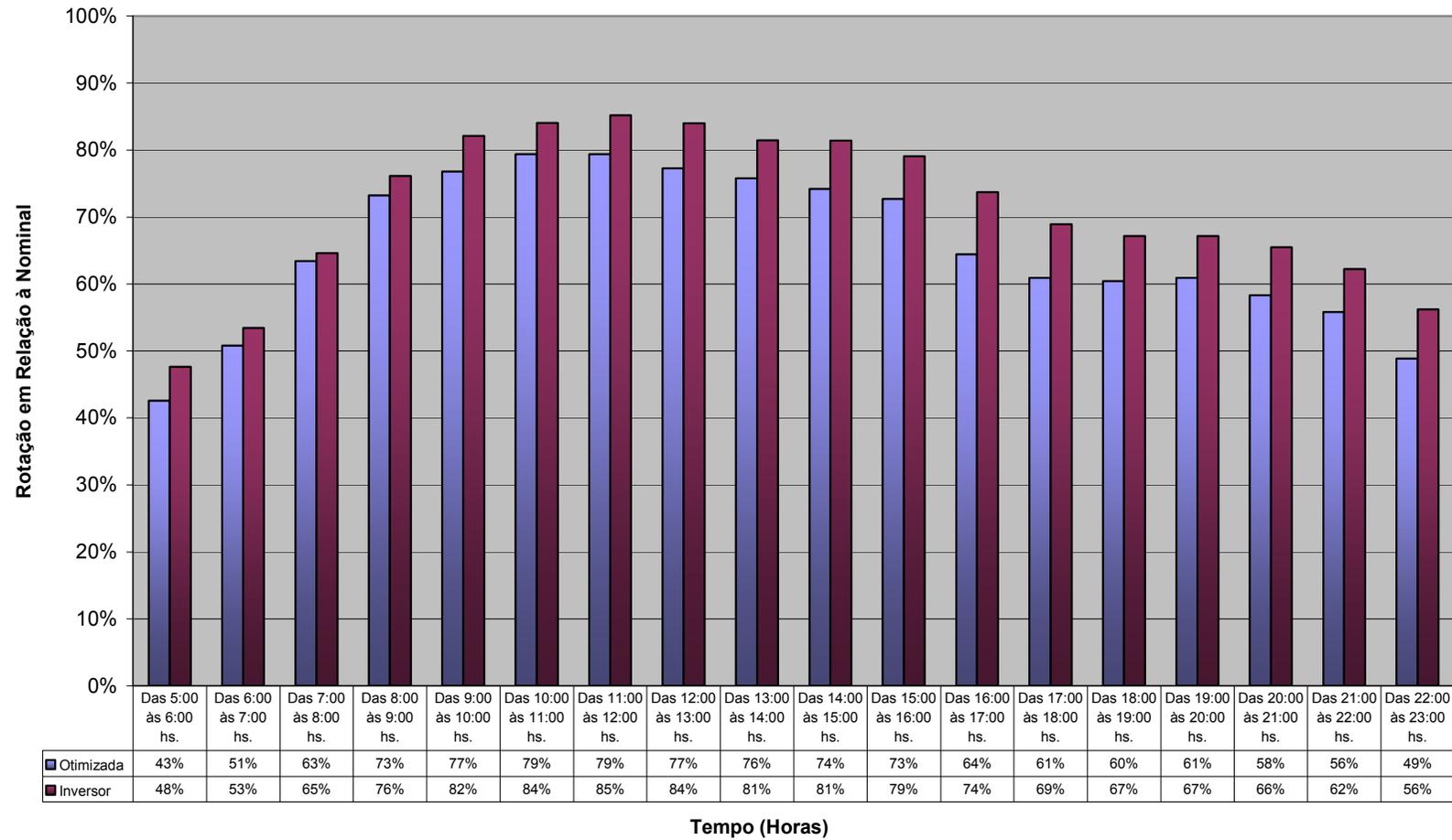


Figura 5.37 – Rotações médias horárias de operação com o Inversor de Frequência x Otimizada

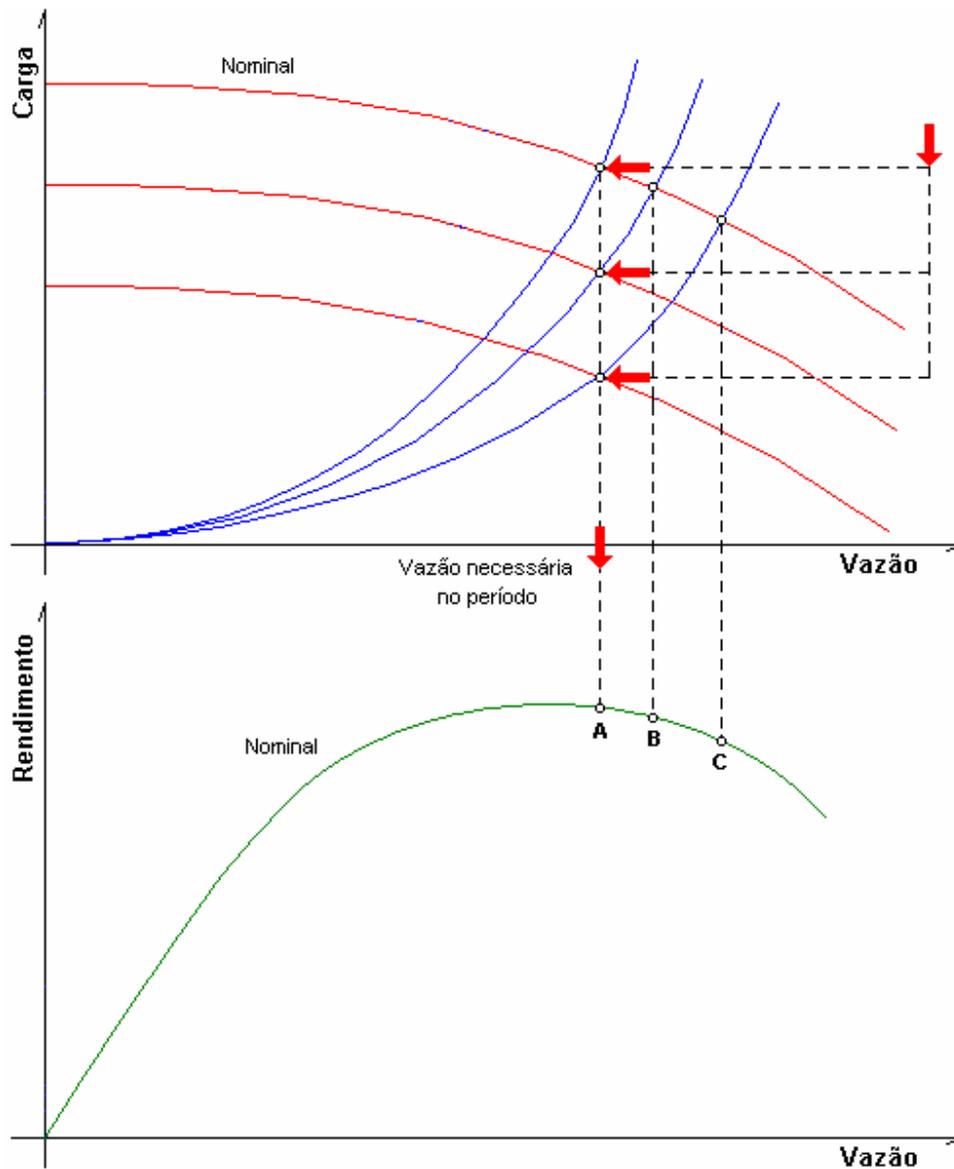


Figura 5.38 – Ilustração da influência da operação em diferentes rotações sobre o rendimento

De fato, a relação de potências dada pela equação 3 (capítulo 3 – página 41) admite que o rendimento da máquina permanece constante, entretanto a variação da rotação irá alterar esse parâmetro. A correção, caso não se disponha das curvas de colina, pode ser feita introduzindo os rendimentos na expressão de potência, tendo como resultado final a equação 14 já apresentada e discutida neste capítulo (página 110).

Neste trabalho optou-se pelo ajuste polinomial de 2º grau da curva de rendimento contra vazão e aplicação das Leis de Semelhança que relacionam a vazão com a rotação, na forma:

$$\eta_{No\ min\ al} = E \times Q_{Nom}^2 + F \times Q_{Nom} \quad (15)$$

o rendimento em uma rotação N qualquer, onde $\frac{N}{N_{No\ min\ al}} = \alpha$, é dado por:

$$\eta = E \times \left(\frac{Q}{\alpha}\right)^2 + F \times \left(\frac{Q}{\alpha}\right) \quad (16)$$

onde:

E e F são coeficientes de ajuste da curva

A adoção da equação 16 desloca o ponto de rendimento “A”, para os seus correspondentes “B” e “C”, pontos homólogos de funcionamento (Figura 5.38).

Como o EPANET aparentemente trabalha com uma curva de rendimento descrita a partir de pontos discretos, interpolando entre os pontos para obter valores intermediários, a adoção do ajuste polinomial proposto pode conduzir a valores diferentes daqueles obtidos originalmente pelo EPANET. A discrepância de valores pode ser observada na máquina operando com rotação nominal, onde o resultado do ajuste deve ser igual ao produzido pelo EPANET.

A fim de se observar as discrepâncias mencionadas no programa de “Auditoria Energética”, foram mantidos os valores de rendimento obtidos pelo EPANET, assim como aqueles obtidos do ajuste proposto. As Tabelas de 5.7 a 5.9 reproduzem os resultados dessas simulações.

Em termos de consumo de energia elétrica, as diferenças observadas são significantes, inclusive entre os cenários que comparam a operação com o inversor. Obviamente, como era de se esperar, a operação convencional é a mais dispendiosa, levando-se em consideração as condições atuais, tanto no tocante aos equipamentos disponíveis, quanto a rotina operacional empregada.

Tabela 5.7 – Resultados da simulação no programa de “Auditoria Energética” para operação Convencional

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO											
Arquivo de dados da rede: E:\Wlamir\Resultados\Leste_Sem_Inversor.inp											
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Hr	Ee.(KW)	Ea.(KW)	Q (l/s)	H (m)	Lg/Ds	Rot.	Rene	Rena	Tar.(R\$)	Cte-R\$	Cta-R\$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
5	113.26	103.04	137.28	59.61	LIG	1.00	70.9	77.9	0.152072	17.22	15.67
6	114.19	114.72	170.62	58.91	LIG	1.00	86.4	86.0	0.152072	17.36	17.45
7	135.17	134.95	219.65	56.39	LIG	1.00	89.9	90.0	0.152072	20.56	20.52
8	157.57	151.83	256.92	52.40	LIG	1.00	83.8	87.0	0.152072	23.96	23.09
9	164.09	157.93	270.65	50.28	LIG	1.00	81.4	84.5	0.152072	24.95	24.02
10	167.63	162.05	280.45	48.49	LIG	1.00	79.6	82.3	0.152072	25.49	24.64
11	167.63	162.05	280.45	48.49	LIG	1.00	79.6	82.3	0.152072	25.49	24.64
12	164.88	158.77	272.61	49.94	LIG	1.00	81.0	84.1	0.152072	25.07	24.15
13	162.39	156.22	266.72	50.93	LIG	1.00	82.1	85.3	0.152072	24.70	23.76
14	159.59	153.60	260.84	51.84	LIG	1.00	83.1	86.4	0.152072	24.27	23.36
15	156.51	150.95	254.96	52.67	LIG	1.00	84.2	87.3	0.152072	23.80	22.95
16	136.91	136.69	223.58	56.07	LIG	1.00	89.8	90.0	0.152072	20.82	20.79
17	131.78	130.65	209.85	57.09	LIG	1.00	89.2	90.0	0.250919	33.07	32.78
18	131.05	129.80	207.89	57.22	LIG	1.00	89.0	89.9	0.250919	32.88	32.57
19	131.78	130.65	209.85	57.09	LIG	1.00	89.2	90.0	0.250919	33.07	32.78
20	127.94	126.46	200.04	57.68	LIG	1.00	88.5	89.5	0.250919	32.10	31.73
21	123.70	122.41	190.24	58.17	LIG	1.00	87.8	88.7	0.152072	18.81	18.61
22	112.34	111.81	162.78	59.13	LIG	1.00	84.0	84.4	0.152072	17.08	17.00
23	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
VALORES SEM AJUSTE (Original EPANET)											
Custo da operação diária (R\$):				440.72							
Custo mensal previsto (R\$):				13221.46							
Rendimento médio global:				84.41							
VALORES AJUSTADOS											
Variação (%)											
Custo da operação diária (R\$):				430.52				-2.31			
Custo mensal previsto (R\$):				12915.50				-2.31			
Rendimento médio global:				86.42				2.38			
			SEM AJUSTE	AJUSTADOS	Variação	* valores diários					
Consumo mínimo (kW) :			112.34	103.04	-8.29						
Consumo máximo (kW) :			167.63	162.05	-3.32						
Consumo médio (kW) :			142.13	138.59	-2.49						
Consumo acumulado :			2558.41	2494.59	-2.49						
Acumulado mensal (kW) :			76752.30	74837.70		(valores previstos)					
Legenda das Colunas											
(1) - Hora do dia (h)				(5) - Carga hidráulica produzida (m)				(9) - Rendimento ajustado (proposta)			
(2) - Consumo de energia segundo o EPANET				(6) - Situação da bomba ligada / desligada				(10) - Tarifa de consumo horário			
(3) - Consumo de energia ajustado (proposta)				(7) - Rotação adimensional da bomba				(11) - Custo horário do consumo pelo EPANET			
(4) - Vazão recalçada (l/s)				(8) - Rendimento previsto pelo EPANET				(12) - Custo horário (proposta)			

Tabela 5.8 – Resultados da simulação no programa de “Auditoria Energética” para operação com Inversor de Frequência

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO											
Arquivo de dados da rede:E:\Wlamir\Resultados\Leste_Inversor.inp											
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Hr	Ee.(KW)	Ea.(KW)	Q (l/s)	H (m)	Lg/Ds	Rot.	Rene	Rena	Tar.(R\$)	Cte-R\$	Cta-R\$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
5	20.31	17.90	137.28	10.69	LIG	0.48	70.9	80.4	0.152072	3.09	2.72
6	21.54	26.53	170.62	11.11	LIG	0.54	86.4	70.1	0.152072	3.28	4.03
7	31.33	46.13	219.65	13.07	LIG	0.65	89.9	61.0	0.152072	4.76	7.02
8	56.19	75.76	256.92	18.69	LIG	0.76	83.8	62.2	0.152072	8.55	11.52
9	77.51	95.94	270.65	23.75	LIG	0.82	81.4	65.7	0.152072	11.79	14.59
10	82.19	102.42	280.45	23.77	LIG	0.84	79.6	63.9	0.152072	12.50	15.57
11	88.84	107.25	280.45	25.70	LIG	0.85	79.6	65.9	0.152072	13.51	16.31
12	86.21	102.87	272.61	26.11	LIG	0.84	81.0	67.9	0.152072	13.11	15.64
13	75.92	93.58	266.72	23.81	LIG	0.81	82.1	66.6	0.152072	11.54	14.23
14	78.22	93.50	260.84	25.41	LIG	0.81	83.1	69.5	0.152072	11.90	14.22
15	70.16	85.86	254.96	23.61	LIG	0.79	84.2	68.8	0.152072	10.67	13.06
16	57.43	68.10	223.58	23.52	LIG	0.74	89.8	75.7	0.152072	8.73	10.36
17	47.10	55.75	209.85	20.40	LIG	0.69	89.2	75.3	0.250919	11.82	13.99
18	43.11	52.08	207.89	18.82	LIG	0.67	89.0	73.7	0.250919	10.82	13.07
19	42.57	52.27	209.85	18.44	LIG	0.67	89.2	72.6	0.250919	10.68	13.11
20	40.69	47.96	200.04	18.34	LIG	0.65	88.5	75.1	0.250919	10.21	12.03
21	35.08	41.10	190.24	16.50	LIG	0.62	87.8	74.9	0.152072	5.33	6.25
22	27.96	29.40	162.78	14.71	LIG	0.56	84.0	79.9	0.152072	4.25	4.47
23	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
VALORES SEM AJUSTE (Original EPANET)											
Custo da operação diária (R\$):				166.53							
Custo mensal previsto (R\$):				4996.00							
Rendimento médio global:				84.41							
VALORES AJUSTADOS											
										Variação (%)	
Custo da operação diária (R\$):				202.20				21.42			
Custo mensal previsto (R\$):				6066.01				21.42			
Rendimento médio global:				70.52				-16.45			
			SEM AJUSTE	AJUSTADOS	Variação			* valores diários			
Consumo mínimo (kW) :			20.31	17.90	-11.87						
Consumo máximo (kW) :			88.84	107.25	20.72						
Consumo médio (kW) :			54.57	66.36	21.59						
Consumo acumulado :			982.34	1194.40	21.59						
Acumulado mensal (kW) :			29470.20	35832.00				(valores previstos)			
Legenda das colunas											
(1) - Hora do dia (h)				(5) - Carga hidráulica produzida (m)				(9) - Rendimento ajustado (proposta)			
(2) - Consumo de energia segundo o EPANET				(6) - Situação da bomba ligada / desligada				(10) - Tarifa de consumo horário			
(3) - Consumo de energia ajustado (proposta)				(7) - Rotação adimensional da bomba				(11) - Custo horário do consumo pelo EPANET			
(4) - Vazão recalçada (l/s)				(8) - Rendimento previsto pelo EPANET				(12) - Custo horário (proposta)			

Tabela 5.9 – Resultados da simulação no programa de “Auditoria Energética” para operação Otimizada

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO											
Arquivo de dados da rede:E:\Wlamin\Resultados\Leste_Otima.inp											
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Hr	Ee.(KW)	Ea.(KW)	Q (l/s)	H (m)	Lg/Ds	Rot.	Rene	Rena	Tar.(R\$)	Cte-R\$	Cta-R\$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
5	13.02	13.41	137.28	6.85	LIG	0.43	70.9	68.8	0.152072	1.98	2.04
6	16.48	22.60	170.62	8.50	LIG	0.51	86.4	63.0	0.152072	2.51	3.44
7	27.61	42.84	219.65	11.52	LIG	0.63	89.9	57.9	0.152072	4.20	6.51
8	42.95	64.71	256.92	14.29	LIG	0.73	83.8	55.6	0.152072	6.53	9.84
9	50.08	74.19	270.65	15.34	LIG	0.77	81.4	54.9	0.152072	7.62	11.28
10	55.89	81.63	280.45	16.17	LIG	0.79	79.6	54.5	0.152072	8.50	12.41
11	55.89	81.63	280.45	16.17	LIG	0.79	79.6	54.5	0.152072	8.50	12.41
12	51.09	75.55	272.61	15.47	LIG	0.77	81.0	54.8	0.152072	7.77	11.49
13	48.10	71.53	266.72	15.09	LIG	0.76	82.1	55.2	0.152072	7.31	10.88
14	44.76	67.21	260.84	14.54	LIG	0.74	83.1	55.4	0.152072	6.81	10.22
15	42.07	63.47	254.96	14.16	LIG	0.73	84.2	55.8	0.152072	6.40	9.65
16	28.70	44.78	223.58	11.75	LIG	0.64	89.8	57.6	0.152072	4.36	6.81
17	25.21	38.20	209.85	10.92	LIG	0.61	89.2	58.9	0.250919	6.33	9.59
18	24.74	37.31	207.89	10.80	LIG	0.60	89.0	59.0	0.250919	6.21	9.36
19	25.21	38.20	209.85	10.92	LIG	0.61	89.2	58.9	0.250919	6.33	9.59
20	22.66	33.66	200.04	10.21	LIG	0.58	88.5	59.6	0.250919	5.69	8.45
21	20.49	29.67	190.24	9.64	LIG	0.56	87.8	60.6	0.152072	3.12	4.51
22	15.48	20.23	162.78	8.14	LIG	0.49	84.0	64.3	0.152072	2.35	3.08
23	0.00	0.00	0.00	0.00	DES	0.00	0.0	0.0	0.152072	0.00	0.00
VALORES SEM AJUSTE (Original EPANET)											
Custo da operação diária (R\$):				102.50							
Custo mensal previsto (R\$):				3074.95							
Rendimento médio global:				84.41							
VALORES AJUSTADOS											
Variação (%)											
Custo da operação diária (R\$):				151.56				47.86			
Custo mensal previsto (R\$):				4546.71				47.86			
Rendimento médio global:				58.28				-30.95			
			SEM AJUSTE	AJUSTADOS	Variação	* valores diários					
Consumo mínimo (kW) :			13.02	13.41	3.02						
Consumo máximo (kW) :			55.89	81.63	46.06						
Consumo médio (kW) :			33.91	50.05	47.57						
Consumo acumulado :			610.43	900.82	47.57						
Acumulado mensal (kW) :			18312.90	27024.60		(valores previstos)					
Legenda das colunas											
(1) - Hora do dia (h)				(5) - Carga hidráulica produzida (m)				(9) - Rendimento ajustado (proposta)			
(2) - Consumo de energia segundo o EPANET				(6) - Situação da bomba ligada / desligada				(10) - Tarifa de consumo horário			
(3) - Consumo de energia ajustado (proposta)				(7) - Rotação adimensional da bomba				(11) - Custo horário do consumo pelo EPANET			
(4) - Vazão recalçada (l/s)				(8) - Rendimento previsto pelo EPANET				(12) - Custo horário (proposta)			

Na comparação dos três cenários simulados, os resultados mostraram que o cenário 2 promove uma redução do consumo de energia elétrica em 52,12%, enquanto que o cenário 3 reduz esse mesmo consumo em 63,89%.

