

RAFAEL PIMENTA MESQUITA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA PARA A
APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS
DE BOMBEAMENTO DE BAIXA POTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de energia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Co-Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Guaratinguetá
2009

M582a Mesquita, Rafael Pimenta
Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência.
/ Rafael Pimenta Mesquita. - Guaratinguetá : [s.n.], 2009
99f.: il.
Bibliografia: f. 92-99

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009.
Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Co-orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

1. Inversores elétricos 2. Motores elétricos I. Título

CDU 621.314.572

UNESP  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**"ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA PARA A
APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA EM SISTEMAS DE
BOMBEAMENTO DE BAIXA POTÊNCIA"**

RAFAEL PIMENTA MESQUITA

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP-FEG

Prof. Dr. JAMIL HADDAD
UNIFEI

Julho de 2009

DADOS CURRICULARES

RAFAEL PIMENTA MESQUITA

NASCIMENTO	08.02.1983 – BELO HORIZONTE / MG
FILIAÇÃO	José Odilon Pereira Mesquita Maria das Graças Pimenta Mesquita
2002/2006	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP
2007/2009	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

de modo especial à minha querida Gisele que me incentivou a entrar e me ajudou a sair dessa odisséia chamada mestrado

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora pelas oportunidades, por estarem sempre iluminando meu caminho e por colocarem pessoas especiais ao meu redor.

agradeço aos meus pais pelos esforços, pela educação, pelos exemplos de vida, pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida e ainda por acreditarem em mim, abdicando de algumas coisas em prol de minha formação.

aos meus irmãos Robson e Rodrigo pelo apoio, compreensão, amizade e companheirismo.

a todos os professores que trabalham por paixão ao ensino, sobretudo aos amigos Teófilo Miguel de Souza e Pedro Magalhães Sobrinho pelas oportunidades, pelos incentivos, pelos conselhos e por acreditarem em meu potencial.

à ENERGIA Assessoria em Sistemas de Energia e Comércio Ltda, em especial ao Carlos Paes, pela oportunidade, pelos conselhos e pelos ensinamentos.

à ELETROBRÁS pelo suporte financeiro.

aos irmãos do kbhit! (Pinda, Tiago, Nogueira, Fava, Satoshi, Mandrake, Rocinha, Hamtaro, Coxa e Catai) pelo aprendizado, pelo convívio, pela compreensão, pelos conselhos e pela troca de experiências.

à República Ama-Zonas pelo apoio, pela amizade, pelo abrigo e por tudo que fizeram por mim.

ao Amaro e Edna por serem minha segunda família quando precisei.

aos amigos que sempre torceram por mim, em especial a Ana Cristina, Gabriela e Pedro, Tina e Anderson, Celina, Ariela e Mariusa.

à todas as pessoas do Lamotriz, especialmente ao Rafael “Paraty” pelo companheirismo, amizade e ajuda durante o curso.

em especial a Gisele, minha grande companheira, pelo exemplo de força, dedicação, empenho e por estar ao meu lado em todos os momentos dando estímulo, apoio, conselhos, carinho e compreensão.

Este trabalho contou com apoio da seguinte entidade:

- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRÁS - através do processo nº. 564/18/01/2006 – convênio ECV-191/2006.

“Deus é muito mais do que pedimos e pensamos”

(Ef 3:20)

MESQUITA, R. P. **Análise de viabilidade técnica-econômica para a aplicação de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de baixa potência.** 2009. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

Em sistemas de bombeamento, a vazão solicitada à bomba nem sempre é constante, normalmente as bombas operam em rotação constante e para obter a variação da vazão, utilizam-se válvulas de estrangulamento na saída. Outro método utilizado é controlar a velocidade do motor através de inversores de frequência, pois, a variação da vazão é diretamente proporcional à rotação do motor, proporcionando uma maior facilidade de controle e economia de energia, porém, interferindo na qualidade de energia elétrica. Neste contexto, a finalidade deste trabalho foi a comparação do consumo de energia elétrica para dois tipos de controle de vazão em sistemas de bombeamento: por válvula de estrangulamento ou por inversor de frequência para dois tipos de motores: padrão e de alto rendimento. Comprovou-se que a simples troca de um motor padrão por um motor de alto rendimento gera uma redução de consumo de energia elétrica entre 32,45% a 33,42%, no caso estudado. A substituição do controle de vazão, da válvula de estrangulamento para o controle pelo inversor de frequência trouxe uma economia de energia elétrica entre 47,18% a 52,22% em determinadas faixas. A substituição do controle de vazão pela válvula e motor padrão para o controle de vazão pelo inversor e motor de alto rendimento gerou uma economia de 67,03%. Para avaliar a influência dos programas de eficiência energética na qualidade da energia foram mensurados valores do fator de potência e dos níveis de distorção harmônica total de corrente e de tensão gerados através de três tipos de acionamento do motor trifásico: partida direta, partida suave e partida com inversor de frequência, comparando-os com valores da norma brasileira (ANEEL) e de norma internacional (IEC).