Analisando somente os dois cenários com o emprego do inversor de frequência, ainda há uma redução do consumo em 24,58% com o emprego das “rotações ótimas”. Essa avaliação torna muito claro as expectativas do emprego de inversores de frequência em sistemas de bombeamento. Contudo, os resultados aqui apresentados devem ser entendidos como um estudo de caso demonstrando as possibilidades não se caracterizando como regra geral. Cada unidade guarda inúmeras variáveis e particularidades que só o estudo individual poderá conduzir a bons resultados.

Resumidamente, toda a discussão conduzida neste capítulo, através dos testes realizados nas unidades estudadas, bem como no trabalho como um todo, pode ser integralizada num fluxograma (Figura 5.39) que tem por finalidade servir como uma ferramenta guia dos critérios mais relevantes a serem considerados quando o assunto for a implementação de inversor de frequência em sistemas de bombeamento.

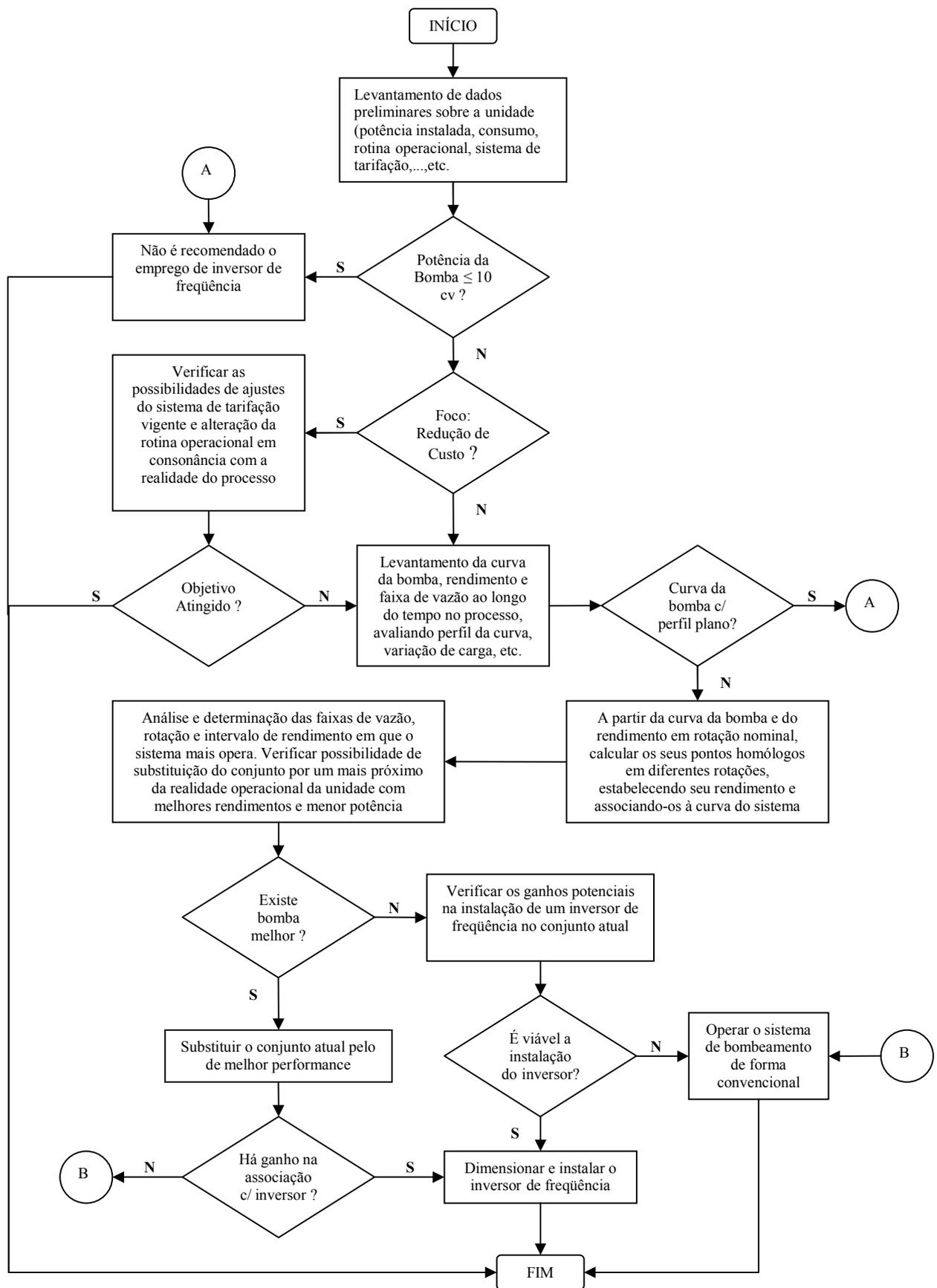


Figura 6.1 – Fluxograma dos critérios de emprego de inversor de frequência

“Success is never final. Failure is never fatal. It is courage that counts.”

Sir Winston Churchill

6. – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A motivação para esse longo trabalho de pesquisa, a respeito do inversor de frequência em sistema de bombeamento, foi a pouca informação sobre esse dispositivo e a quase indisponibilidade de dados, mais precisamente, aqueles relativos às questões operacionais dinâmicas. A bibliografia disponível, exaustivamente consultada por 5 anos, jamais revelou muito mais informações, focando quase que prioritariamente a questão única da economia de energia elétrica.

É possível compreender a importância deste item, porém quando se enxerga unicamente um sentido em meio a um ambiente que congrega inúmeras variáveis, esse foco único pode conduzir a distorções ou equívocos em relação aos resultados apresentados e a sua interpretação, criando uma visão enganosa e irreal a respeito do assunto. Esse é o caso do inversor de frequência, ferramenta maravilhosa que se bem aplicada e perfeitamente solidarizado ao sistema, tem muito a contribuir no desenvolvimento tecnológico no campo da engenharia.

O fato preponderante para se chegar às conclusões que serão apresentadas adiante, se deve muito ao contato estabelecido com as empresas de saneamento envolvidas no trabalho. Ambas, gentilmente compartilharam um pouco das suas experiências com variadores de velocidade, sendo que a *SANASA* mais especificamente, disponibilizou dados, instalações, equipamentos e pessoal para os testes que se desenvolveram. Sem esse apoio irrestrito, dificilmente o objetivo da pesquisa seria alcançado.

Quando se fala em operação de sistema de bombeamento, a primeira coisa que se vem em mente são bombas funcionando de forma ininterrupta, produção, rotina operacional, consumo de energia elétrica e, obviamente, custo. Essa talvez seja a palavra chave de toda a discussão, o “*custo*”.

Quando existe a intenção de se empregar inversor de frequência, a primeira pergunta que deveria ser feita seria:

“Qual a expectativa do cliente ou empresa que pretende empregar um inversor de frequência no seu sistema ?”.

Trata-se de uma questão muito abrangente, contudo ela é fundamental e toda discussão será levada em função dessa simples resposta. Elegendo hipoteticamente o “*custo*” como resposta à questão apresentada, surgiria a primeira grande orientação.

O início de um estudo visando o emprego de inversor de frequência deve começar pelo profundo conhecimento do sistema, tendo como referência dois grupos principais:

- Sistema de Tarifação (modalidade de cobrança, demanda contratada, etc.)
- Características da unidade (topologia, rotina operacional, curva real do sistema, curva real da bomba, rendimento real, ponto de operação, pontos críticos, limitações, etc.)

Essas são informações extremamente importantes para o desenvolvimento do trabalho. De posse delas, já é possível associá-las à expectativa levantada na primeira questão. Sendo o “*custo*” o foco principal, talvez pequenos ajustes e mudanças no sistema de tarifação já conduziriam ao resultado almejado. A análise e a definição de uma outra modalidade de cobrança, além da recontração de uma nova demanda de potência, poderiam reduzir substancialmente os custos diretos.

Por outro lado, já por diversas vezes evidenciado ao longo da pesquisa, os sistemas são geralmente superdimensionados, o que implica diretamente na questão tarifária, pois a contratação da demanda de potência está diretamente vinculada a este item. Outro fator bastante significativo é a possibilidade de mudança na rotina operacional da estação. Esta condição abre caminhos para escolha de uma modalidade de cobrança mais vantajosa em função das demandas operacionais do sistema ou do processo, mas muito CUIDADO !!! Alterações desse tipo, quando solicitadas às concessionárias de energia elétrica, só podem ser revistas após 6 meses de permanência nessa nova condição.

É importante observar que todas essas alternativas não envolvem nenhum tipo de gasto e, na verdade, já deveriam ser de pleno conhecimento, pois fazem parte do gerenciamento de um processo, entretanto, isso não é o que ocorre na grande maioria dos casos observados.

Tendo então o “*custo*” como foco inicial da discussão e sendo possíveis os ajustes acima sugeridos, muito provavelmente o objetivo já seria de imediato alcançado e o melhor, sem investimento algum, apenas uma readequação da unidade o mais próximo da sua realidade.

Imaginando agora que o “*custo*” não mais seja o foco principal, ou até mesmo que os resultados atingidos com as readequações do sistema de cobrança de energia elétrica e as mudanças nas rotinas operacionais não tenham sido satisfatórias, se inicia então a segunda etapa, que é a identificação de pequenas obras e investimentos, obviamente, com valores abaixo do custo de um inversor de frequência, que poderiam ser implementados e que melhorariam este sistema.

Conhecendo-se as curvas da bomba, do sistema e o rendimento do conjunto moto-bomba é possível identificar o seu ponto de operação, além da faixa de vazão, intervalo de rendimento e carga em que o sistema mais opera. De imediato esses dados já darão uma excelente indicação se o inversor de frequência será uma alternativa adequada.

Curvas de bombas com perfis muito planos, ou seja, com baixa variação de carga, não são as melhores para associação com inversor de frequência, visto que certas faixas de variações de vazão, pouco ou quase nada refletirão em termos de variações de carga e, conseqüentemente, muito pouco será o benefício de economia se comparado com uma operação pelo sistema convencional.

Conforme descrito por outros autores e muitas vezes enfatizado ao longo do trabalho, o melhor dimensionamento possível do conjunto moto-bomba é aquele em que o ponto de operação, correspondente à máxima vazão, esteja localizado à direita das curvas de melhores rendimentos. Isso permitiria que ao longo da faixa de vazão em que se opera, o sistema flutuasse pelos melhores rendimentos do conjunto, alcançando assim resultados mais efetivos em termos de economia. Nesse caso a substituição do conjunto moto-bomba existente seria uma alternativa a ser considerada. Outra possibilidade a ser verificada é a substituição do próprio barrilete da estrutura de bombeamento. Projetos antigos apresentam conexões em 90° o que aumenta bastante a perda de carga, assim como válvulas de retenção que também contribuem para isso.

Em uma operação convencional do sistema, através de válvula de controle de fluxo combinada com um conjunto moto-bomba bem ajustado à realidade operacional da unidade, traria mais benefícios do que mantido um conjunto moto-bomba superdimensionado mesmo que associado a um inversor de frequência, conforme visto no exemplo da C. B. “João Erbolato”. Evidentemente, essa indicação carece de uma avaliação mais ampla e profunda em relação aos interesses do cliente ou empresa. Porém, merece toda atenção.

Mantendo-se ainda o interesse pelo emprego do inversor, inicia-se então a terceira e mais laboriosa das etapas do estudo, o levantamento de todos os dados e parâmetros necessários do sistema para uma avaliação mais conclusiva.

A mudança na rotação do conjunto implica na alteração de “todos” os parâmetros da bomba, ou seja, ao se alterar a rotação mudam além da vazão e da carga, o NPSH requerido, potência consumida, etc. e, principalmente, o rendimento. Chega-se nesse ponto numa outra questão crucial:

“Existe alguma vantagem em se alterar as rotações e passar a trabalhar com rendimentos do conjunto muito baixos ?”

É nesse ponto que a questão do emprego do inversor de frequência começa a esbarrar na dúvida. Alterações nas rotações trarão benefícios como a redução da carga, da potência consumida, da preservação do conjunto contra o “*stress*” da operação com válvula de controle, etc. Entretanto, haverá um preço a ser pago, na forma da perda de rendimento, aumento da temperatura do conjunto moto-bomba, desgaste da isolamento do bobinado do motor, etc. A resposta tem relação direta com o custo-benefício disso, e aí a questão passa a ser uma avaliação pessoal e que envolve múltiplos fatores além da própria questão técnica.

Dados de rendimentos nominais mínimos de motores (Capítulo 3 – Tabela 3.2 – página 21) e curvas de bombas demonstram que conjuntos de potência muito baixa, menor que 10 cv, inviabilizam qualquer associação com inversor se o aspecto for puramente a redução do consumo de energia elétrica, visto que geralmente os mesmos apresentam valores de rendimento relativamente mais baixos. Dentro desse enfoque, dificilmente os ganhos com a redução de velocidade seriam significativos a ponto de compensar a grande perda de rendimento, conforme discutido no Capítulo 5 – página 116 (Figuras 5.6 e 5.7).

Felizmente, existe a possibilidade de desenvolvimento de um estudo prévio que sirva de referência na tomada dessa decisão. Essa terceira etapa foi descrita e é a mais laboriosa, pois necessitará do levantamento de alguns dados em campo com o auxílio de aparelhos mais

sofisticados. No mínimo são requeridos sensores de pressão e medidores de vazão, perfeitamente posicionados no sistema de bombeamento para aquisição de informações dinâmicas a respeito da operação. É desejável a aquisição de dados elétricos para composição deste estudo, tais como: tensão, corrente, rotação do motor, fator de potência, etc. A falta de dados consistentes conduzirá a avaliações incompletas e equivocadas.

No geral, os dados mais relevantes e significativos para composição da análise prévia são:

- Curva do Sistema apresentando a relação vazão x carga ao longo da operação;
- Curva da Bomba para rotação nominal, também em relação a vazão × carga;
- Rotação da bomba;
- Rendimento do conjunto moto-bomba;
- Parâmetros elétricos do sistema (tensão, corrente e fator de potência);
- NPSH disponível do sistema e requerido da bomba;
- Pressão a montante e a jusante do bombeamento, além do ponto crítico.

A partir disso será possível elaborar todos os cálculos referentes ao sistema operando com um inversor de frequência associado.

As “Leis de Semelhança” se mostraram bastante adequadas no que tange ao seu uso no ajuste dos dados da rotação nominal para diferentes rotações. A partir da curva da bomba e seu rendimento em rotação nominal pode-se interpolar e extrapolar curvas semelhantes em outras rotações, como também avaliar os rendimentos nos pontos de interesse. Finalmente, combinando

todos esses dados num único gráfico haverá condições de uma avaliação mais segura quanto as possibilidades e limitações da implementação do inversor nesse sistema.

A elaboração de modelos matemático-computacionais são ferramentas bastante úteis para compor uma avaliação mais precisa e segura. Esses modelos, perfeitamente calibrados, podem reproduzir com muita precisão um sistema real, o que permitirá a simulação de cenários múltiplos de operação antes que qualquer mudança seja implementada. Conforme demonstrado no capítulo anterior, o EPANET – Versão 2.0, é uma ferramenta acessível e de baixo grau de dificuldade quanto a sua utilização. Outros modelos mais sofisticados requerem um grau de conhecimento de modelação mais aprimorado, entretanto os resultados finais podem compensar o investimento.

Como se pode constatar não existem receitas milagrosas ou um guia que possa ser extrapolado para qualquer situação. O inversor de frequência não foi concebido para resolver todos os problemas, e sim para servir de ferramenta dentro de um processo que, no caso específico desse trabalho, requer um bombeamento, buscando melhorar e otimizar o sistema operacional. Cada caso deve ser estudado individualmente e ponderada as diversas alternativas em função dos recursos disponíveis (físicos e financeiros), além da própria expectativa do resultado do trabalho.

É importante enfatizar, que as discussões desenvolvidas neste estudo tem como foco uma análise ampla da performance operacional de um inversor de frequência associado a um sistema de bombeamento de empresas públicas de abastecimento. Entende-se que muitos motivos e critérios podem conduzir ao emprego dessa tecnologia, como se pôde observar através das experiências de cada uma das empresas estudadas (Capítulo 3 – Da página 44 à 69) e que, se por um lado ocorrerão perdas, outros benefícios estão sendo os reais motivos das mudanças e eles não fazem parte dessa discussão, tampouco são alvos de críticas. A idéia central é formar um conceito fundamentado do emprego eficaz do inversor de frequência com a maximização dos seus recursos.

Como sugestão para pesquisas futuras fica o desenvolvimento de estudos de otimização de sistemas de recalque já dotados de inversor de frequência, como aqui exemplificado num estudo de caso, mas para operação em tempo real.

A partir da criação de um amplo banco de dados do sistema, abrangendo diferentes períodos sazonais ou de produção, poder-se-ia elaborar um modelo matemático-computacional associado a um modelo de otimização destinado a obtenção de regras operacionais ótimas.

Numa operação em tempo real o gerenciador poderia, a partir de dados e informações on-line do sistema, definir as “rotações ótimas” que lhe permitam suprir as necessidades de demanda e produção, combinando com isso a redução de custos aos valores operacionais mínimos.

“A university education ought to be a guide to the reading of a lifetime.”