PALAVRAS-CHAVE: Inversor de frequência, sistema de bombeamento, eficiência energética, motores elétricos.

MESQUITA, R.P. **Analysis of technical and economical viability for implementation of variable frequency drives in low power pumping systems.** 2009. 99 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Engineering College, São Paulo State University - Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

In pumping systems the flow requested of the pump is not always constant, normally the pumps operate in constant rotation and bottleneck valves are used in order to obtain the flow variation. Controlling the motor speed through variable frequency drives is another used method since the flow variation is directly proportional to the motor rotation. In this report it was carried out a comparison of electric power consumption in a pumping system with the flow control by bottleneck valve and by variable frequency drives in order to identify an economically viable range of use. The technical and economical viability of substituting a standard motor for a high-performance motor one was also analysed. It proved that the simple exchange of a standard motor for a high performance one, generates a reduction of electric power consumption between 32.45% a 33.42%, in the studied case. The replacement of the flow control of the bottleneck valve to the variable frequency drives brought a saving of electric power between 47.18% a 52.22% in certain ranges. The replacement of the flow control by the valve and standard motor for the variable frequency drives and the high performance motor generated an economy of 67.03%. It was measured values of power factor and total harmonic distortion of current and voltage generated by three different types of starts: direct start, soft-start and variable speed drives start and compared with values of the Brazilian norm (ANEEL) and International norm (IEC) to appraise its influence in energy efficiency programs.

Keywords: Variable frequency drives, pumping system, energy efficiency, electric motors.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Principais componentes de um motor de indução trifásico	22
FIGURA 2: Perdas em um motor de indução trifásico	25
FIGURA 3. Potência consumida durante a partida de um motor elétrico na partida direta.....	28
FIGURA 4. Potência consumida durante a partida de um motor elétrico com acionamento tipo estrela-triângulo	28
FIGURA 5. Potência consumida durante a partida de um motor elétrico com autotransformador.....	29
FIGURA 6. Potência consumida durante a partida de um motor elétrico com partida suave..	30
FIGURA 7. Potência consumida durante a partida de um motor elétrico com inversor de frequência	30
FIGURA 8: (a) Onda senoidal fundamental e sua 5ª harmônica. (b) Forma de onda resultante da soma dos dois sinais gerando uma onda com distorção.....	35
FIGURA 9. Classificação das turbobombas segundo a trajetória do líquido no rotor	43
FIGURA 10. Curva da pressão em função da vazão	46
FIGURA 11. Curva da potência em função da vazão	47
FIGURA 12. Curva do rendimento em função da vazão	47
FIGURA 13. Curva NPSH em função da vazão	49
FIGURA 14. Balanço de energia em um sistema de bombeamento	51
FIGURA 15. Instalação de uma válvula de by-pass.....	53
FIGURA 16. Instalação da válvula de estrangulamento	53
FIGURA 17. Instalação de um inversor de frequência	54
FIGURA 18. Arquitetura de rede da bancada de bomba centrífuga	57
FIGURA 19. Bancada de bomba centrífuga.....	57
FIGURA 20: Fluxograma da bancada de bomba centrífuga mostrado pelo software supervisorio	58
FIGURA 21. Indicação da temperatura nas três fases e na carcaça do motor.....	59
FIGURA 22. Indicação do controle da vazão – PID	59
FIGURA 23. Curva de pressão em função da vazão considerando o motor padrão	60
FIGURA 24. Curva de pressão em função de vazão considerando o motor de alto rendimento	61
FIGURA 25. Curva potência x vazão para o motor convencional.....	62
FIGURA 26. Curva potência x vazão para o motor de alto rendimento	63