Sir Winston Churchill

7. – ANEXOS

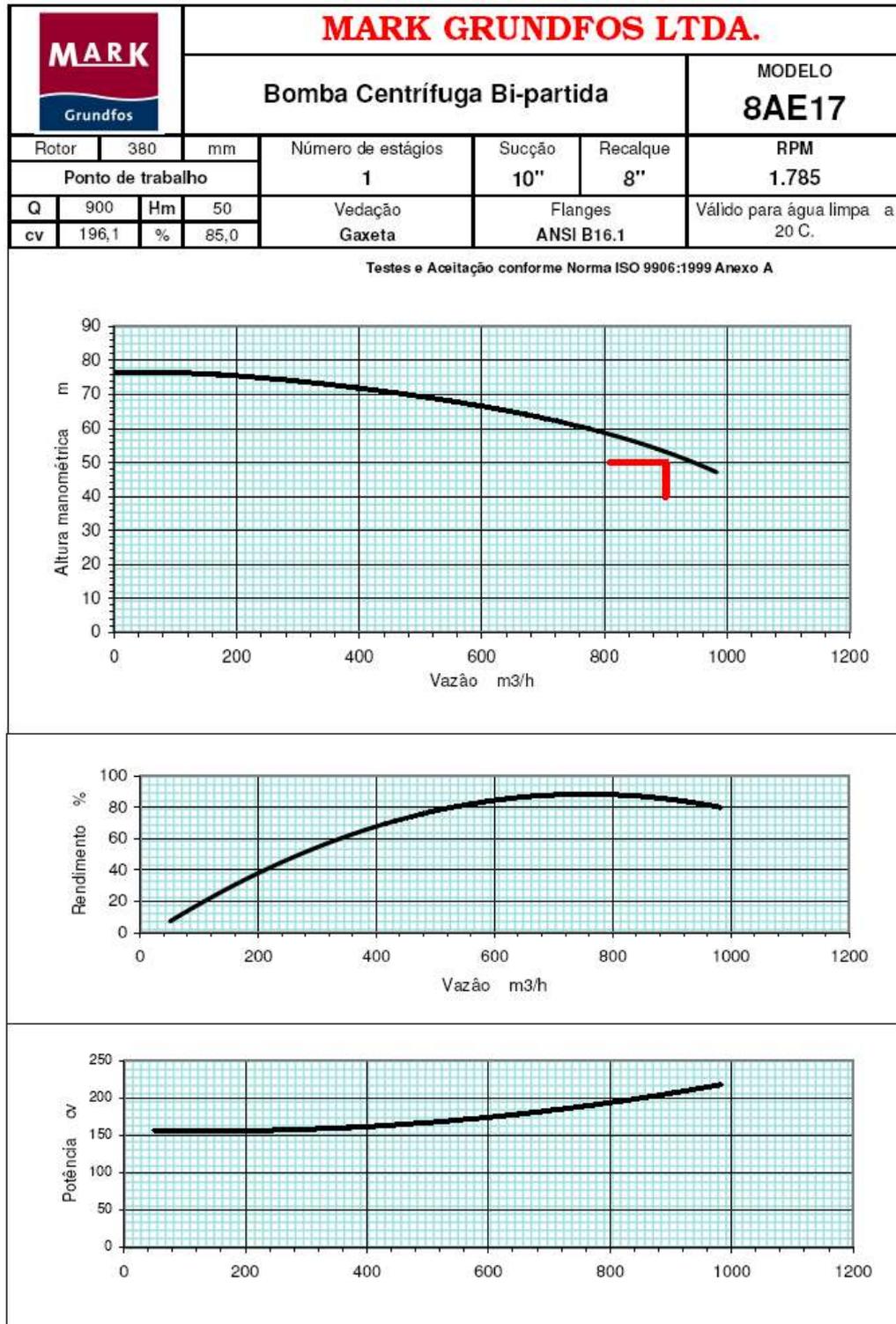


Figura 7.1 – Curva Original da Bomba do Conjunto Principal da C.B. “João Erbolato”

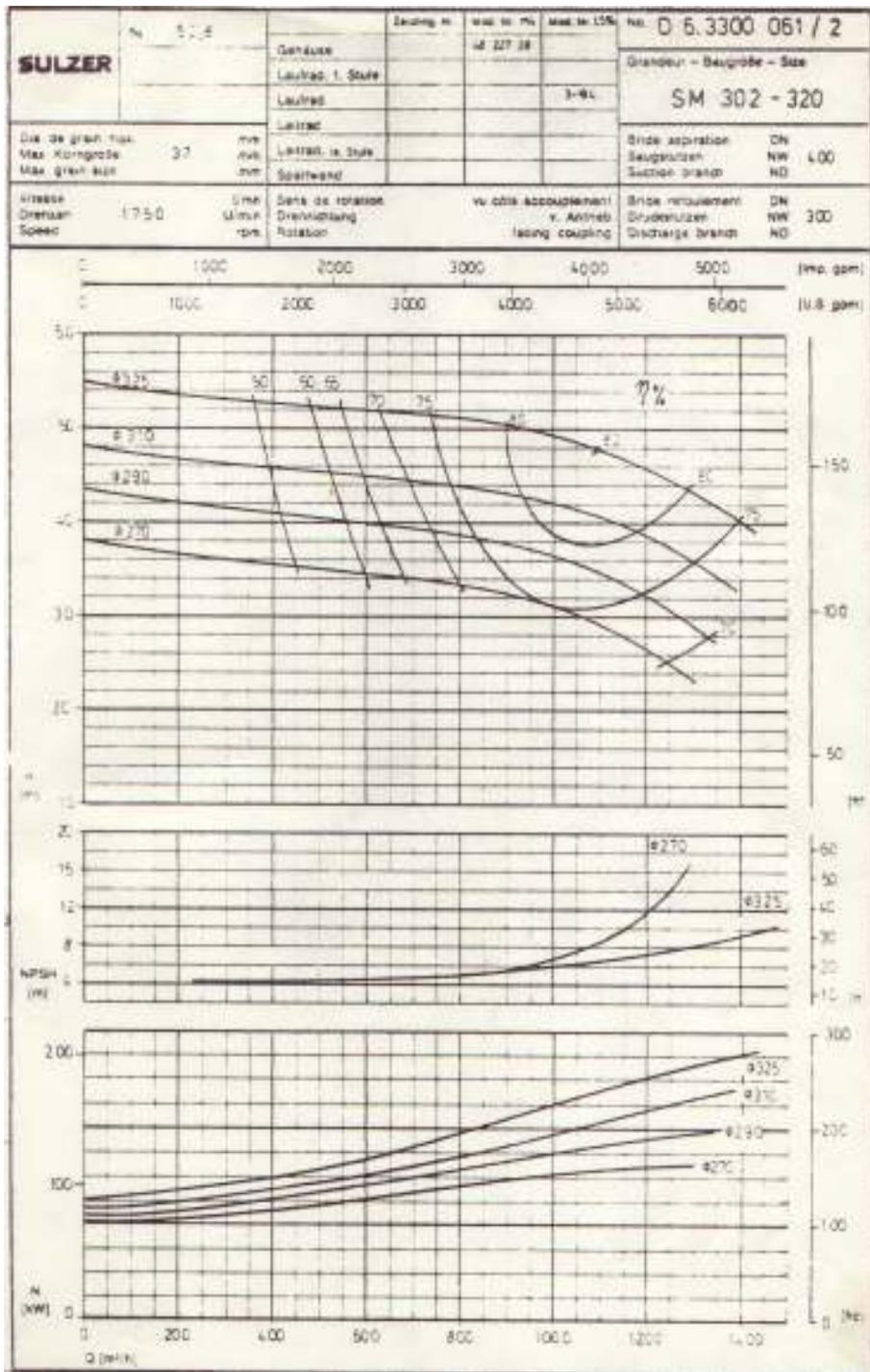


Figura 7.2 – Curva Original da Bomba do Conjunto Reserva da C.B. “João Erbolato”

Medidor Eletromagnético de Vazão - Marca Conaut - C. B. "Pulmão" (S. A. "Leste")

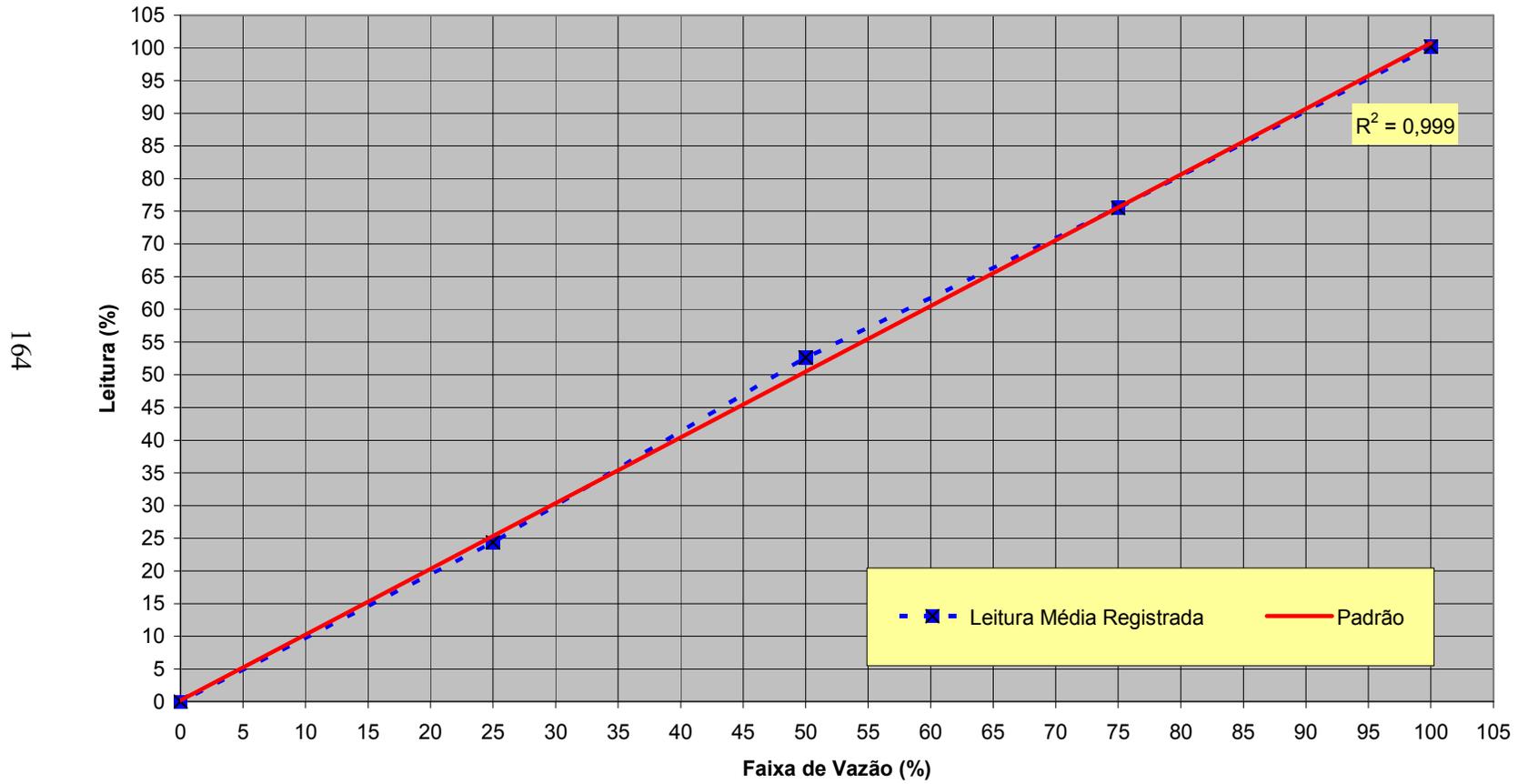


Figura 7.3 – Curva de Calibração do Medidor de Vazão da C. B. “Pulmão”

Medidor Eletromagnético de Vazão - Marca Conaut - C. B. "João Erbolato"

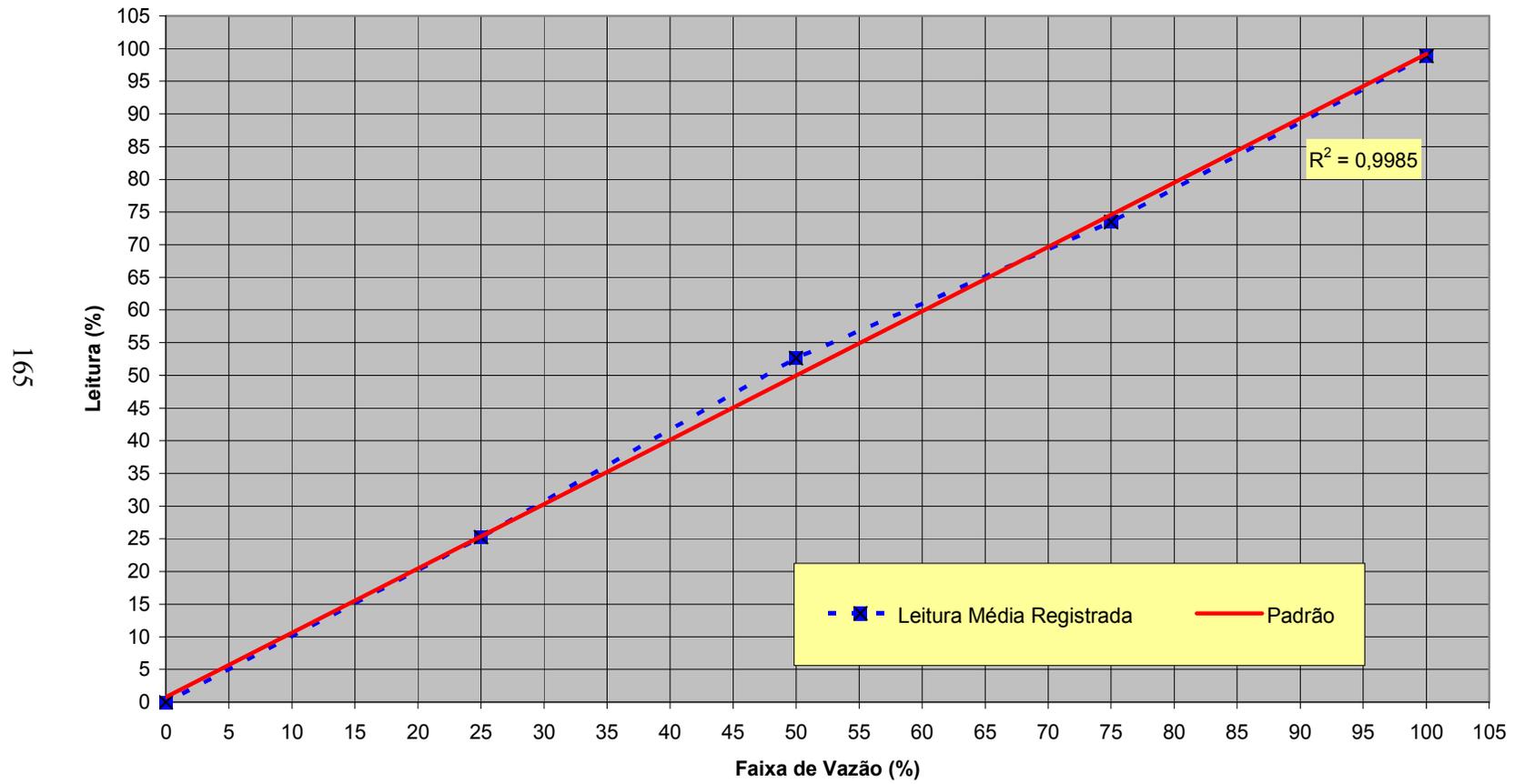


Figura 7.3 – Curva de Calibração do Medidor de Vazão da C. B. “João Erbolato”

Transmissor de Pressão Manométrica - Marca SMAR - Mod. LD-301

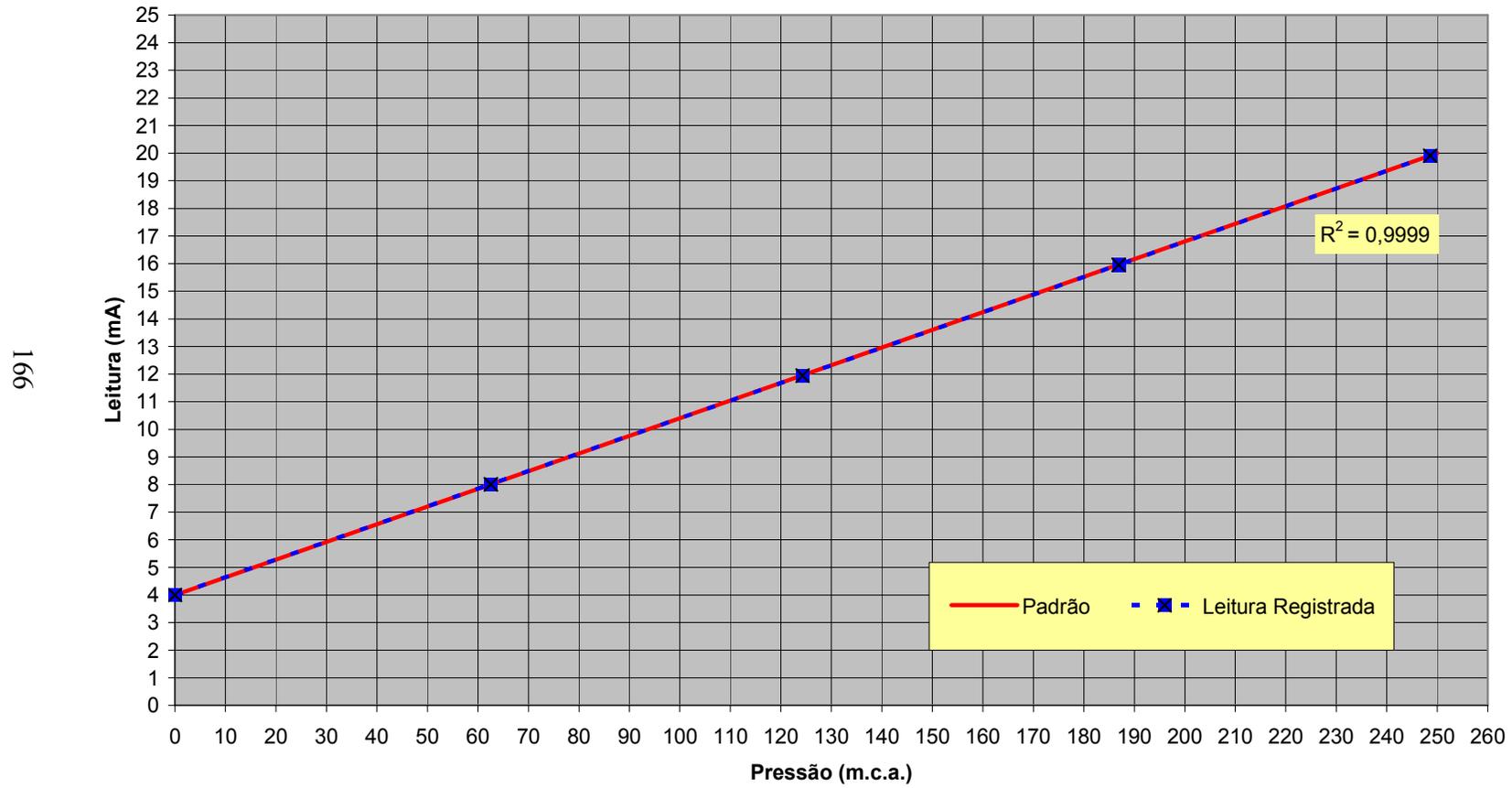


Figura 7.5 – Curva de Calibração do Transmissor de Pressão utilizado na C. B. “João Erbolato”

Data-Logger de Pressão - Marca Technolog - Modelo Metrolog P P/D 200 m - n° 21.386

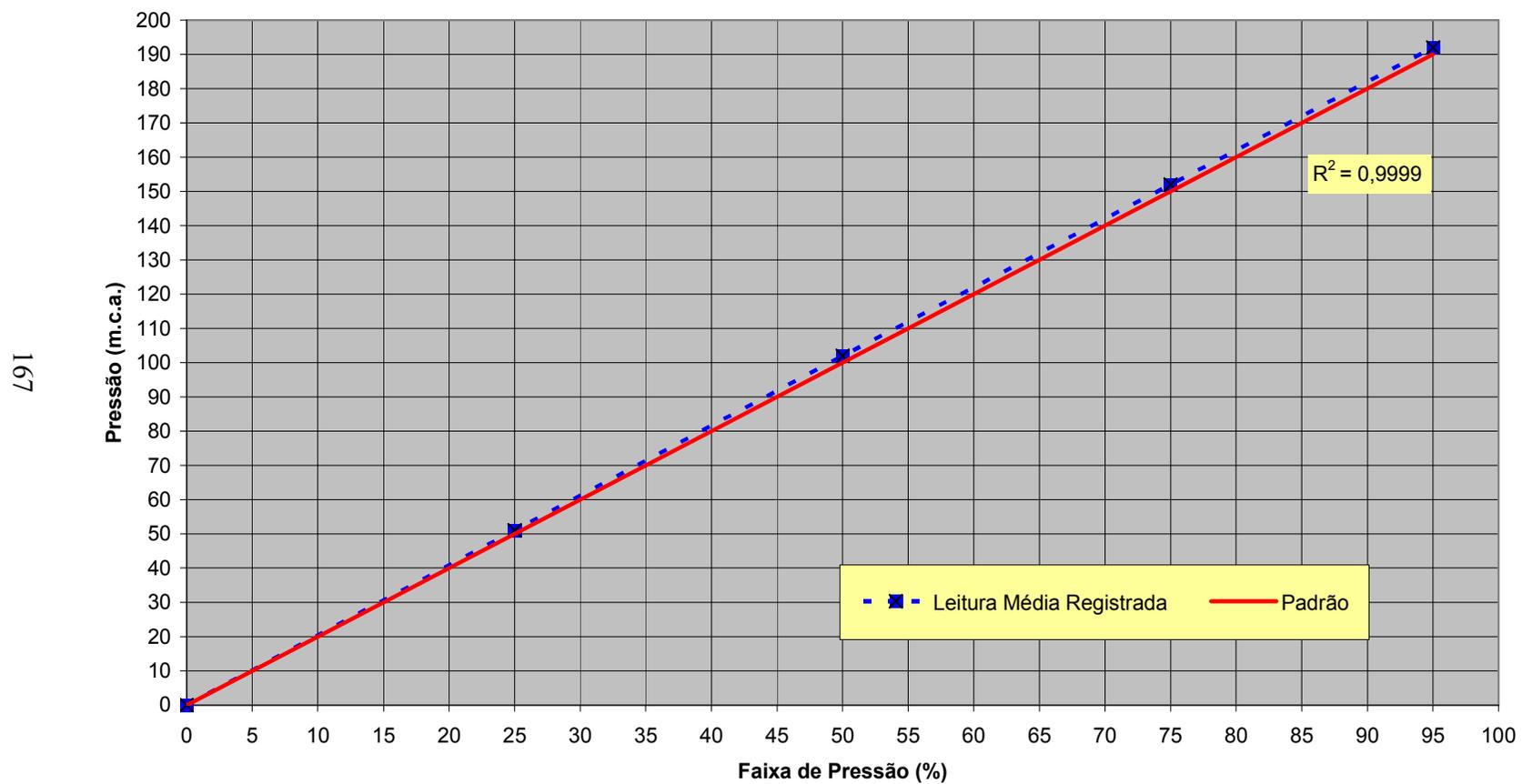


Figura 7.6 – Curva de Calibração do Data-Logger de Pressão

Data-Logger de Pressão - Marca Technolog - Modelo Metrolog P P/D 200 m - nº 17.878