FIGURA 27. Gráfico do NPSH em função da vazão	66
FIGURA 28. Curva de potência consumida em função da vazão para cada tipo de motor e para os dois métodos de controle de vazão.....	67
FIGURA 29. Instalação do medidor de energia – fronteira de medição	69
FIGURA 30. Gráfico da <i>baseline</i> para cada situação.....	71
FIGURA 31. Espectro do harmônico de tensão	81
FIGURA 32. Espectro do harmônico de corrente – Inversor de frequência – motor de alto rendimento	82
FIGURA 33. Forma de onda da corrente – Inversor de frequência – motor de alto rendimento	83
FIGURA 34. Conjuntos moto-bombas antes da ACE – SAE Potirendaba-SP	84
FIGURA 35. Ponto de funcionamento bomba instalada – SAE Potirendaba-SP.....	86
FIGURA 36. Medição <i>baseline</i> e no pós ACE – SAE Potirendaba-SP	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Rendimentos nominais mínimos.....	26
TABELA 2. Parâmetros e características dos tipos de variação de velocidade de um motor de indução.....	31
TABELA 3. Valores de referências no Brasil das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	37
TABELA 4. Valores de referências globais das distorções harmônicas totais	37
TABELA 5. Valores de referências globais das distorções harmônicas totais (120V a 69kV)	38
TABELA 6. Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa tensão	38
TABELA 7. Níveis de temperatura máxima para as classes de isolamento	40
TABELA 8. Oportunidades de economia em sistema de bombeamento	52
TABELA 9. Consumo de energia e volume de água bombeado para cada situação	70
TABELA 10. Consumo de energia evitado – Caso 1	72
TABELA 11. Consumo de energia evitado – Caso 2.....	72
TABELA 12. Consumo de energia evitado – Caso 3.....	73
TABELA 13. Consumo de energia evitado – Caso 4.....	73
TABELA 14. Consumo de energia evitado – Caso 5.....	74
TABELA 15. Consumo de energia evitado – Caso 6.....	74
TABELA 16. Consumo de energia evitado – todos os casos estudados	74
TABELA 17. Potência máxima das quatro situações possíveis da bancada.....	75
TABELA 18. Consumo de energia medido e consumo de energia anual das quatro situações possíveis da bancada.....	77
TABELA 19. Descrição dos equipamentos com os respectivos preços.....	78
TABELA 20. Análise econômica das possibilidades de controle de vazão e motor.....	78
TABELA 21. Índices de qualidade de energia elétrica para todos os três diferentes acionamentos e os dois tipos de motores.....	80
TABELA 22. Equipamentos substituídos – SAE Potirendaba-SP	85
TABELA 23. Medição e ajuste baseline para cálculo economia de energia – SAE Potirendaba-SP	87
TABELA 24. Redução de demanda na ponta – SAE Potirendaba-SP	87
TABELA 25. Índices da atratividade econômica do projeto - SAE Potirendaba-SP.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACE	- Ação de Conservação de Energia
AMT	- Altura Manométrica Total
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	- Agência Nacional de Petróleo
BHP	- Brake Horse Power
CGIEE	- Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
CLP	- Controlador Lógico Programável
DDT	- Demanda de Distorção Total
DOE	- Department of Energy
GHG	- Greenhouse Gas
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEC	- International Electrotechnical Commission
IEEE	- Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAMOTRIZ	- Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes
M&V	- Medição e Verificação
MCT	- Ministério de Ciência e Tecnologia
MDIC	- Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comercio Exterior
MIT	- Motor de Indução Trifásico
MME	- Ministério de Minas e Energia
NPSH	- <i>Net Position Suction Head</i>
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RCB	- Relação Custo Benefício
RGR	- Reserva Global de Reversão
ROL	- Receita Operacional Líquida
THD	- Total Harmonic Distortion
TIR	- Taxa Interna de Retorno
VPL	- Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Rugosidade absoluta	m
ν	Viscosidade cinemática	m^2/s
η_m	Rendimento motor	[1]
γ	Peso específico do fluido	N/m^3
ϕ_m	Fluxo de magnetização	Wb
C	Consumo de energia elétrica	Wh
C_f	Coefficiente de atrito	[1]
D	Diâmetro interno da tubulação	m
f_1	Frequência fundamental	Hz
f_p	Fator de potência	[1]
H	Altura manométrica total	m
h_{fs}	Somatório das perdas de carga de sucção	m
I_2	Corrente rotórica	A
I_{CC}	Corrente de Curto Circuito	A
I_L	Corrente da Carga	A
K	Coefficiente adimensional	[1]
k	Coefficiente de redução da seção de entrada do rotor	[1]
K_i	Coefficiente de perda de carga	[1]
L	Comprimento da tubulação	m
N	Rotação da bomba	rpm
n	Velocidade de rotação mecânica	rpm
N_q	Rotação específica	Rpm
N_s	Rotação específica	Rpm
p	Número de pólos	[1]
P	Potência consumida da bomba	W
P_{atm}	Pressão atmosférica	Pa
P_v	Pressão de vapor do líquido	Pa
Q	Vazão	m^3/s