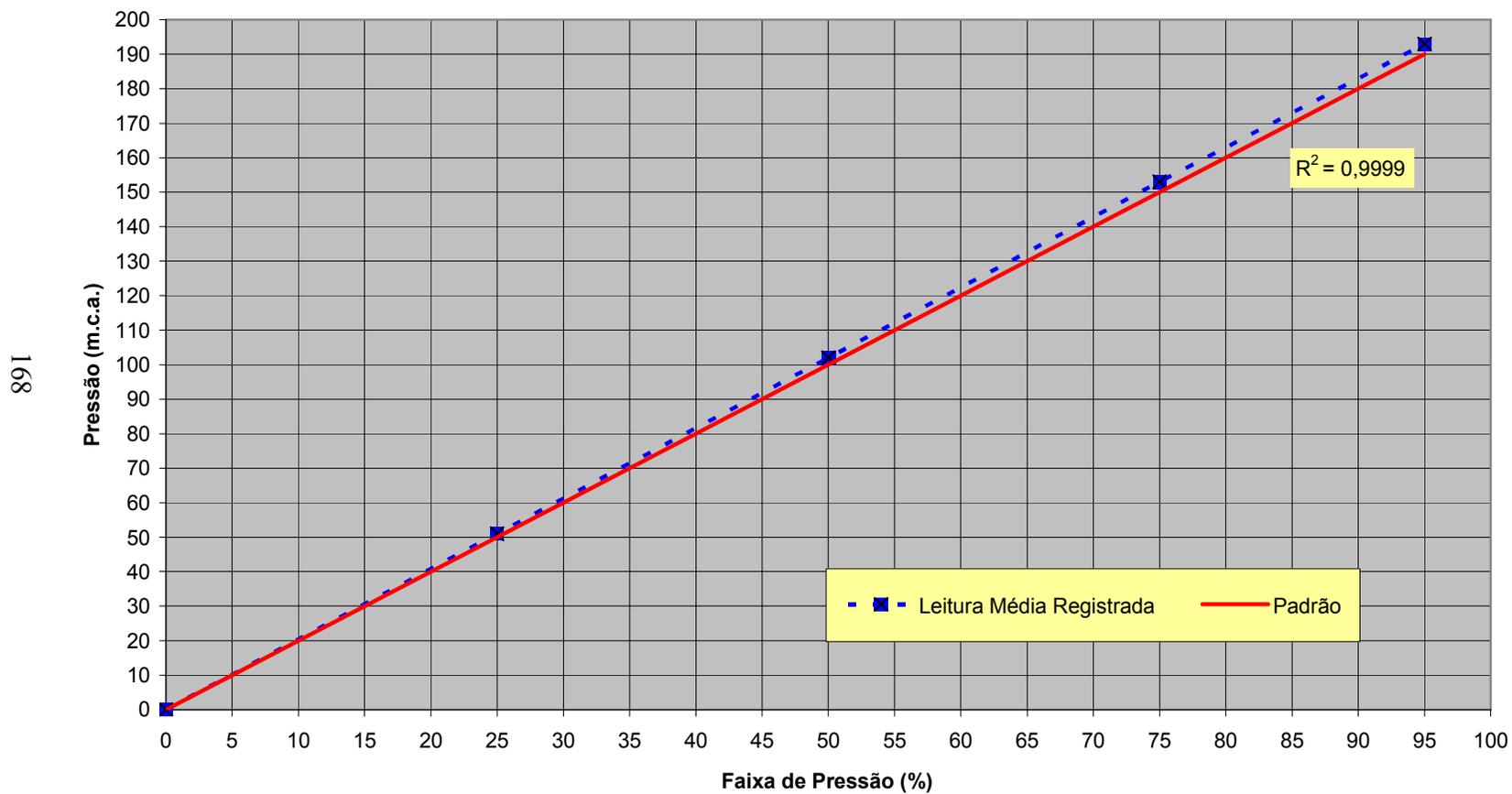


Figura 7.7 – Curva de Calibração do Data-Logger de Pressão

Data-Logger de Pressão - Marca Technolog - Modelo Metrolog P P/D 200 m - nº 20.870

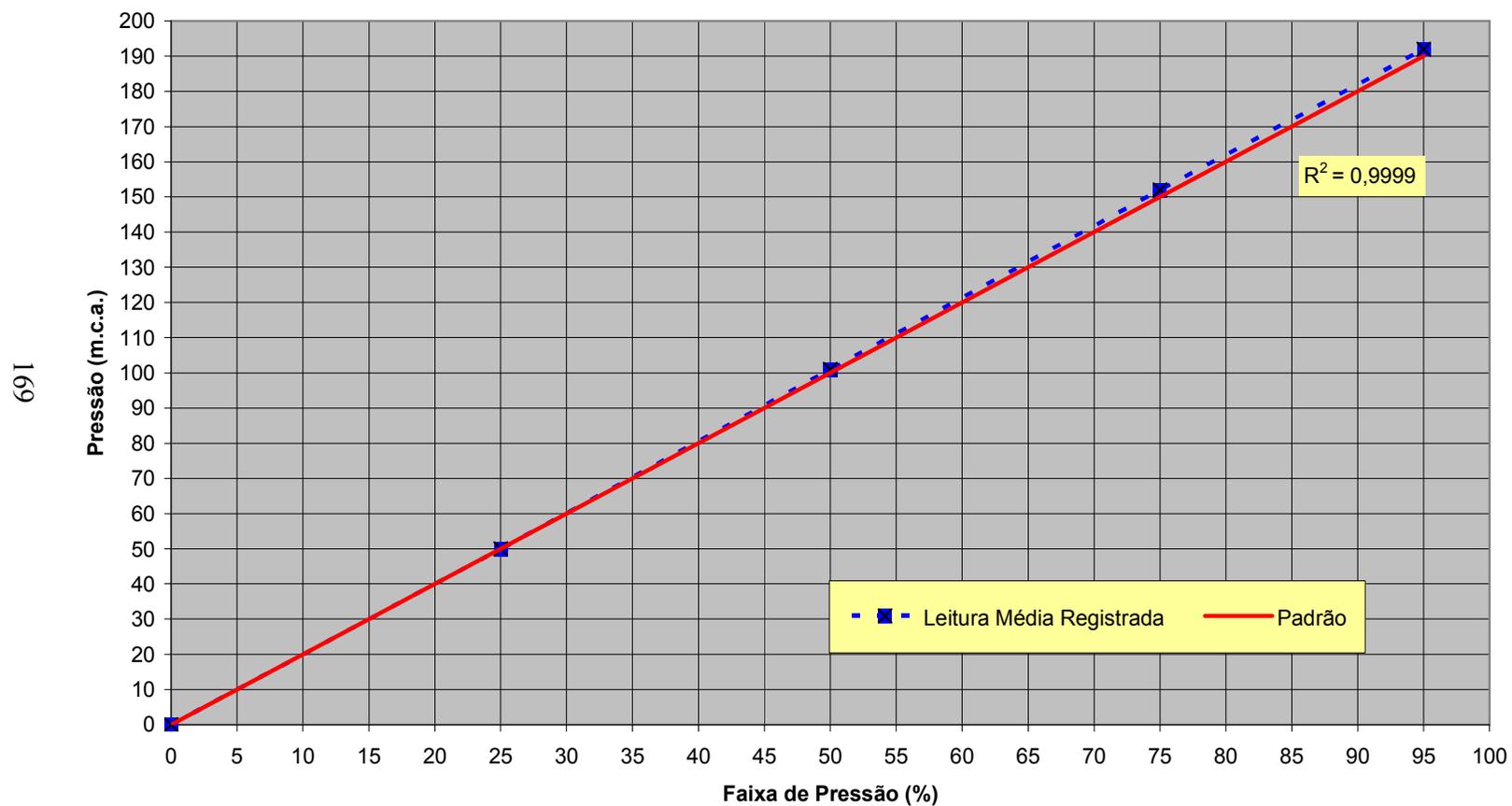


Figura 7.8 – Curva de Calibração do Data-Logger de Pressão

Data-Logger de Pressão - Marca Technolog - Modelo Technolog P P/D 200 m - nº 20.868

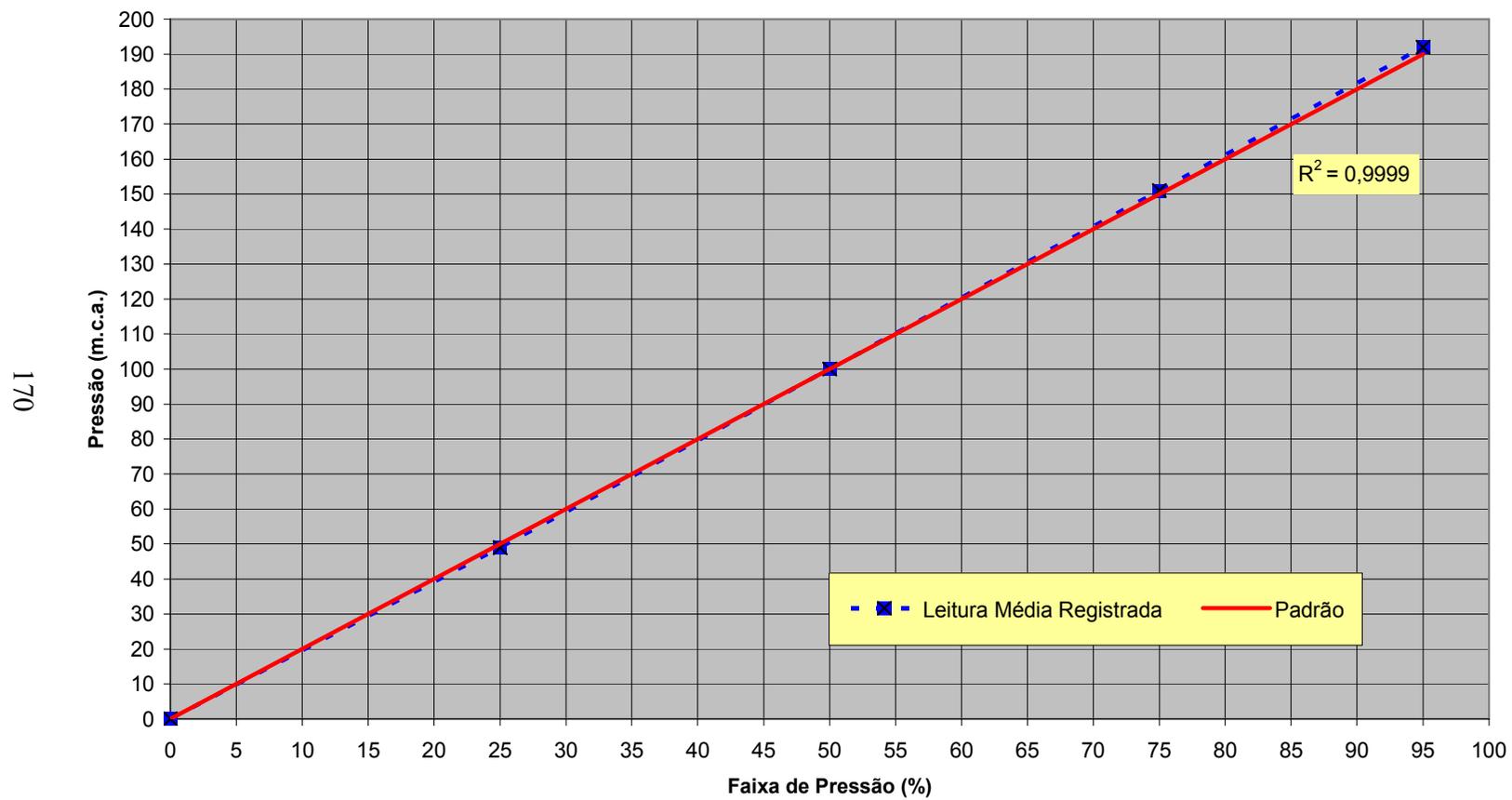


Figura 7.9 – Curva de Calibração do Data-Logger de Pressão

Data-Logger de Pressão - Marca Technolog - Modelo Metrolog P P/D 200 m - nº 20.873

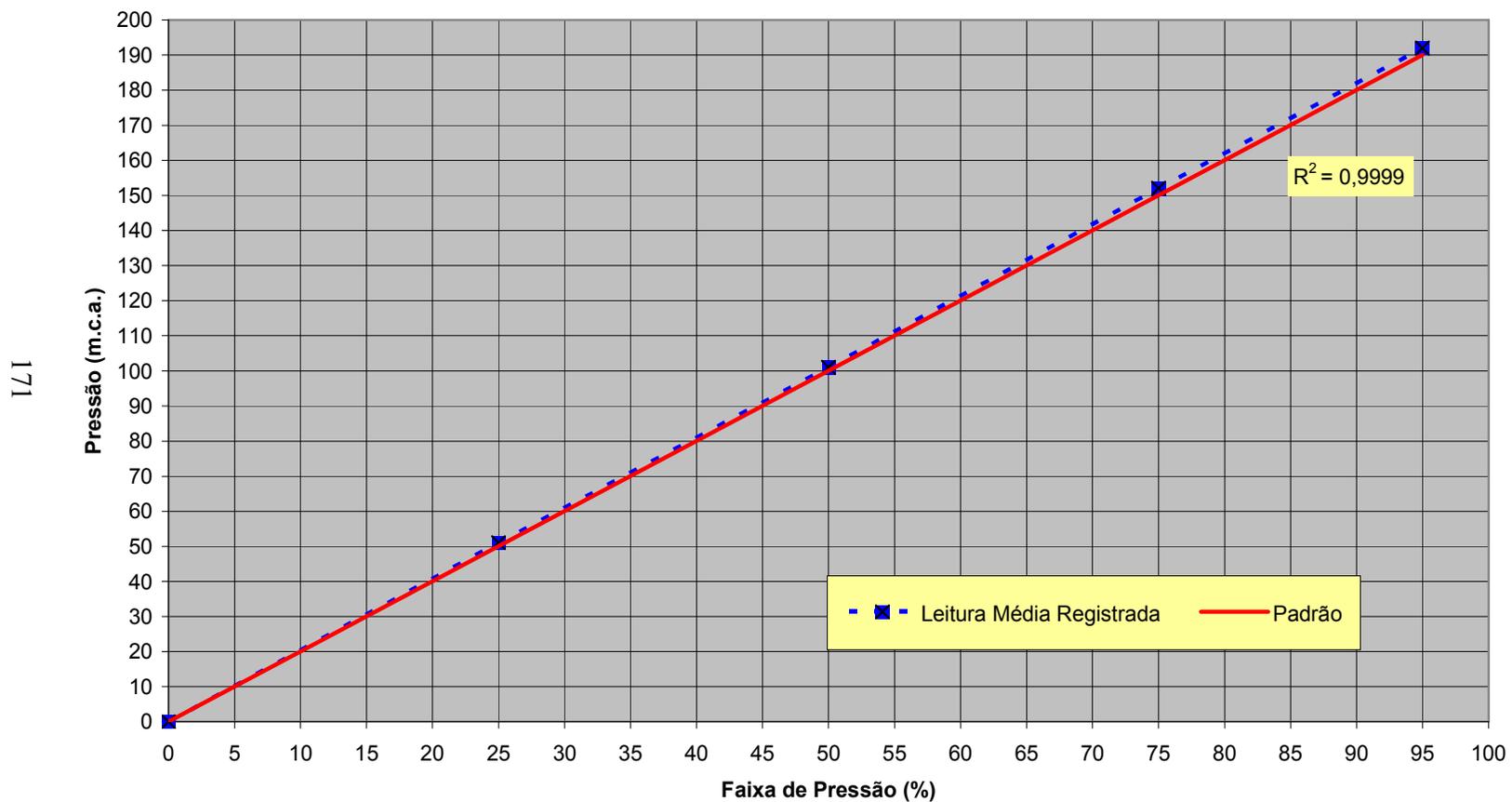
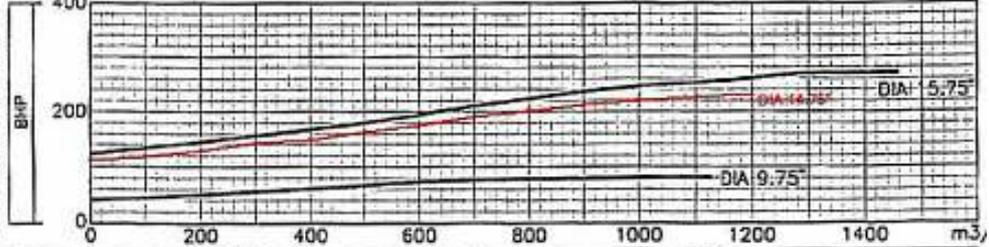
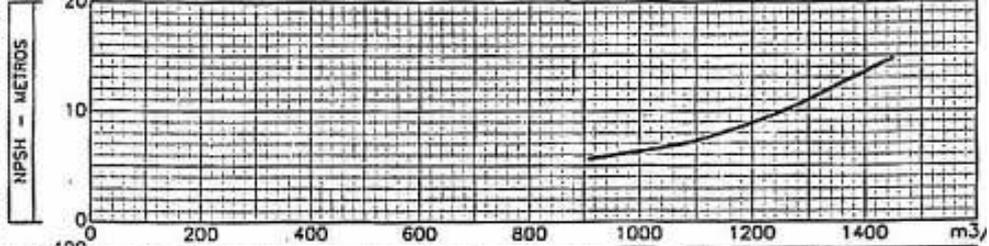
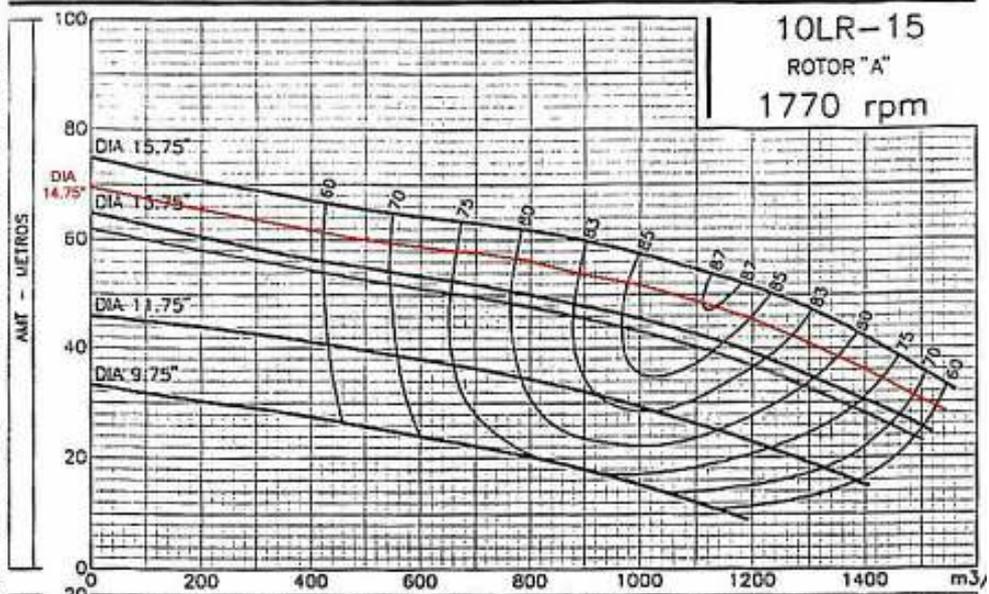


Figura 7.10 – Curva de Calibração do Data-Logger de Pressão

CURVAS CONFORME TESTE COM ÁGUA LIMPA E FRIA E FOLGAS ORIGINAIS DE PROJETO - APENAS UM PONTO É GARANTIDO.



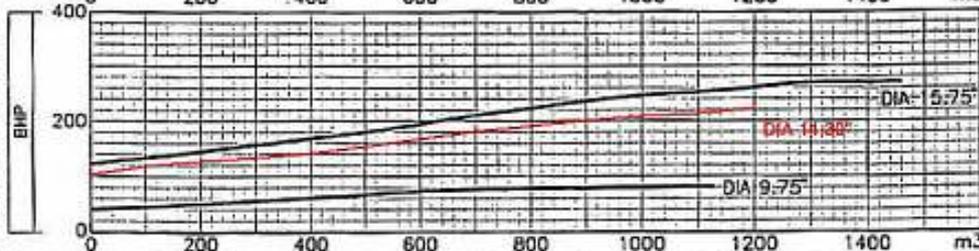
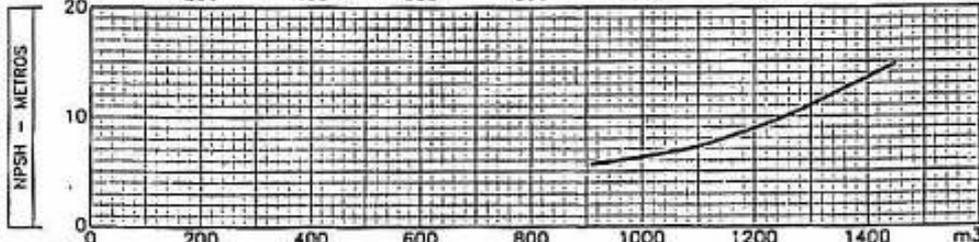
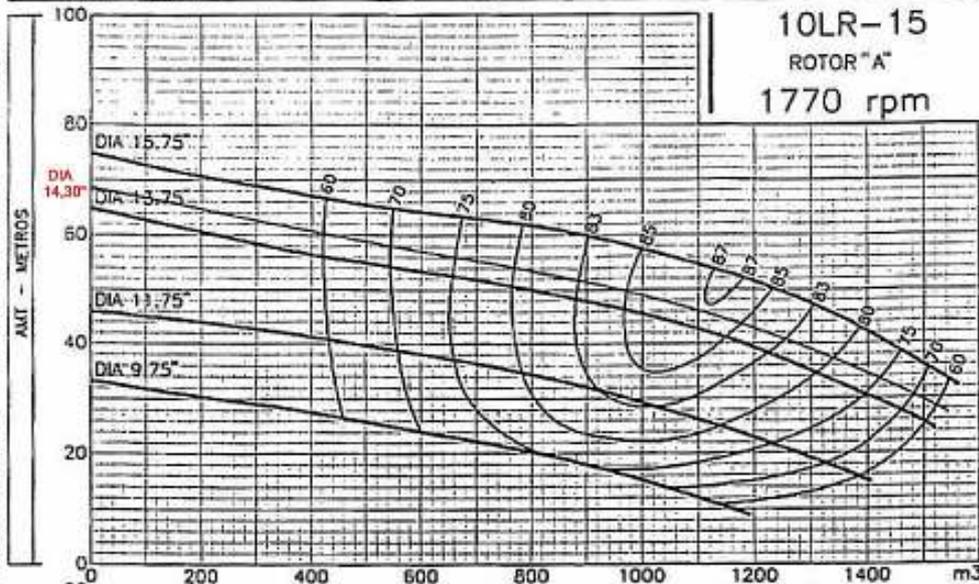
CONDIÇÕES DE SERVIÇO GARANTIDAS	CLIENTE: SANASA	VAZÃO: 1080 m ³ /h	Ø SUCCÃO: _____ in
	REF. CLIENTE: _____	AMT: 49 m	Ø DESCARGA: _____ in
	SERVICO: _____	REND: _____ %	Ø MAX. SÓLIDOS: _____ in
	FLUIDO: _____	BHP: _____ hp	ROTOR: 375 mm (14,75")
	DENSIDADE: _____ TEMP: _____ °C	NPSHr: _____ m	ÁREA DE ENTRADA: _____ in ²
	VISCOSIDADE: _____	NPSHd: _____ m	NÚMERO DE PALHETAS: _____
EMITIDO POR: <i>[Signature]</i>	CONFIRMO POR: <i>[Signature]</i>	DATA: 19/10/95	WIR ² (MOLHADO): _____ lb.in ²

Tolerancias para selecao e teste conforme HYDRAULIC INSTITUTE standards.
 Curva nº. : A-19142
 Grupo 1

MODELO DA BOMBA
10LR-15

Figura 7.11 – Curva Original da Bomba do Grupo 1 da C.B. “Pulmão”

CURVAS CONFORME TESTE COM ÁGUA LIMPA E FRIA E FOLGAS ORIGINAIS DE PROJETO - APENAS UM PONTO É GARANTIDO.



CONDIÇÕES DE SERVIÇO GARANTIDAS	CLIENTE: SANASA	VAZÃO: 1080 m ³ /h	Ø SUÇÃO: _____ in
	REF. CLIENTE: _____	AMT: 46 m	Ø DESCARGA: _____ in
	SERVIÇO: _____	REND: _____ %	Ø MAX. SÓLIDOS: _____ in
	FLUIDO: _____	BHP: _____ hp	ROTOR: 382.5 mm (14.30")
	DENSIDADE: _____ TEMP: _____ °C	NPSHr: _____ m	ÁREA DE ENTRADA: _____ in ²
	VISCOSIDADE: _____	NPSHd: _____ m	NÚMERO DE PALHETAS: _____
EMISSO POR: <i>[Signature]</i>	CONFERIDO POR: <i>[Signature]</i>	DATA: 19/10/95	WR ² (MOLHADO): _____ lb.in ²

Tolerancias para seleção e teste conforme HYDRAULIC INSTITUTE standards.
 Curva nº. : A-19142
 Grupo 2

MODELO DA BOMBA
 10LR-15

Figura 7.12 – Curva Original da Bomba do Grupo 2 da C.B. “Pulmão”

■ Technical Data

Type	CDL - 1U; CDL - 2U ; CDL - 4U
Inputs:	1, 2 or 4 (interchangeable analogue/pulse)
Memory:	separated memory blocks for day, hour and events CDL - 4U : 512 kB CDL - 2U : 256 kB CDL - 1U : 128 kB
LC-display:	2 x 16 characters, alphanumeric
Protection:	IP 68
Casing:	cast aluminium
Dimensions:	220 x 105 x 70 mm
Weight:	app. 1200 g
Operating temp.:	0 ... 50 °C
Storage temp.:	-10 ... +70 °C
Battery:	6 x Mignon LR 6 (9V) alkaline cells
Battery life time:	1/2 ... 2 years (depending on application)
Battery warning:	at 6.3 V
System clock:	real time (deviation < 10 ⁻⁴ at 10 °C ≤ T ≤ 30 °C)
Output:	V.24 / RS 232 - compatible data interface to connect to the PC. All socket connectors are waterproof IP 68
Alarm contact:	FET open drain, I max 100 mA; U max 50 V
Pulse input	
Input frequencies: (programmable)	standard resolution $f \leq 0.2$ Hz (with internal pre-scaler $f \leq 50$ Hz) high resolution $f \leq 10$ Hz (with internal pre-scaler $f \leq 50$ Hz)
Pulser:	1. mechanical contact: e.g. REED switch Resistance, closed: $R \leq 10$ kOhm ($I < 5 \mu\text{A}$) Resistance, open: $R \geq 4.7$ MOhm 2. Open collector pulser Resistance, closed: $U \leq 0.2$ V ($I < 5 \mu\text{A}$) 3. Pulser with external power source $4\text{V} \leq U_1 \leq 12\text{V}$ / $0\text{V} \leq U_2 \leq 0.2\text{V}$ Cable length: max. 50 m
Analogue Input	
A/D converter:	12 bit, 0 ... 4096 digit
Measuring interval:	0.1 sec. ... 1 day
Unit:	programmable (bar, °C etc...)
Threshold value:	0 ... 4096 digit



H. Meinecke AG
Meineckestrasse
D-30880 Laatzen
Tel. +49 (0)5102 / 74-0
Fax +49 (0)5102 / 74-341
<http://www.meinecke.de>
E-mail: service@meinecke.de

■ Order Example

CDL - 1U	Order No. 04410064
CDL - 2U	Order No. 04410065
CDL - 4U	Order No. 04410063

■ Accessories

Evaluation software CDLWin, Order No. 18 14 26
for CDL Data-Logger

CDL/PC-connection cable, Order No. 11 46 52

Appropriate
CDL-pressure sensors,
CDL-current interfaces,
CDL-temperature interfaces etc.
are available.



Subject to change without notice
800115 / 01.2002



Tabela 7.1 – Dados levantados em campo da C. B. “João Erbolato” em 22/05/2.006

Data	Hora	Vazão Ent. (m ³ /h)	Nível Cx. Sucção (m)	Vazão Rec. (m ³ /h)	Pressão Saída Disp. (m.c.a.)	V RMS (V)	A RMS (A)	RPM	PF (Fator de Pot.)	kVA	kW	BHP Rot. Trab. (HP)	Rendimento Calculado (%)	% Rotação de Trabalho	Consumo (kWh)	Consumo Acumulado (kWh)
22/5/2006	0:00 - 1:00	248,99	3,92	248,56	53,90	460,45	87,64	1453	0,86	69,89	60,38	80,97	56%	82%	60,38	-
22/5/2006	1:00 - 2:00	246,74	3,94	245,31	53,90	460,23	85,03	1453	0,87	67,78	58,86	78,94	57%	82%	58,86	-
22/5/2006	2:00 - 3:00	197,15	3,95	198,38	54,10	460,80	82,49	1453	0,87	65,83	57,16	76,65	47%	82%	57,16	-
22/5/2006	3:00 - 4:00	199,36	3,95	199,53	54,20	461,19	81,56	1453	0,87	65,15	56,65	75,97	48%	82%	56,65	-
22/5/2006	4:00 - 5:00	215,61	3,95	215,04	54,05	460,36	81,48	1453	0,87	64,96	56,55	75,83	52%	82%	56,55	-
22/5/2006	5:00 - 6:00	236,43	3,95	235,53	53,90	461,02	83,13	1453	0,88	66,38	58,35	78,24	55%	82%	58,35	-
22/5/2006	6:00 - 7:00	242,32	3,92	243,22	53,80	462,26	87,16	1453	0,89	69,79	62,10	83,28	53%	82%	62,10	-
22/5/2006	7:00 - 8:00	360,59	3,87	363,48	54,00	460,88	100,89	1465	0,90	80,53	72,80	97,62	68%	82%	72,80	-
22/5/2006	8:00 - 9:00	421,43	3,79	422,79	53,95	459,32	114,58	1491	0,91	91,16	83,10	111,44	69%	84%	87,53	-
22/5/2006	9:00 - 10:00	479,31	3,73	480,31	53,85	460,42	124,82	1513	0,91	99,54	90,75	121,70	72%	85%	86,32	86,32
22/5/2006	10:00 - 11:00	493,22	3,75	491,59	54,30	459,51	125,02	1523	0,91	99,50	90,81	121,78	74%	86%	90,81	177,14
22/5/2006	11:00 - 12:00	475,89	3,76	475,32	54,20	459,27	122,38	1515	0,91	97,35	88,55	118,74	74%	85%	88,55	265,68
22/5/2006	12:00 - 13:00	463,17	3,77	464,00	54,25	457,82	121,06	1507	0,90	95,99	86,47	115,95	74%	85%	86,47	352,15
22/5/2006	13:00 - 14:00	449,33	3,78	447,77	54,00	458,56	118,32	1505	0,90	93,97	84,68	113,55	72%	85%	84,68	436,83
22/5/2006	14:00 - 15:00	441,64	3,78	443,00	54,15	461,66	115,82	1505	0,90	92,61	83,60	112,11	73%	85%	83,60	520,43
22/5/2006	15:00 - 16:00	403,96	3,81	402,67	54,00	458,71	110,24	1489	0,90	87,59	78,98	105,91	70%	84%	78,98	599,40
22/5/2006	16:00 - 17:00	365,96	3,82	364,67	54,10	458,22	107,73	1487	0,90	85,50	76,90	103,12	65%	84%	76,90	642,30
22/5/2006	17:00 - 18:00	315,36	3,83	316,19	53,85	460,48	101,76	1478	0,89	81,16	72,55	97,29	59%	83%	72,55	-
22/5/2006	18:00 - 19:00	217,28	3,87	216,11	53,80	460,26	98,15	1471	0,89	78,24	69,47	93,16	42%	83%	69,47	-
22/5/2006	19:00 - 20:00	388,11	3,87	389,47	54,00	458,80	97,72	1469	0,88	77,65	68,51	91,87	78%	83%	68,51	-
22/5/2006	20:00 - 21:00	380,07	3,90	377,97	54,05	459,69	95,17	1464	0,88	75,77	66,41	89,05	78%	82%	66,41	-
22/5/2006	21:00 - 22:00	262,45	3,90	264,11	54,15	460,32	94,97	1465	0,87	75,72	65,67	88,06	55%	82%	65,67	-
22/5/2006	22:00 - 23:00	295,18	3,90	294,58	53,95	459,82	93,02	1460	0,86	74,09	63,71	85,43	63%	82%	63,71	-
22/5/2006	23:00 - 0:00	281,43	3,92	279,96	53,85	461,45	92,04	1460	0,86	73,56	63,15	84,68	60%	82%	63,15	-

Obs (1) – período comparativo do consumo de energia elétrica

Obs (2) – valores médios por hora

Tabela 7.2 – Dados levantados em campo da C. B. “João Erbolato” em 26/05/2.006

Date	Time	Vazão Ent. (m³/h)	Nível Cx. Sucção (m)	Vazão Rec. (m³/h)	Pressão Saída Disp. (m.c.a.)	Pressão Saída Utiliz. (m.c.a.)	V RMS (V)	A RMS (A)	RPM	PF (Fator de Pot.)	KVA	KW	BHP Rot. Trab. (HP)	Consumo (kWh)	Consumo Acumulado (kWh)
26/5/2006	0:00 - 1:00	335,52	3,89	336,42	54,30	-	461,61	97,54	1462,57	0,88	77,98	68,24	91,52	68,24	-
26/5/2006	1:00 - 2:00	350,39	3,90	349,72	54,15	-	462,21	95,20	1461,92	0,88	76,21	66,82	89,61	66,82	-
26/5/2006	2:00 - 3:00	391,25	3,89	390,28	53,85	-	461,80	93,65	1461,92	0,88	74,90	65,61	87,99	65,61	-
26/5/2006	3:00 - 4:00	382,30	3,93	381,87	53,90	-	462,43	91,71	1461,92	0,88	73,46	64,44	86,41	64,44	-
26/5/2006	4:00 - 5:00	208,72	3,90	210,31	53,70	-	461,50	92,48	1461,92	0,88	73,92	65,17	87,39	65,17	-
26/5/2006	5:00 - 6:00	345,04	3,93	343,74	54,00	-	462,98	91,67	1461,38	0,89	73,50	65,31	87,59	65,31	-
26/5/2006	6:00 - 7:00	373,91	3,88	374,25	53,95	-	462,73	98,23	1461,92	0,90	78,72	70,83	94,98	70,83	-
26/5/2006	7:00 - 8:00	408,01	3,81	411,87	54,00	-	459,72	110,22	1485,18	0,91	87,76	79,66	106,82	79,66	-
26/5/2006	8:00 - 9:00	494,72	3,73	494,98	53,85	-	458,62	125,33	1515,20	0,91	99,55	90,17	120,92	94,89	-
26/5/2006	9:00 - 10:00	587,05	3,65	587,95	61,70	53,89	458,94	166,16	1653,42	0,92	132,09	122,13	163,77	117,40	117,40
26/5/2006	10:00 - 11:00	542,49	3,70	541,26	71,15	53,85	458,06	183,74	1754,27	0,93	145,78	135,56	181,79	135,56	252,97
26/5/2006	11:00 - 12:00	548,01	3,73	547,85	72,35	53,80	458,20	190,48	1777,86	0,93	151,16	140,71	188,70	140,71	393,68
26/5/2006	12:00 - 13:00	533,82	3,75	533,19	72,85	53,90	458,39	188,50	1777,86	0,93	149,66	138,59	185,85	138,59	532,27
26/5/2006	13:00 - 14:00	525,48	3,71	526,01	72,75	54,10	457,70	187,14	1777,86	0,93	148,35	137,61	184,53	137,61	669,87
26/5/2006	14:00 - 15:00	532,82	3,69	533,92	72,65	54,05	458,01	188,16	1777,86	0,93	149,26	138,69	185,99	138,69	808,57
26/5/2006	15:00 - 16:00	514,67	3,71	513,84	73,30	54,20	456,16	185,23	1777,86	0,93	146,35	135,79	182,10	135,79	944,36
26/5/2006	16:00 - 17:00	467,77	3,73	468,33	60,10	54,09	458,47	139,94	1597,58	0,91	111,05	101,66	136,33	101,66	1007,07
26/5/2006	17:00 - 18:00	463,20	3,75	461,23	53,90	-	458,44	118,56	1504,76	0,91	94,14	85,57	114,75	85,57	-
26/5/2006	18:00 - 19:00	449,16	3,76	450,49	54,00	-	460,05	114,68	1504,76	0,90	91,38	82,69	110,89	82,69	-
26/5/2006	19:00 - 20:00	427,41	3,78	425,38	53,85	-	460,70	112,03	1499,40	0,90	89,39	80,54	108,01	80,54	-
26/5/2006	20:00 - 21:00	410,07	3,80	410,01	53,95	-	460,71	109,10	1488,69	0,89	87,06	77,90	104,47	77,90	-
26/5/2006	21:00 - 22:00	382,15	3,81	381,62	53,95	-	459,88	107,15	1486,19	0,89	85,35	75,76	101,60	75,76	-
26/5/2006	22:00 - 23:00	417,48	3,86	418,55	54,05	-	458,86	104,29	1477,98	0,88	82,88	72,86	97,70	72,86	-
26/5/2006	23:00 - 0:00	271,03	3,87	268,80	53,85	-	460,43	101,97	1477,98	0,88	81,32	71,89	96,40	71,89	-

Obs (1) – período comparativo do consumo de energia elétrica

Obs (2) – valores médios por hora

Tabela 7.3 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 01/06/2.006

Data	Hora	Vazão (m³/h)	Pressão Rec. Gr. 1 (m.c.a.)	V RMS (V)	A RMS (A)	RPM	PF (Fator de Potência)	kVA	kW	BHP Rot. Trab. (HP)	Rendimento Calculado (%)	% Rotação de Trabalho	Consumo (kWh)	Consumo Acumulado (kWh)
1/6/2006	0:00 - 1:00	394,45	5,05	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
1/6/2006	1:00 - 2:00	354,30	5,95	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
1/6/2006	2:00 - 3:00	327,40	5,35	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
1/6/2006	3:00 - 4:00	313,50	5,85	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
1/6/2006	4:00 - 5:00	319,35	6,85	43,10	9,80	58	0,06	7,31	4,68	6,27	21%	27%	4,68	4,68
1/6/2006	5:00 - 6:00	434,80	17,55	431,47	37,41	846	0,71	27,96	19,98	26,80	74%	47%	19,98	24,66
1/6/2006	6:00 - 7:00	562,10	19,00	433,03	49,60	949	0,73	37,21	27,31	36,62	79%	53%	27,31	51,97
1/6/2006	7:00 - 8:00	749,30	22,95	429,55	80,40	1.147	0,80	59,78	48,72	65,34	80%	64%	48,72	100,69
1/6/2006	8:00 - 9:00	922,55	27,40	431,57	118,18	1.352	0,87	88,34	76,49	102,58	75%	76%	76,49	177,18
1/6/2006	9:00 - 10:00	1.037,20	28,75	428,59	145,94	1.457	0,89	108,32	96,42	129,30	72%	82%	96,42	273,60
1/6/2006	10:00 - 11:00	1.070,00	29,25	429,02	155,50	1.492	0,89	115,55	103,36	138,60	71%	84%	103,36	376,96
1/6/2006	11:00 - 12:00	1.061,65	30,45	430,15	162,08	1.513	0,90	120,75	108,35	145,30	71%	85%	108,35	485,31
1/6/2006	12:00 - 13:00	1.036,00	30,05	430,11	155,70	1.491	0,89	115,99	103,74	139,12	71%	84%	103,74	589,06
1/6/2006	13:00 - 14:00	1.000,50	28,20	428,59	142,93	1.446	0,88	106,10	93,63	125,57	71%	81%	93,63	682,69
1/6/2006	14:00 - 15:00	995,40	28,30	429,26	141,97	1.445	0,89	105,55	93,87	125,88	73%	81%	93,87	776,56
1/6/2006	15:00 - 16:00	934,00	28,50	430,78	131,68	1.404	0,88	98,25	86,40	115,86	74%	79%	86,40	862,96
1/6/2006	16:00 - 17:00	838,20	26,70	430,87	110,20	1.309	0,85	82,24	70,46	94,48	74%	73%	70,46	933,41
1/6/2006	17:00 - 18:00	766,55	25,70	430,35	92,62	1.223	0,83	69,04	57,06	76,52	77%	69%	57,06	990,47
1/6/2006	18:00 - 19:00	754,60	24,90	429,62	87,18	1.193	0,82	64,87	53,18	71,32	77%	67%	53,18	1.043,65
1/6/2006	19:00 - 20:00	744,35	24,85	430,97	87,15	1.192	0,82	65,06	53,34	71,54	77%	67%	53,34	1.097,00
1/6/2006	20:00 - 21:00	694,35	24,15	431,72	82,04	1.163	0,79	61,35	48,68	65,28	78%	65%	48,68	1.145,68
1/6/2006	21:00 - 22:00	634,10	22,45	432,56	72,36	1.104	0,77	54,20	41,73	55,96	77%	62%	41,73	1.187,41
1/6/2006	22:00 - 23:00	544,15	15,25	324,13	48,08	751	0,56	35,99	26,69	35,79	67%	56%	26,69	1.214,09
1/6/2006	23:00 - 0:00	477,85	4,05	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