Re	Número de Reynolds	$[1]$
S	Altura geométrica de sucção	m
s	Escorregamento	$[1]$
T	Torque ou conjugado disponível na ponta do eixo	$N.m$
v	Velocidade média do fluido	m/s
V	Volume	m^3
V ₁	Tensão estatórica	V

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 PROGRAMAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	19
2 MOTORES ELÉTRICOS	21
2.1 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO.....	25
2.2 TIPOS DE ACIONAMENTO DOS MOTORES.....	27
3 QUALIDADE DE ENERGIA	34
3.1 INFLUÊNCIA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR	39
4 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	41
4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBOBOMBAS	42
4.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS.....	45
4.2.1 Curva da pressão em função da vazão.....	45
4.2.2 Curva da potência em função da vazão	46
4.2.3 Curva rendimento em função da vazão	47
4.2.4 Curva NPSH em função da vazão	48
4.3 OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO.....	49
4.3.1 Controle de vazão em sistemas de bombeamento	52
4.3.2 By-pass na saída da bomba.....	52
4.3.3 Válvula de estrangulamento	53
4.3.4 Inversores de frequência.....	54
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
6.1 CURVA DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA.....	60
6.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO.....	66
6.3 PROTOCOLO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO.....	69
6.3.1 Opções de medição e verificação	68
6.3.2 Fronteiras de medição e verificação	68
6.3.3 Parâmetros de influência	69
6.3.4 Extensão da medição	70
6.3.5 Análise de dados - Baseline.....	70
6.3.6 Ajuste da Baseline	71
6.4 ANÁLISE ECONÔMICA	75

6.5 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA	80
7 ESTUDO DE CASO: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE POTIRENDABA-SP.....	84
8 CONCLUSÃO	90
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

O uso dos recursos naturais sem estabelecer as reais relações de causas e efeitos vem fazendo a espécie humana refém de seus próprios erros. O abastecimento público de água, que há poucos anos era feito por meio de fontes limpas captadas nas encostas e trazidas às comunidades pela ação da gravidade, atualmente depende praticamente na totalidade de bombeamento.

O uso de bombas de água tornou-se indispensável e, como conseqüência, também o uso da energia elétrica para o acionamento dos motores que fazem funcionar as bombas.

Uma importante contribuição para evitar a degradação ambiental consiste em reduzir ao máximo o desperdício da energia e conseqüentemente reduzindo os custos dos serviços.

O combate ao desperdício de energia elétrica e água vem impulsionando uma mudança de paradigma comportamental demandada pela sociedade em função do esgotamento de recursos naturais. A eficiência energética vem se tornando o principal instrumento para a diminuição e talvez a extinção do desperdício de energia elétrica, porém, ainda desacreditada e desconhecida por alguns profissionais. Faz-se necessário promover uma mudança de hábitos e costumes da sociedade de forma a reduzir ao máximo esse desperdício. Essa mudança ocorre em função da informação e a inserção de novas tecnologias.

Além de benefícios ambientais e sociais, a eficiência energética é utilizada pelas empresas de saneamento para melhorarem seus resultados operacionais buscando melhor competitividade no mercado globalizado.

A inserção de inversores de freqüência em sistemas de bombeamento para o controle da vazão vem se tornando cada vez mais comum, principalmente em programas de eficiência energética, porém, muitas vezes, não acarreta a economia esperada visto que a análise técnica-econômica não foi realizada corretamente.

Este trabalho visa a comparação técnica-econômica de dois métodos de controle de vazão: controle de vazão por válvula de estrangulamento e controle de vazão por inversor de freqüência, e para cada um, dois tipos de motores de mesma potência: motor padrão e motor de alto rendimento. Analisou-se também o impacto da eficiência energética,

identificando e quantificando os índices de qualidade de energia elétrica para três tipos de acionamentos e dois tipos de motores.

1.1 PROGRAMAS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Em dezembro de 1985, foi criado pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio e gerido por uma secretaria executiva subordinada à Eletrobrás o PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Em 18 de julho de 1991, o PROCEL foi transformado em Programa de Governo, tendo suas abrangência e responsabilidade ampliadas, tendo como objetivo promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica para que se elimine o desperdício e se reduza os custos e os investimentos setoriais (PROCEL, 2008). O Programa utiliza recursos da Eletrobrás e da Reserva Global de Reversão - RGR - fundo federal constituído com recursos das concessionárias, proporcionais ao investimento de cada uma e recursos de entidades internacionais.

De 1986 até 2006 o PROCEL contou com um investimento de 858,25 milhões de reais, tendo uma energia economizada de 21.753 GWh/ano e uma redução de carga na ponta de 5.839 MW (PROCEL,2008).