Obs (1) – período comparativo do consumo de energia elétrica

Obs (2) – valores médios por hora

Tabela 7.4 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 02/06/2.006

Data	Hora	Vazão (m³/h)	Pressão Rec. Gr. 2 (m.c.a.)	V RMS (V)	A RMS (A)	RPM	PF (Fator de Potência)	KVA	KW	BHP Rot. Trab. (HP)	Rendimento Calculado (%)	% Rotação de Trabalho	Consumo (kWh)	Consumo Acumulado (kWh)
2/6/2006	0:00 - 1:00	467,60	4,00	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
2/6/2006	1:00 - 2:00	425,70	4,50	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
2/6/2006	2:00 - 3:00	416,50	5,00	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
2/6/2006	3:00 - 4:00	318,15	5,00	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
2/6/2006	4:00 - 5:00	321,63	6,19	54,19	4,36	120	0,08	3,27	2,00	2,68	53%	40%	1,60	1,60
2/6/2006	5:00 - 6:00	387,90	16,30	432,79	32,97	806	0,69	24,72	17,14	22,99	64%	45%	17,14	18,74
2/6/2006	6:00 - 7:00	573,40	19,60	433,68	54,18	977	0,74	40,70	30,15	40,43	71%	55%	30,15	48,89
2/6/2006	7:00 - 8:00	797,65	24,75	428,79	95,60	1.209	0,84	71,00	59,72	80,09	69%	68%	59,72	108,61
2/6/2006	8:00 - 9:00	950,85	28,20	428,96	130,32	1.365	0,88	96,84	85,58	114,77	67%	76%	85,58	194,19
2/6/2006	9:00 - 10:00	1.041,75	29,90	427,44	157,56	1.459	0,90	116,64	105,03	140,85	66%	82%	105,03	299,22
2/6/2006	10:00 - 11:00	1.047,45	30,45	425,83	165,03	1.477	0,90	121,72	110,11	147,66	66%	83%	110,11	409,33
2/6/2006	11:00 - 12:00	966,85	28,05	428,09	138,31	1.389	0,89	102,55	91,29	122,43	68%	78%	91,29	500,63
2/6/2006	12:00 - 13:00	944,20	27,75	431,20	135,71	1.380	0,88	101,35	89,62	120,18	68%	77%	89,62	590,24
2/6/2006	13:00 - 14:00	919,30	27,20	428,23	129,11	1.353	0,88	95,77	84,13	112,82	69%	76%	84,13	674,37
2/6/2006	14:00 - 15:00	945,55	25,50	427,14	130,84	1.358	0,88	96,80	85,40	114,52	67%	76%	85,40	759,77
2/6/2006	15:00 - 16:00	967,60	26,50	429,02	138,85	1.390	0,89	103,18	91,58	122,81	65%	78%	91,58	851,35
2/6/2006	16:00 - 17:00	941,25	27,00	431,13	133,10	1.370	0,88	99,39	87,78	117,71	67%	77%	87,78	939,12
2/6/2006	17:00 - 18:00	929,20	26,70	428,37	130,18	1.355	0,88	96,58	85,16	114,20	67%	76%	85,16	1.024,28
2/6/2006	18:00 - 19:00	875,45	25,15	429,54	115,67	1.297	0,87	86,05	74,83	100,35	67%	73%	74,83	1.099,11
2/6/2006	19:00 - 20:00	828,75	25,30	430,19	107,31	1.264	0,86	79,95	68,82	92,29	70%	71%	68,82	1.167,93
2/6/2006	20:00 - 21:00	781,10	24,80	431,87	98,09	1.221	0,84	73,37	61,76	82,82	71%	68%	61,76	1.229,69
2/6/2006	21:00 - 22:00	672,40	21,70	432,19	74,70	1.082	0,79	55,89	44,18	59,25	70%	61%	44,18	1.273,87
2/6/2006	22:00 - 23:00	589,05	19,55	411,92	61,39	919	0,71	46,10	34,63	46,44	66%	54%	34,63	1.308,50
2/6/2006	23:00 - 0:00	489,35	5,00	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-

Obs (1) – período comparativo do consumo de energia elétrica

Obs (2) – valores médios por hora

Tabela 7.5 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 08/06/2.006

Data	Hora	Vazão (m³/h)	Pressão Rec. Gr. 2 (m.c.a.)	Pressão Utilizada (m.c.a.)	V RMS (V)	A RMS (A)	RPM	PF	KVA	KW	BHP Rot. Trab. (HP)	% Rotação de Trabalho	Consumo (kWh)	Consumo Acumulado (kWh)
8/6/2006	0:00 - 1:00	399,10	4,70	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
8/6/2006	1:00 - 2:00	316,95	4,00	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
8/6/2006	2:00 - 3:00	318,40	4,70	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
8/6/2006	3:00 - 4:00	307,60	5,00	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
8/6/2006	4:00 - 5:00	304,90	12,35	5,00	43,21	10,73	234	0,08	8,01	6,70	8,99	98%	6,70	6,70
8/6/2006	5:00 - 6:00	379,05	70,75	14,80	426,67	192,89	1.789	0,89	142,54	127,45	170,91	100%	127,45	134,15
8/6/2006	6:00 - 7:00	504,35	68,05	18,35	425,61	210,19	1.789	0,90	154,93	140,12	187,91	100%	140,12	274,27
8/6/2006	7:00 - 8:00	769,35	62,45	23,55	425,16	250,17	1.789	0,92	184,20	169,02	226,66	100%	169,02	443,29
8/6/2006	8:00 - 9:00	897,35	58,85	25,35	422,55	264,93	1.789	0,93	193,90	179,43	240,62	100%	179,43	622,72
8/6/2006	9:00 - 10:00	1.010,65	54,95	28,45	422,22	276,07	1.790	0,93	201,89	187,32	251,20	100%	187,32	810,04
8/6/2006	10:00 - 11:00	1.053,80	52,75	29,75	422,85	278,34	1.790	0,93	203,86	189,18	253,69	100%	189,18	999,22
8/6/2006	11:00 - 12:00	981,15	56,10	31,10	425,82	271,57	1.791	0,93	200,29	185,28	248,47	100%	185,28	1.184,50
8/6/2006	12:00 - 13:00	954,70	56,75	29,80	424,85	270,04	1.791	0,92	198,71	183,22	245,70	100%	183,22	1.367,72
8/6/2006	13:00 - 14:00	943,05	56,45	28,30	423,69	269,55	1.791	0,93	197,81	183,37	245,90	100%	183,37	1.551,09
8/6/2006	14:00 - 15:00	981,40	55,30	28,80	425,58	270,82	1.791	0,93	199,63	184,67	247,65	100%	184,67	1.735,76
8/6/2006	15:00 - 16:00	1.025,85	52,95	28,80	426,65	274,28	1.791	0,93	202,68	187,58	251,56	100%	187,58	1.923,35
8/6/2006	16:00 - 17:00	947,95	56,30	27,60	426,32	267,92	1.791	0,93	197,83	183,19	245,66	100%	183,19	2.106,54
8/6/2006	17:00 - 18:00	872,20	59,30	26,65	424,51	263,41	1.791	0,92	193,67	178,69	239,63	100%	178,69	2.285,22
8/6/2006	18:00 - 19:00	792,65	61,80	22,75	426,70	253,94	1.791	0,92	187,68	172,04	230,70	100%	172,04	2.457,26
8/6/2006	19:00 - 20:00	770,90	61,75	22,90	425,23	251,78	1.791	0,92	185,44	169,69	227,56	100%	169,69	2.626,96
8/6/2006	20:00 - 21:00	745,30	62,10	23,25	425,36	248,05	1.791	0,91	182,75	166,97	223,92	100%	166,97	2.793,93
8/6/2006	21:00 - 22:00	615,00	64,25	21,80	427,50	227,05	1.790	0,91	168,12	153,72	206,14	100%	153,72	2.947,65
8/6/2006	22:00 - 23:00	587,35	64,55	18,65	427,41	224,19	1.778	0,91	165,97	151,12	202,66	100%	151,12	3.098,77
8/6/2006	23:00 - 0:00	465,10	4,15	4,00	21,44	7,92	35	0,04	5,88	5,25	7,04	27%	5,25	3.104,02

Obs (1) – período comparativo do consumo de energia elétrica

Obs (2) – valores médios por hora

Tabela 7.6 – Dados levantados em campo da C. B. “Pulmão” em 09/06/2.006

Data	Hora	Vazão (m³/h)	Pressão Rec. Gr. 1 (m.c.a.)	Pressão Utilizada (m.c.a.)	V RMS (V)	A RMS (A)	RPM	PF	kVA	kW	BHP Rot. Trab. (HP)	% Rotação de Trabalho	Consumo (kWh)	Consumo Acumulado (kWh)
9/6/2006	0:00 - 1:00	407,75	4,10	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
9/6/2006	1:00 - 2:00	324,95	5,00	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
9/6/2006	2:00 - 3:00	332,05	5,75	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
9/6/2006	3:00 - 4:00	303,85	5,05	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-
9/6/2006	4:00 - 5:00	299,35	11,50	5,50	43,22	14,06	193	0,07	10,51	7,44	9,98	90%	7,44	7,44
9/6/2006	5:00 - 6:00	369,75	68,35	15,50	427,07	189,81	1.789	0,89	140,40	125,36	168,11	100%	125,36	132,80
9/6/2006	6:00 - 7:00	562,65	64,55	19,95	426,76	210,04	1.789	0,91	155,26	140,78	188,78	100%	140,78	273,58
9/6/2006	7:00 - 8:00	768,40	60,15	20,70	424,59	234,73	1.789	0,92	172,61	158,77	212,91	100%	158,77	432,35
9/6/2006	8:00 - 9:00	955,20	55,60	26,90	422,43	252,13	1.789	0,93	184,48	170,77	229,01	100%	170,77	603,12
9/6/2006	9:00 - 10:00	1.094,80	49,50	29,60	422,26	263,01	1.790	0,93	192,36	178,22	239,00	100%	178,22	781,34
9/6/2006	10:00 - 11:00	1.140,00	46,90	30,05	422,48	265,67	1.790	0,93	194,41	180,14	241,57	100%	180,14	961,48
9/6/2006	11:00 - 12:00	1.107,00	48,45	29,70	426,11	261,28	1.791	0,92	192,83	178,22	238,99	100%	178,22	1.139,70
9/6/2006	12:00 - 13:00	1.046,35	50,25	31,10	424,52	259,09	1.791	0,93	190,50	176,35	236,49	100%	176,35	1.316,04
9/6/2006	13:00 - 14:00	1.016,80	51,10	30,00	421,89	259,91	1.791	0,93	189,93	175,80	235,75	100%	175,80	1.491,84
9/6/2006	14:00 - 15:00	995,65	51,45	28,40	423,04	257,95	1.791	0,92	189,01	174,67	234,23	100%	174,67	1.666,50
9/6/2006	15:00 - 16:00	991,00	51,85	29,75	424,75	255,82	1.791	0,93	188,20	174,10	233,48	100%	174,10	1.840,61
9/6/2006	16:00 - 17:00	970,20	52,85	28,25	426,51	253,67	1.791	0,92	187,40	173,11	232,15	100%	173,11	2.013,72
9/6/2006	17:00 - 18:00	899,80	54,85	26,65	425,13	250,53	1.791	0,92	184,47	169,78	227,68	100%	169,78	2.183,50
9/6/2006	18:00 - 19:00	742,05	60,30	25,80	427,63	232,20	1.791	0,92	171,98	157,47	211,17	100%	157,47	2.340,96
9/6/2006	19:00 - 20:00	719,70	61,00	25,50	425,64	230,54	1.791	0,92	169,96	156,30	209,60	100%	156,30	2.497,26
9/6/2006	20:00 - 21:00	677,00	61,75	24,90	426,25	226,77	1.790	0,92	167,42	153,50	205,84	100%	153,50	2.650,76
9/6/2006	21:00 - 22:00	649,05	62,35	21,20	426,73	223,04	1.790	0,91	164,85	150,57	201,91	100%	150,57	2.801,33
9/6/2006	22:00 - 23:00	599,85	57,60	19,26	405,76	206,29	1.636	0,86	152,61	138,88	186,24	96%	138,88	2.940,21
9/6/2006	23:00 - 0:00	519,10	6,00	-	0,00	0,00	11	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-

Obs (1) – período comparativo do consumo de energia elétrica

Obs (2) – valores médios por hora

Casa de Bombas San Conrado - Grupo 2 - Curva da Bomba para Rotações Variadas (07/03/2.001)

181

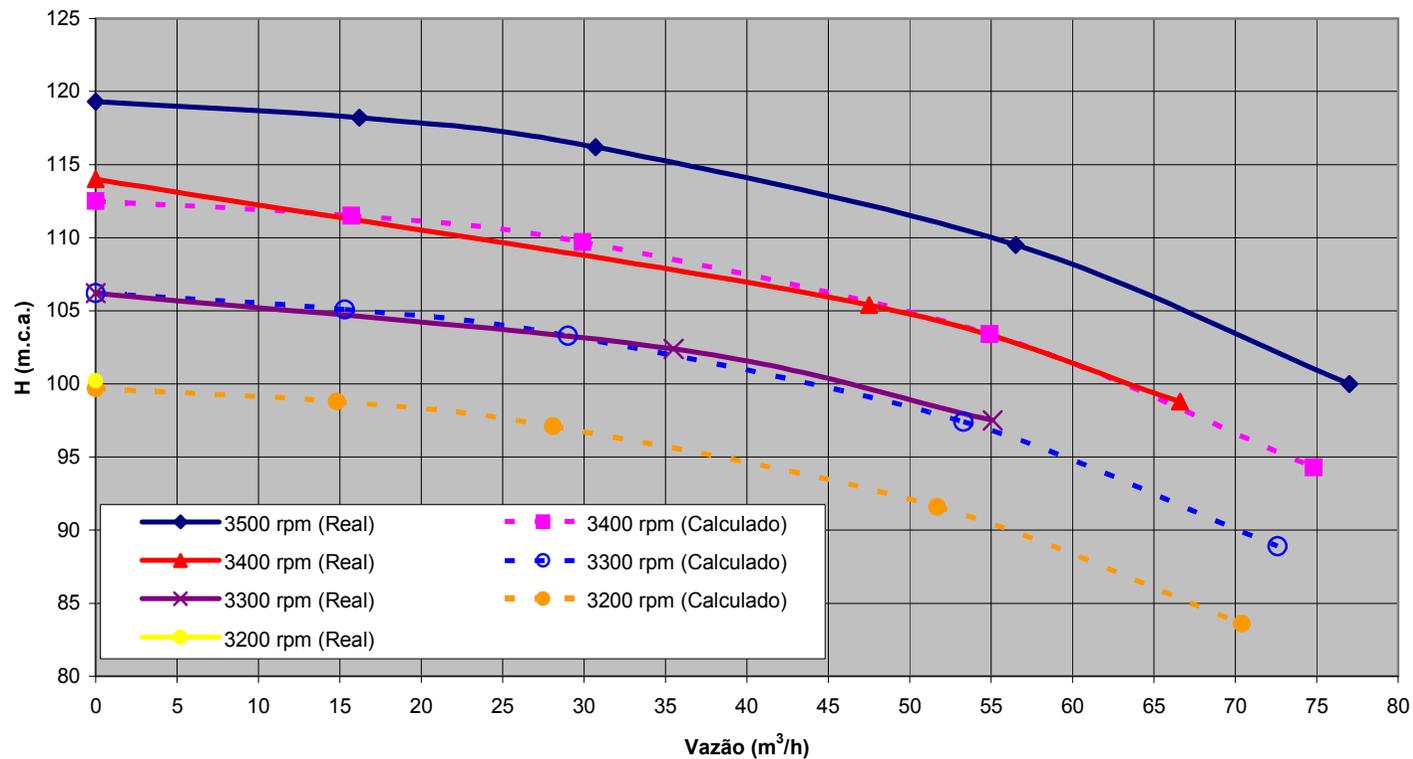


Figura 7.14 – Curva da Bomba da C.B. “San Conrado” para Diferentes Rotações (Medida e Calculada)

Casa de Bombas San Conrado - Grupo 2 - Potência Consumida pela Bomba para Rotações Variadas (07/03/2.001)

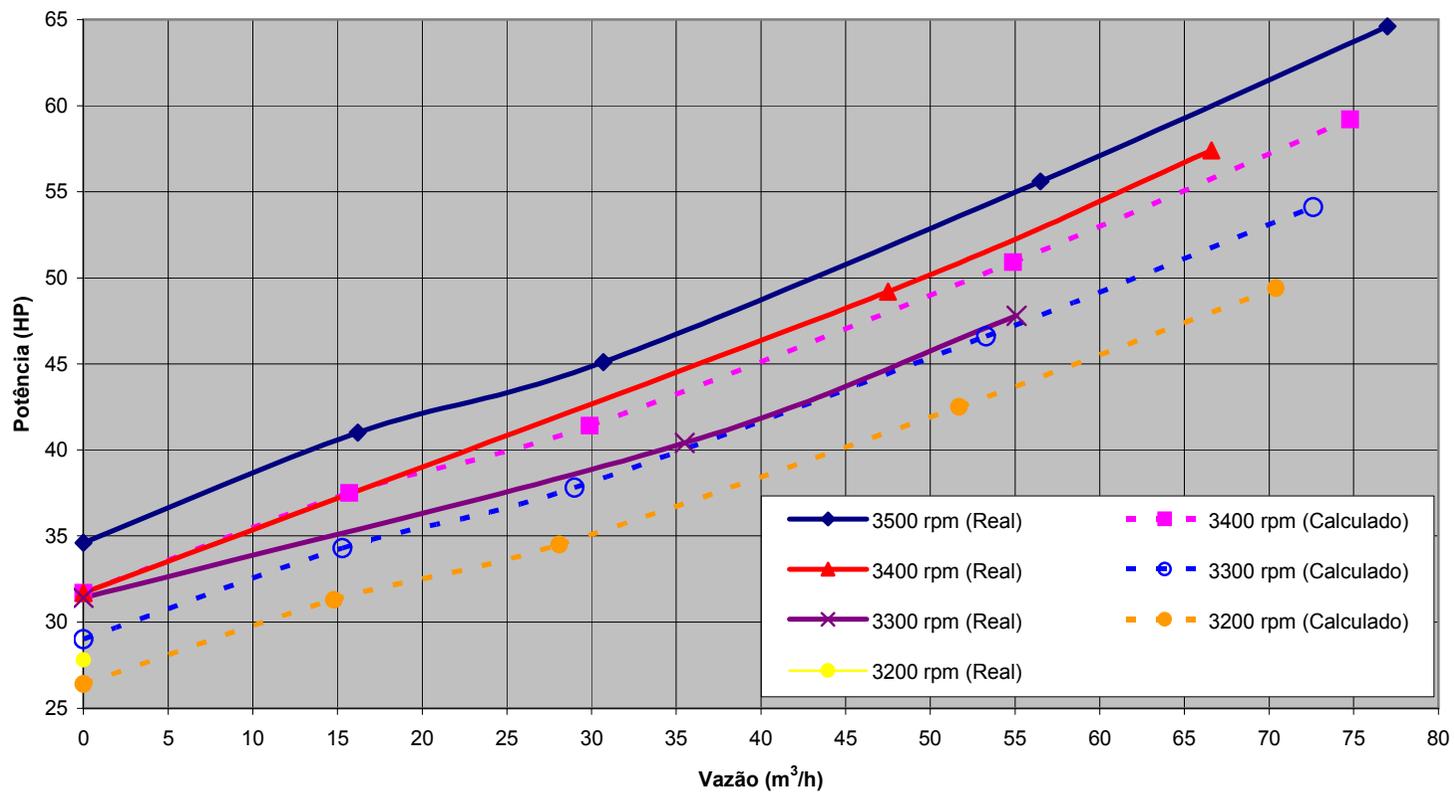


Figura 7.15 – Potência Fornecida pelo Motor Elétrico à Bomba da C.B. “San Conrado” para Diferentes Rotações (Medida e Calculada)

7.1 – ARQUIVOS DE DADOS DE ENTRADA DO EPANET

7.1.1 – MODELO SEM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

[TITLE]

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
2	727.97	0	;
3	727.97	0	;
4	706.156	0	;
5	671.346	0	;
6	675.09	0	;
7	700	0	;
8	701.38	55.20	P
9	727.306	95.42	P
10	711.138	18.27	P
12	706.156	22.87	P
13	671.346	4.36	P
11	727.97	0	;

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
1	733.7	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol
-----	-----------	-----------	----------	----------	----------	--------

[PIPES]

;ID	Status	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss
2		11	4	2060	500	0.05	0
3		4	5	1158	500	0.05	0
4		6	8	203.9	500	0.05	600
5		5	6	506.8	500	0.05	0
6		6	7	282.9	500	1	0
7		7	9	1044	400	0.05	0
8		7	10	798.7	500	3	2200
9		2	3	2	500	0.01	80
10		1	2	2	500	0.01	0
12		4	12	2	500	1	100
13		5	13	2	500	1	0

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
1	2	3	HEAD 1 PATTERN Inversor ;

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
11	3	11	12	PRV	25	0

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

```

;ID          Status/Setting

[PATTERNS]
;ID          Multipliers
;
HS1          1          1          1          1          1          1
HS1          1          1          1          1          1          1
HS1          1          1          1          1          1          1.65
HS1          1.65      1.65      1.65      1          1          1
;Curva de modulação P
P            0.54      0.50      0.48      0.46      0.48      0.70
P            0.87      1.12      1.31      1.38      1.43      1.43
P            1.39      1.36      1.33      1.30      1.14      1.07
P            1.06      1.07      1.02      0.97      0.83      0.64
;Operação da bomba em rotação nominal
Inversor    0          0          0          0          0          1
Inversor    1          1          1          1          1          1
Inversor    1          1          1          1          1          1
Inversor    1          1          1          1          1          0

[CURVES]
;ID          X-Value          Y-Value
;PUMP: Curva da bomba - Grupo I
1            0          60
1            244.44      54
1            277.78      49
;EFFICIENCY:
R1           0          0
R1           166.7      86
R1           222.2      90
R1           305.6      75

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]
Global Efficiency 75
Global Price      0.137164
Global Pattern    HS1
Demand Charge     0
Pump 1           Efficiency R1
Pump 1           Price      0.137164
Pump 1           Pattern    HS1

[EMITTERS]
;Junction      Coefficient

[QUALITY]
;Node          InitQual

[SOURCES]
;Node          Type          Quality          Pattern

[REACTIONS]
;Type          Pipe/Tank          Coefficient

[REACTIONS]
Order Bulk      1
Order Wall      1
Global Bulk     0
Global Wall     0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

[MIXING]
;Tank          Model

[TIMES]
Duration        24:00

```

Hydraulic Timestep 1:00
 Quality Timestep 0:05
 Pattern Timestep 1:00
 Pattern Start 0:00
 Report Timestep 1:00
 Report Start 0:00
 Start ClockTime 12 am
 Statistic NONE

[REPORT]
 Status No
 Summary No
 Page 0

[OPTIONS]
 Units LPS
 Headloss D-W
 Specific Gravity 1
 Viscosity 1
 Trials 40
 Accuracy 0.001
 Unbalanced Continue 10
 Pattern A
 Demand Multiplier 1.0
 Emitter Exponent 0.5
 Quality None mg/L
 Diffusivity 1
 Tolerance 0.01

[COORDINATES]
 ;Node X-Coord Y-Coord
 2 -576.61 6721.58
 3 230.64 6721.58
 4 2108.73 6754.53
 5 3937.40 6721.58
 6 5354.20 6721.58
 7 5354.20 7710.05
 8 6289.52 5956.74
 9 5357.74 8668.88
 10 6439.27 7703.83
 12 2113.14 6073.21
 13 3943.43 6056.57
 11 831.41 6743.65
 1 -1004.94 6754.53

[VERTICES]
 ;Link X-Coord Y-Coord
 4 6309.72 5947.28
 9 -572.84 6149.48
 9 234.40 6149.48

[LABELS]
 ;X-Coord Y-Coord Label & Anchor Node
 2108.73 7182.87 "A" 4
 3855.02 7199.34 "B" 5
 5172.98 6655.68 "I"
 6293.25 6359.14 "D"
 6738.06 8088.96 "F"
 5074.14 7957.17 "E"
 4431.63 9423.39 "Parapanema"
 -1478.06 4110.85 "Operação sem inversor num dia típico de operação da adutora LESTE (rotação nominal)"
 1247.11 3579.68 "Grupo em operação: GRUPO 1"

[BACKDROP]
 DIMENSIONS 0.00 0.00 10000.00 10000.00
 UNITS None
 FILE
 OFFSET 0.00 0.00

[END]

7.1.2 – MODELO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

[TITLE]

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
2	727.97	0	;
3	727.97	0	;
4	706.156	0	;
5	671.346	0	;
6	675.09	0	;
7	700	0	;
8	701.38	55.20	P
9	727.306	95.42	P
10	711.138	18.27	P
12	706.156	22.87	P
13	671.346	4.36	P

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
1	733.7	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol
-----	-----------	-----------	----------	----------	----------	--------

[PIPES]

;ID	Status	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss
2		3	4	2060	500	0.05	0
3		4	5	1158	500	0.05	0
4		6	8	203.9	500	0.05	600
5		5	6	506.8	500	0.05	0
6		6	7	282.9	500	1	0
7		7	9	1044	400	0.05	0
8		7	10		798.7	500	3
9		2	3	2	500	0.01	80
10		1	2	2	500	0.01	0
12		4	12	2	500	1	100
13		5	13	2	500	1	0

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
1	2	3	HEAD 1 PATTERN Inversor

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers					
;						
HS1	1	1	1	1	1	1
HS1	1	1	1	1	1	1
HS1	1	1	1	1	1	1.65
HS1	1.65	1.65	1.65	1	1	1

```

;Curva de modulação P
P      0.54    0.50    0.48    0.46    0.48    0.70
P      0.87    1.12    1.31    1.38    1.43    1.43
P      1.39    1.36    1.33    1.30    1.14    1.07
P      1.06    1.07    1.02    0.97    0.83    0.64
;Curva de rotação variável
Inversor 0      0      0      0      0      0.477
Inversor 0.535 0.646 0.761 0.821 0.840 0.852
Inversor 0.840 0.814 0.814 0.791 0.737 0.689
Inversor 0.672 0.672 0.655 0.622 0.562 0

```

[CURVES]

```

;ID      X-Value      Y-Value
;PUMP: Curva da bomba - Grupo I
1        0          60
1        244.44    54
1        277.78    49

```

;EFFICIENCY:

```

R1       0          0
R1       166.7      86
R1       222.2      90
R1       305.6      75

```

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

```

Global Efficiency 75
Global Price      0.137164
Global Pattern    HS1
Demand Charge     0
Pump 1           Efficiency R1
Pump 1           Price      0.137164
Pump 1           Pattern    HS1

```

[EMITTERS]

```

;Junction      Coefficient

```

[QUALITY]

```

;Node          InitQual

```

[SOURCES]

```

;Node          Type      Quality  Pattern

```

[REACTIONS]

```

;Type      Pipe/Tank      Coefficient

```

[REACTIONS]

```

Order Bulk      1
Order Wall      1
Global Bulk     0
Global Wall     0
Limiting Potential 0
Roughness Correlation 0

```

[MIXING]

```

;Tank          Model

```

[TIMES]

```

Duration        24:00
Hydraulic Timestep 1:00
Quality Timestep 0:05
Pattern Timestep 1:00
Pattern Start   0:00
Report Timestep 1:00
Report Start    0:00
Start ClockTime 12 am
Statistic       NONE

```

[REPORT]

Status No
 Summary No
 Page 0

[OPTIONS]

Units LPS
 Headloss D-W
 Specific Gravity 1
 Viscosity 1
 Trials 40
 Accuracy 0.001
 Unbalanced Continue 10
 Pattern A
 Demand Multiplier 1.0
 Emitter Exponent 0.5
 Quality None mg/L
 Diffusivity 1
 Tolerance 0.01

[COORDINATES]

Node	X-Coord	Y-Coord
2	-576.61	6721.58
3	230.64	6721.58
4	2108.73	6754.53
5	3937.40	6721.58
6	5354.20	6721.58
7	5354.20	7710.05
8	6289.52	5956.74
9	5357.74	8668.88
10	6439.27	7703.83
12	2113.14	6073.21
13	3943.43	6056.57
1	-1004.94	6754.53

[VERTICES]

Link	X-Coord	Y-Coord
4	6309.72	5947.28
9	-572.84	6149.48
9	234.40	6149.48

[LABELS]

X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
2108.73	7182.87	"A" 4
3855.02	7199.34	"B" 5
5172.98	6655.68	"I"
6293.25	6359.14	"D"
6738.06	8088.96	"F"
5074.14	7957.17	"E"
4431.63	9423.39	"Parapanema"
-92.38	4018.48	"Operação do inversor num dia típico de operação da adutora LESTE"
2101.62	3487.30	"Grupo em operação: GRUPO 1"

[BACKDROP]

DIMENSIONS	0.00	0.00	10000.00	10000.00
UNITS	None			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

[END]

7.1.3 – MODELO COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA OTIMIZADO

[TITLE]

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
2	727.97	0	;
3	727.97	0	;
4	706.156	0	;
5	671.346	0	;
6	675.09	0	;
7	700	0	;
8	701.38	55.20	P
9	727.306	95.42	P
10	711.138	18.27	P
12	706.156	22.87	P
13	671.346	4.36	P

[RESERVOIRS]

;ID	Head	Pattern
1	733.7	;

[TANKS]

;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol
-----	-----------	-----------	----------	----------	----------	--------

[PIPES]

;ID	Status	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss
2		3	4	2060	500	0.05	0
3		4	5	1158	500	0.05	0
4		6	8	203.9	500	0.05	600
5		5	6	506.8	500	0.05	0
6		6	7	282.9	500	1	0
7		7	9	1044	400	0.05	0
8		7	10	798.7	500	3	2200
9		2	3	2	500	0.01	80
10		1	2	2	500	0.01	0
12		4	12	2	500	1	100
13		5	13	2	500	1	0

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters
1	2	3	HEAD 1 PATTERN Inversor

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
-----	----------------

[PATTERNS]

;ID	Multipliers
HS1	1 1 1 1 1 1
HS1	1 1 1 1 1 1

HS1	1	1	1	1	1	1.65
HS1	1.65	1.65	1.65	1	1	1
;Curva de modulação P						
P	0.54	0.50	0.48	0.46	0.48	0.70
P	0.87	1.12	1.31	1.38	1.43	1.43
P	1.39	1.36	1.33	1.30	1.14	1.07
P	1.06	1.07	1.02	0.97	0.83	0.64
;Curva de rotação variável						
Inversor	0	0	0	0	0	0.426
Inversor	0.508	0.634	0.732	0.768	0.794	0.794
Inversor	0.773	0.758	0.742	0.727	0.644	0.609
Inversor	0.604	0.609	0.583	0.558	0.489	0

[CURVES]

;ID	X-Value	Y-Value
;PUMP: Curva da bomba - Grupo I		
1	0	60
1	244.44	54
1	277.78	49
;EFFICIENCY:		
R1	0	0
R1	166.7	86
R1	222.2	90
R1	305.6	75

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency	75
Global Price	0.137164
Global Pattern	HS1
Demand Charge	0
Pump 1	Efficiency R1
Pump 1	Price 0.137164
Pump 1	Pattern HS1

[EMITTERS]

;Junction	Coefficient
-----------	-------------

[QUALITY]

;Node	InitQual
-------	----------

[SOURCES]

;Node	Type	Quality	Pattern
-------	------	---------	---------

[REACTIONS]

;Type	Pipe/Tank	Coefficient
-------	-----------	-------------

[REACTIONS]

Order Bulk	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

[MIXING]

;Tank	Model
-------	-------

[TIMES]

Duration	24:00
Hydraulic Timestep	1:00
Quality Timestep	0:05
Pattern Timestep	1:00
Pattern Start	0:00
Report Timestep	1:00
Report Start	0:00

Start ClockTime 12 am
Statistic NONE

[REPORT]

Status No
Summary No
Page 0

[OPTIONS]

Units LPS
Headloss D-W
Specific Gravity 1
Viscosity 1
Trials 40
Accuracy 0.001
Unbalanced Continue 10
Pattern A
Demand Multiplier 1.0
Emitter Exponent 0.5
Quality None mg/L
Diffusivity 1
Tolerance 0.01

[COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
2	-576.61	6721.58
3	230.64	6721.58
4	2108.73	6754.53
5	3937.40	6721.58
6	5354.20	6721.58
7	5354.20	7710.05
8	6289.52	5956.74
9	5357.74	8668.88
10	6439.27	7703.83
12	2113.14	6073.21
13	3943.43	6056.57
1	-1004.94	6754.53

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
4	6309.72	5947.28
9	-572.84	6149.48
9	234.40	6149.48

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
2108.73	7182.87	"A" 4
3855.02	7199.34	"B" 5
5172.98	6655.68	"I"
6293.25	6359.14	"D"
6738.06	8088.96	"F"
5074.14	7957.17	"E"
4431.63	9423.39	"Parapanema"
-92.38	4018.48	"Operação otimizada do inversor num dia típico de operação da adutora LESTE"
2101.62	3487.30	"Grupo em operação: GRUPO 1"

[BACKDROP]

DIMENSIONS	0.00	0.00	10000.00	10000.00
UNITS	None			
FILE				
OFFSET	0.00	0.00		

[END]

7.2 – PROGRAMA DE “AUDITORIA ENERGÉTICA – AUDITA”

Este anexo descreve de maneira sucinta a estrutura e as funções do programa de computador denominado “Audita”. O programa foi desenvolvido durante o trabalho de investigação, ora apresentado, como auxiliar nas análises referentes ao consumo de energia elétrica de instalações de bombeamento dotadas de inversores de frequência. Tal desenvolvimento surgiu da necessidade de ampliar o relatório de análise energética disponibilizado pelo programa EPANET¹, uma vez que se desejava um acompanhamento período a período do consumo energético e demais parâmetros associados (o programa original, destinado a análises hidráulicas e de qualidade de água de sistemas de abastecimento de água, só apresenta uma análise global para cada cenário).

O desenvolvimento do programa “Audita” se deu em ambiente operacional Windows, com base no compilador DELPHI 6.0, fazendo chamadas à biblioteca dinâmica do EPANET (EPANET2.dll) através da incorporação da unidade, “epanet2.pas”. Esta biblioteca dinâmica que permite desenvolvimentos paralelos empregando o EPANET é conhecida como EPANET Toolkit.

7.2.1 – ESTRUTURA E FUNÇÕES DO PROGRAMA

O programa “Audita” emprega um arquivo de dados de entrada contendo todos os dados necessários para uma simulação hidráulica em período extensivo de uma instalação com bomba

¹ EPANET e seu “Programmer's Toolkit” foram desenvolvidos pela Water Supply e Water Resource Division da U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory.

de rotação variável através do programa EPANET. Este arquivo é obtido exportando os dados de entrada do EPANET, através da opção “EXPORT -> Rede”. O arquivo exportado com extensão INP é lido pelo programa “Audita”.

Para proceder a simulação em período extensivo, retendo as informações desejadas passo a passo, são empregadas as funções do Toolkit, a saber; *ENopenH* - *ENinitH* - *ENnextH* - *ENcloseH*, com funcionalidades e relacionamentos descritos no fluxograma a seguir apresentado.

7.2.2 – FLUXOGRAMA PRINCIPAL DO PROGRAMA

Passo 1: define as variáveis (inteiros)

```
    i      "contador"  
    Nperiod "numero de períodos de simulação"
```

Passo 2: Abre o Toolkit para simulação hidráulica

```
    ENopenH()
```

Passo 3: Estabelece laço de simulações período à período

```
    Faça i vaiar de 1 a Nperiod
```

Passo 3.1: Modifica, se necessário, os parâmetros para simulação i
 Parâmetros(i) (rotina própria em Delphi)

Passo 3.2: Inicializa a simulação hidráulica
 ENinitH(0)

Passo 3.3: Simula o período i
 ENrunH()

Passo 3.4: Obtém resultados do período i
 Valores(i) (rotina própria em Delphi)

Passo 3.5: Cálculos de interesse com valores obtidos i
 Processa_Valores(i) (rotina própria em Delphi)

Passo 3.6: Emite relatório desejado
 Relata(i) (rotina própria em Delphi)

Passo 4: Fecha o módulo de simulação hidráulica do ToolKit

```
    ENcloseH()
```

Na interface construída para o programa “Audita” é possível visualizar os dados lidos do arquivo de entrada e visualizar o relatório de controle de simulação para cada período “i”, gerado pelo Toolkit, para verificar se a simulação foi bem sucedida. Como dados de entrada para interface criada estabeleceu-se; a identificação da bomba a ser analisada e o numero de períodos a simular. O custo do kilowatt/hora e a curva com os coeficientes de variação horária da tarifação devem ser fornecidos no arquivo gerado no EPANET (Arquivo INP).

Os resultados obtidos de cada período de simulação são impressos em um arquivo apresentado como relatório de auditoria na interface do programa.

7.3 – PROGRAMA “REGRAS OPERACIONAIS PARA O INVERSOR DE FREQUÊNCIA”

Para o estabelecimento de rotações de bombas que atendessem a condições operacionais desejadas, foi desenvolvido um modelo baseado em um simulador associado às rotinas de otimização. O programa de computador gerado à partir deste modelo foi implementado em ambiente operacional Linux (Kurumim 7.0). Foram empregadas as bibliotecas baseadas em algoritmos genéticos (AG), desenvolvidas por Deb et al. (2.002), denominadas Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization – NSGA2, para o módulo de otimização e as bibliotecas para o módulo de simulação baseadas nas funções do EPANET Toolkit desenvolvidas de forma a serem empregadas em ambiente Linux, por Manuel Lopez Ibañez (sbe.napier.ac.uk/~manuel/epanetlinux).

Como as bibliotecas descritas (NSGA2 e EPANETLINUX) foram escritas em linguagem de computação “C”, optou-se por esta linguagem para a ligação das bibliotecas com o programa desenvolvido, para tanto foi empregado o compilador da GNU, o *gcc*.

7.3.1 – ESTRUTURA DO PROGRAMA

O programa inicia com uma chamada as bibliotecas do AG, onde são gerados, de forma aleatória, diversos conjuntos de 24 valores reais que atendem a limites inferiores e superiores pré-estabelecidos, que representarão as rotações das bombas hora a hora, para uma simulação em período extensivo de 24 horas (foi adotada neste estudo uma *semente para geração de números randômicos igual a 0,25*, este é valor fornecido como dado inicial). Cada um destes “roteiros de operação” é tratado pelo AG como um indivíduo, formado por 24 características reais que o definem (rotações), que foram limitadas nas análises à faixa compreendida entre $[0,4-1,0]$, durante a entrada de dados. O total de indivíduos (roteiros) que caracteriza uma população, foi adotada composta por *75 indivíduos*, valor fornecido durante a entrada de dados. Durante o processo de cálculo esta população é atualizada, sendo cada estágio de atualização caracterizado como uma geração. O máximo de gerações do processo evolutivo é também definido na entrada de dados e *foi adotado nas análises um total de 2.000 gerações*.

Cada roteiro operacional gerado (indivíduo) é passado pelo programa de AG às bibliotecas de simulação hidráulica do EPANETLINUX, que faz a simulação em período extensivo, armazenando as variáveis de interesse, no caso analisado neste trabalho; *o consumo de energia da estação de bombeamento e pressão no nó de chegada ao Paranapanema*. A composição total do *custo energético da operação de 24 horas* é traduzida pelo programa como uma *função objetivo à ser minimizada*, e a *pressão no “Nó 9” (C.R.D. Jd. Paranapanema)* como uma *restrição a ser atendida*. Após a simulação hidráulica do total de indivíduos de uma dada geração, é possível ordenar “os indivíduos” com relação a sua adequação (otimização da função

objetivo e atendimento a restrição). Esta é a etapa de volta dos resultados de simulação de toda a geração para a biblioteca de AG, onde os indivíduos da geração sofreram cruzamentos (crossover) gerando descendentes que podem sofrer mutação de características que herdariam de seus ancestrais. Este é o processo de reprodução gerando uma nova geração, onde a escolha dos indivíduos para o cruzamento é baseada em uma escolha que favorece os indivíduos mais adequados (no atendimento aos objetivo e à restrições). As taxas de crossover e de mutação são mantidas constantes ao longo das gerações, sendo fornecidas também como dado de entrada do programa. Nos estudos desenvolvidos foram empregadas como *taxa de crossover 0,90* e como *taxa de mutação 0,03*.

Após a reprodução a nova geração de indivíduos irá substituir a geração anterior, os valores anteriores são relatados pela rotina de AG e os novos valores são repassados às bibliotecas do EPANETLINUX, para a avaliação operacional da nova geração, dando início a um novo ciclo, que será sucedido por outros até o total de gerações adotado (2.000 gerações no estudo efetuado). O indivíduo mais adequado selecionado ao longo das diversas gerações é armazenado e impresso no relatório final, descrevendo um roteiro operacional para as 24 de operação da estação de bombeamento.

Cabe ressaltar que a biblioteca do EPANETLINUX emprega um arquivo de dados exportado do EPANET 2.0 (Windows) no formato INP. Este arquivo deve conter o nome de um padrão para as rotações de bomba, os valores de rotações para o intervalo de 24 horas que forem adotados não terão significado, uma vez que, serão substituídos a cada simulação pelos roteiros fornecidos por cada indivíduo gerado pelo AG.

O procedimento que chama a simulação hidráulica segue a mesma proposição empregada pelo programa “Audita”. Neste caso os roteiros operacionais são fornecidos através da rotina *Parâmetros* (i) (como o Passo 3.1 em “Audita”) e os valores que serão empregados para composição da função objetivo são obtidos da rotina *Valores* (i) (como o Passo 3.4 de “Audita”).

“This most beautiful system [The Universe] could only proceed from the dominion of an intelligent and powerful Being.”

Isaac Newton

8. – BIBLIOGRAFIA

ABB – Asea Brown Boveri Ltda.; *Informativo Técnico – Divisão de Conversores e Acionamentos*, p.1-4, Osasco – SP, 1.993.

ABB – Asea Brown Boveri Ltda.; *Driving Down Costs – Process Engineering* n° 9, Vol. 86, p. 41-43, Setembro de 2.005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 7034 – Materiais Isolantes Elétricos – Classificação Térmica*, Dezembro de 1.981.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 12218 – Projeto de Rede de Distribuição de Água para o Abastecimento Público*, Julho de 1.994.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas; *NBR 7094 – Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução – Especificação*, Novembro de 1.996.

ALLEN-BRADLEY; Rockwell Automation, *Economia de Energia com Inversores de Freqüência* – Catálogo do Fabricante, Outubro de 1.995.

ALMEIDA, A. T.; FONSECA, P.; BERTOLDI, P.; *Energy-Efficient Motor System in the Industrial and in the Services Sectors in the European Union: Characterisation, Potentials, Barriers and Policies* – <www.elsevier.com/locate/energy>, Energy nº 28, p. 673-690, 2.003.

ALMEIDA, A. T.; FONSECA, P.; FALKNER, H.; BERTOLDI, P.; *Market Transformation of Energy-Efficient Motor Technologies in the European Union* – <www.elsevier.com/locate/enpol>, Energy Policy nº 31, p. 563-575, 2.003.

ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; BOTH, D.; *Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with Electric Motor Systems* – IEEE Transactions on Industry Applications Magazine, Vol. 41, nº 1, p. 188-199, Janeiro / Fevereiro de 2.005.

ALVES, A. J.; OLIVEIRA, L. F. C.; OLIVEIRA, A. M.; *Verificação das Relações de Râteaux pelo Emprego de um Inversor de Freqüência* – Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 6, nº 3, p. 523-525, 2.002.

AMIGO, M. R.; OLIVEIRA, C. D.; *Otimização do Consumo de Energia Elétrica Aplicada ao Controle de Vazão de Bombas Centrífugas Radiais* – Anais do IIIº Concurso WEG – Conservação de Energia Elétrica, 2.000.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; *Resolução nº 456 de 29/11/2.000*, Brasília – DF, 2.000.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; *Resolução nº 249 de 06/05/2.002*, Brasília – DF, 2.002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; *Resolução nº 351 de 27/06/2.002*, Brasília – DF, 2.002.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; *Decreto nº 4.508 de 11/12/2.002*, Brasília – DF, 2.002. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/dec200224508.pdf>. Acesso em: 19 de Março de 2.007.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; *Resolução Homologatória nº 108 de 18/04/2.005*, Brasília – DF, 2.005.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; *Resolução Homologatória nº 154 de 18/07/2.005*, Brasília – DF, 2.005.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, *Cadernos Temáticos ANEEL nº 4 – Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica*, Brasília – DF, Abril de 2.005.

ARMINTOR, J. K.; CONNORS, D. P.; *Acionamento de Velocidade Variável em Aplicações de Bombeamento nas Indústrias Petroquímicas* – Reliance Electric Co., Janeiro de 1.987.

BARÁN, B.; VON LÜCKEN, C.; SOTELO, A.; *Multi-objective Pump Scheduling Optimization Using Evolutionary Strategies* – Advances Engineering Software nº 36, p. 39-47, <<http://www.elsevier.com/locate/advengsoft>>, 2.005.

BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A.; LAZZARI, M.; PASTORELLI, M.; *Electrical Drives to Increase the Fluid Processing Efficiency* – Conference Record – IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), Vol. 2, p. 1.147-1.154, <<http://www.ieee.org/ias>>, 2.001.

BRAGA, N. C.; *Como Funcionam os Inversores de Freqüência ?* – Revista Mecatrônica Fácil nº 17, Ano 3, p. 58-61, Julho / Agosto de 2.004.

- BRIGNOL, W. S.; *Economia de Energia pela utilização de Inversor de Freqüência em Sistemas de Bombeamento* – Anais do IIIº Concurso WEG – Conservação de Energia Elétrica, 2.000.
- BRION, L. M.; MAYS, L. W.; *Methodology for Optimal Operation of Pumping Stations in Water Distribution Systems* – Journal of Hydraulic Engineering nº 11, Vol. 117, p. 1.551-1.569, Novembro de 1.991.
- BROWN, G.; *Cutting Pumping Costs Through Motor Efficiency* – World Pumps Magazine, p. 22-26, <<http://www.worldpumps.com>>, Junho de 2.001.
- CARRIJO, I. B.; *Extração de Regras Operacionais Ótimas de Sistemas de Distribuição de Água através de Algoritmos Genéticos Multiobjetivo e Aprendizado de Máquina* – Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2.004.
- CARTER, C.; *Energy Drive* – Design Engineering nº 293, p. 49-52, Abril de 2.006.
- CARVALHO, A. D. Z.; *A Pseudoconstitucionalidade da Cobrança do Encargo de Capacidade Emergencial – ECE para o Financiamento do Setor Elétrico*, 2.003. Disponível em: <http://www.sinescontabil.com.br/direito_tributario>. Acesso em: 20 de Maio de 2.003.
- CARVALHO, J. A.; MELLO, C. R.; BRAGA JR., R. A.; REINATO, C. H.; SANTANA, M. J.; *Utilização do Inversor de Freqüência em Sistemas de Irrigação para Controle de Vazão* – Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 4, nº 1, p. 51-56, 2.000.
- CASADA, D. A.; KUECK, J. D.; STAUNTON, R. H.; WEBB, M. C.; *Efficiency Testing of Motors Powered from Pulse-Width Modulated Adjustable Speed Drives* – IEEE Transactions on Energy Conversion Magazine, Vol. 15, nº 3, p. 240-244, Setembro de 2.000.
- CAPELLI, A.; *Inversores de Freqüência* – Revista Mecatrônica Atual nº 2, p. 7-15, Fevereiro de 2.002.

CAPELLI, A.; *Inversores de Freqüência Vetorial* – Revista Saber Eletrônica nº 337, p. 33-36, Fevereiro de 2.001.

COMOLET, R.; BONNIN, J.; *Mecanique Experimentale des Fluides* – Ed. Masson – Vol. 3, Paris, 1.961.

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz; *Taxas e Tarifas – Resolução nº 81 da ANEEL de 08/04/2.005*. Disponível: <http://agencia.cpfl.com.br/portal-servicos/paulista/taxas_tarifas.asp>. Acesso em: 06 de Novembro de 2.006.

CRESPO, P. G.; *Elevatórias nos Sistemas de Esgotos* – Editora UFMG, Belo Horizonte – MG, 2.001.

DEB, K.; AGRAWAL, S.; AMRIT, P.; MEYARIVAN, T.; *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II* – IEEE Transactions on Evolutionary Computation nº 2, Vol. 6, p. 182-197, Abril de 2.002. Disponível em: <<http://vision.ucsd.edu/~sagarwal/nsga2.pdf>>. Acesso em: 05 de Junho de 2.007.

EUROPUMP AND HYDRAULIC INSTITUTE; *Variable Speed Drives – A Way to Lower Life Cycle Costs* – Elsevier Advanced Technology, Oxford, Inglaterra, 2.004.

EVERHART, J.; *‘Sensing’ Significant Savings with VFD Systems* – World Pumps Magazine, p. 18-21, <<http://www.worldpumps.com>>, Março de 2.004.

FONSECA, E. G.; *Miopia Coletiva* – Entrevista Concedida a Revista VEJA (Páginas Amarelas), Edição nº 1.930, p. 11-15, 9 de Novembro de 2.005.

FONSECA, E. G.; *A Miopia Coletiva* – Entrevista Concedida ao Website Empreendedor, Disponível : <<http://www.empreendedor.com.br/?pid=20&cid=2247>> Acesso em: 22 de Outubro de 2.006.

GARCIA, A. G. P.; *Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Dezembro de 2.003.

GAMBICA AUTOMATION, INSTRUMENTATION & CONTROL – LABORATORY AND TECHNOLOGY; *Variable Speeds Driven Pumps – Best Practice Guide*, Disponível: <http://www.gambica.org.uk/pdfs/VSD_Pumps.pdf> Acesso em: 02 de Abril de 2.007.

HADDAD, J.; GAMA, P. H. R. P.; *Tarifação de Energia Elétrica*, Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, p. 113–148, 2ª Edição, Itajubá – MG, 2.001.

HAGUIUDA, C.; *Eficiência Energética no Saneamento Básico*, Vº Encontro de Eficiência Energética Pesquisa e Desenvolvimento, ABRADDEE – Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, Florianópolis – SC, Agosto de 2.004. Disponível em: <www.abradee.org.br/vencontro/eficiencia/Eficiencia_Energética_CelsoHaguiuda.ppt>. Acesso em: 12 de Setembro de 2.005.

ILINSKI, N.; *Frequency Converters in Water Supply Systems for Energy Saving* – Energy Engineering n° 5, Vol. 97, p. 7-20, 2.000.

IMBIL; *Catálogo Eletrônico de Seleção de Bombas* – Disponível em: <<http://www.hidrovector.com.br/catalogo-eletronico.asp>> – Acesso em 02/04/2.007.

IRVINE, G.; GIBSON, I. H.; *VF Drives as Final Control Elements in the Petroleum Industry* – IEEE Industry Applications Magazine, p. 51-60, <<http://www.ieee.org/ias>>, Julho / Agosto de 2.002.

JOWITT, P. W.; GERMANOPOULOS, G.; *Optimal Pump Scheduling in Water Supply Networks* – Journal of Water Resources Planning and Management n° 4, Vol. 118, p. 406-422, Julho / Agosto de 1.992.

KSB; *Manual Técnico e Curvas Características n° 1150.OB/2 – KSB ETA* – Disponível em: <<http://www.ksb.com.br/>>, Acesso em: 13/04/2.007.

KSB; *Manual Técnico e Curvas Características n° A13850.OP/2 – KSB RDL* – Disponível em: <<http://www.ksb.com.br/>>, Acesso em: 13/04/2.007.

LEE, A. H. W.; *Successful Case Studies of Energy Savings Using Adjustable Speed Drives (ASD) for Pumps and Fans* – Energy Engineering Magazine n° 3, Vol. 98, p. 45-51, 2.001.

LORA, E. E. S.; TEIXEIRA, F. N.; *Energia e Meio Ambiente – Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, p. 30–93, 2ª Edição, Itajubá – MG, 2.001.

MARK GRUNDFOS; *Bombas Centrífugas Horizontais Bipartidas AE – GBR 027T 01/05* – Disponível em: <<http://www.markgrundfos.com>>, Acesso em: 13/04/2.007.

MARTINEZ, J. S.; *Especificando o Motor Elétrico* – Disponível em: <<http://www.soto.com.br/motorespec.htm>>, Acesso em: 14/11/2.006.

MASCHERONI, J. M.; LICHTBLAU, M.; GERARDI, D.; *Guia de Aplicação de Inversores de Freqüência* – WEG Automação, 2.003.

MINISTÉRIO DA CASA CIVIL; *Decreto n° 24.643 – Código de Águas*, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 10 de Julho de 1.934. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D24643.htm>. Acesso em: 27 de Julho de 2.005.

MINISTÉRIO DA CASA CIVIL; *Decreto nº 41.019 – Regulamentação dos Serviços de Energia Elétrica*, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 26 de Fevereiro de 1.957. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccvil_03/decreto/Artigos/D41019.htm>. Acesso em: 27 de Julho de 2.005.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA; *Balanço Energético Nacional 2.005 – Sumário Executivo / Ano Base: 2.004*, Eletrobrás, PROCEL, 2.005. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=6073> Acesso em: 8 de Novembro de 2.006.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA; *Balanço Energético Nacional 2.005 – Balanço de Energia Útil / Ano Base: 2.004*, Eletrobrás, PROCEL, 2.005. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=1590> Acesso em: 8 de Novembro de 2.006.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA; *Balanço Energético Nacional 2.005 – Análise Energética Brasileira – Período de 1.970 a 2.004 / Ano Base: 2.004*, Eletrobrás, PROCEL, 2.005. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=4060> Acesso em: 23 de Novembro de 2.006.

NOGUEIRA, L. A. H.; *Energia: Conceitos e Fundamentos – Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, p. 1–28, 2ª Edição, Itajubá – MG, 2.001

OLIVEIRA JR., N.; *Acionamento de Corrente Alternada de Velocidade/Frequência Variáveis – Catálogo de Fabricante*, Abril de 1.993.

ORMSBEE, L. E.; WALSKI, T. M.; CHASE, D. V.; SHARP, W. W.; *Methodology for Improving Pump Operation Efficiency – Journal of Water Resources Planning and Management* nº 2, Vol. 115, p. 148-164, Março de 1.989.

- PEREIRA JR., L. M.; *Uso Eficiente de Energia Aplicado a Sistemas de Ar Comprimido* – Anais do IVº Concurso WEG – Conservação de Energia Elétrica, Outubro de 2.001.
- PEMBERTON, M.; *Variable Speed Pumping: Myths and Legends* – World Pumps Magazine, p. 22-24, <<http://www.worldpumps.com>>, Janeiro de 2.005.
- PLATTS; *Harmonics* – The McGraw Hill Companies, Inc. Disponível em: <<http://www.cpau.com/biz/esourcepdf/harmonics.pdf>>. Acesso em: 09 de Janeiro de 2.007.
- RIBEIRO, L. C. L. J.; *Modelo Híbrido para o Estabelecimento de Rotações Ótimas de Bombas de Rotação Variável* – Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2.002.
- RISHEL, J. B.; *Wire-to-Water Efficiency of Pumping System* – ASHRAE Journal nº 4, Vol. 43, p. 40-46, Abril de 2.001.
- RODRIGUES, W.; LUVIZOTTO JR., E.; *Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento* – Anais da VIIª Exposição de Experiências Municipais em Saneamento da ASSEMAE, Santo André – SP, Julho de 2.003.
- ROOKS, J. A.; WALLACE, A. K.; *Energy Efficiency of VSDs* – IEEE Industry Applications Magazine, p. 57-61, <<http://www.ieee.org/ias>>, Maio / Junho de 2.004.
- ROSMAN, L.; *EPANET Programmer's Toolkit* – Environmental Protection Agency (EPA) – Estados Unidos, 1.998.
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo; *Demonstrações Financeiras Padronizadas de 2.004*, Demonstrações Financeiras submetidas à CVM – Comissão de Valores Mobiliários, São Paulo – SP, 31 de Dezembro de 2.004. Disponível em:

<http://www.sabesp.com.br/financas/cvm/2004/DFP_2004_COMPLETO.pdf>. Acesso em: 16 de Setembro de 2.005.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo; *Informações Trimestrais – Demonstrações Financeiras* submetidas à CVM – Comissão de Valores Mobiliários – São Paulo – SP, 30 de Junho de 2.005. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/financas/cvm/2trim2005/ITR_062005_completo.pdf>. Acesso em: 16 de Setembro de 2.005.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo; *Resultados do Segundo Trimestre de 2.005* – São Paulo – SP, 15 de Agosto de 2.005. Disponível em: <[http://www.sabesp.com.br/calandra/calandra.nsf/0/d785c5a74ae892a58325705e007c7d9e/\\$FILE/SBSP3_2T05.pdf](http://www.sabesp.com.br/calandra/calandra.nsf/0/d785c5a74ae892a58325705e007c7d9e/$FILE/SBSP3_2T05.pdf)>. Acesso em: 16 de Setembro de 2.005.

SCHIOZER, D.; *Mecânica dos Flúidos* – Editora Araguaia, 1ª Edição, São Paulo – SP, 1.990.

SIEMENS; *FAQ's Motores Elétricos CA* – Disponível em: <<http://www.siemens.com.br/templates/columa1.aspx?channel=6949>>, Acesso em: 08/01/2.007.

SILVA, J. F. A.; *Electrónica Industrial* – Disponível em: <<http://alfa.ist.utl.pt/~elregcom/elinderrat.pdf>>, Acesso em: 22/05/2.007.

SILVA, V. F.; CORTEZ, J. A.; *Inversores de Freqüência – Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, p. 448–467, 2ª Edição, Itajubá – MG, 2.001.

SOUZA, R. F.; BRUCOLI, A. C.; LUCARELLI, D. L.; *Bombeamento Direto nas Redes de Abastecimento através de Bombas de Velocidade Variável sem Reservatório de Distribuição* – Revista DAE nº 118, p. 186-195, 1.978.

- TARQUIN, A. J.; DOWDY, J.; *Optimal Pump Operation in Water Distribution* – Journal of Hydraulic Engineering n° 2, Vol. 115, p. 158-168, Fevereiro de 1.989.
- THEISEN, J.; *Upping the Efficiency of Pumps and Fans* – Machine Design Magazine n° 19, Vol. 77, p. 86-90, <www.machinedesign.com>, Outubro de 2.005.
- TSUTIYA, M. T.; *Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água* – ABES, 1ª Edição, São Paulo – SP, 2.001.
- UNESP; *Curva Característica de uma Turbobomba* – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Disponível : <http://www.feg.unesp.br/~caec/quarto/hg_turbobombas.doc> Acesso em: 22 de Maio de 2.007.
- VALLILO, D. C.; KUBOTA, H.; TSUTIYA, M. T.; UEDA, S.; *Utilização de Bombas de Rotação Variável em Obras Sanitárias* – Revista DAE n° 126, p. 266-274, 1.981.
- VIANA, A. N. C.; *Bombas de Fluxo e Ventiladores*, Conservação de Energia – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, p. 213–244, 2ª Edição, Itajubá – MG, 2.001.
- WEG; *Inversores de Frequência – Mod. CFW – 08 Plus*, Catálogo do Fabricante, 2.003.
- WEG; *Inversores de Frequência – Mod. CFW – 09*, Catálogo do Fabricante, 2.003.
- WEG; *Variação de Velocidade – Módulo 2*, Apostila de Treinamento sobre Inversores de Frequência, 2.003.
- WEG; *Motores Elétricos de Corrente Alternada: Linhas de Produtos – Características – Especificações – Instalações – Manutenções*, Catálogo do Fabricante, Junho de 2.005. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/artigos/4-44.PDF>>. Acesso em: 06 de Novembro de 2.006.

WILK, M.; *Emprego de Variador de Velocidade na Economia de Energia em uma Bomba Centrífuga Radial* – Anais do IIIº Concurso WEG – Conservação de Energia Elétrica, 2.000.

WOOD, D. J.; REDDY, L. S.; *Control de Bombas de Velocidad Variable y Modelos en Tiempo Real para Minimizar Fugas y Costes Energéticos* – Curso Dictado en la UIMP: Mejora del Rendimiento y de la Fiabilidad en Sistemas de Distribucion de Agua, p. 173-207, Valência – Espanha – Novembro de 1.994.

YASKAWA; *Inversores de Freqüência Compactos de Uso Geral com Controle Vetorial* – Mod. VS-606V7 – Manual Técnico, Janeiro de 2.001.

YASKAWA; *Inversores de Freqüência Ultra Compactos de Uso Geral* – Mod. VS mini J7 – Manual Técnico, Janeiro de 2.001.

YASKAWA; *Inversores de Torque Constante com Controle Vetorial Adaptativo* – Manual Técnico de Instalação e Programação, Janeiro de 2.001.

ZESSLER, U.; SHAMIR, U.; *Optimal Operation of Water Distribution Systems* – Journal of Water Resources Planning and Management n° 6, Vol. 115, p. 735-751, 1.989.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)