Em Julho de 2000 foi sancionada a Lei nº. 9.991 (BRASIL, 2000) dispendo sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética pelas empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica. As concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica ficam obrigadas a aplicar, anualmente, o montante de, no mínimo, 0,5% de sua Receita Operacional Líquida (ROL) em programas de eficiência energética, sendo o uso obrigatório de 0,25% da ROL em programas de baixa renda (ANEEL, 2008).

Em 17 de outubro de 2001 foi aprovada a “Lei de Eficiência Energética” (BRASIL, 2001), que estabelece níveis máximos de consumo específico de energia para máquinas e aparelhos elétricos fabricados ou comercializados no país. Para regulamentar esta lei, foi promulgado em 19 de dezembro de 2001 o Decreto 4.059 (BRASIL, 2001), que, para tal tarefa, criou o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, constituído dos ministérios de Minas e Energia (MME), de Ciência e Tecnologia (MCT)

e de desenvolvimento, indústria e comércio exterior (MDIC), as agências ANEEL e ANP, um representante de universidade e um cidadão brasileiro, ambos especialistas em energia.

Em dezembro de 2002 foi aprovado o Decreto 4.508/2002 que regulamentou a eficiência energética dos motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo (BRASIL, 2002). Estes motores constituem cerca de 60% do consumo de energia na indústria (MME, 2007). O indicador de eficiência energética a ser utilizado foi o rendimento nominal (BRASIL, 2002), tendo indicadores mínimos para motores padrões e para motores de eficiência energética.

Segundo Geller (2003), as atuais fontes de energia e padrões de uso são insustentáveis. O consumo cada vez maior de combustíveis fósseis causará enorme dano ao meio ambiente, riscos sem precedentes a mudança do clima e esgotará rapidamente as reservas de petróleo. Enfatizando-se uma eficiência energética muito maior e ganhando-se confiança nas energias renováveis, todos os problemas relativos aos atuais padrões de uso de energia e suas tendências podem ser mitigados.

Os atuais programas de conservação de energia buscam uma economia progressiva no consumo de energia elétrica através de medidas de combate ao desperdício, tais como, utilização de aparelhos mais eficientes, dimensionamento correto de equipamentos, iluminação de alta eficiência e utilização de controladores de velocidade variáveis para motores, sendo assim, o uso de motores de alto rendimento e inversores de frequência vêm crescendo no cenário nacional (FINEP, 1989).

2 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica. Os tipos mais comuns de motores elétricos são:

a) **Motores de corrente contínua:** São motores de custo mais elevado e, além disso, precisam de uma fonte de corrente contínua, ou de um dispositivo que converta a corrente alternada da rede em contínua. Podem funcionar com velocidade ajustável entre amplos limites e se prestam a controles de grande flexibilidade e precisão. Por isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto da instalação.

b) **Motores de corrente alternada:** São os mais utilizados porque a distribuição de energia elétrica é feita normalmente em corrente alternada. Os principais tipos são:

Motor síncrono: Funciona com velocidade fixa; utilizado somente para grandes potências (devido ao seu alto custo em tamanhos menores) ou quando se necessita de velocidade invariável.

Motor de indução: Funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada a eixo. Devido a sua grande simplicidade, robustez e baixo custo é o motor mais utilizado de todos, sendo adequado para quase todos os tipos de máquinas acionadas, encontradas na prática (WEG, 2005).

O motor mais utilizado é o de indução trifásico, com rotor em gaiola de esquilo. Isto se deve ao fato de possuir uma construção robusta, sem partes faiscantes, exigindo pouca manutenção, baixo custo, facilidade de transporte, simplicidade de comando e grande versatilidade de adaptação a diferentes tipos de cargas. Possui poucas desvantagens tais como: não variar a velocidade, operação degradada em baixa carga e alta corrente de partida (AMERICO, 2003).

O MIT (motor de indução trifásico) responde por 75% dos motores existentes no Brasil (AMERICO, 2003). Dos 25% restantes, grande número se constitui de motores menores que 1 CV monofásicos, com aplicação em equipamentos residenciais como geladeira, ar-condicionado, máquina de lavar e ventiladores.

O maior obstáculo de aplicação do MIT era o fato de não apresentar variação de velocidade. Contudo, isso foi superado com o avanço da eletrônica de potência, que produziu os conversores de frequência, equipamentos que convertem a corrente alternada de frequência fixa em variável. Adicionalmente, estes equipamentos podem também servirem para economizarem energia (AMERICO, 2003; FILIPPO FILHO, 2000).

A Figura 1 mostra os principais componentes de um MIT.

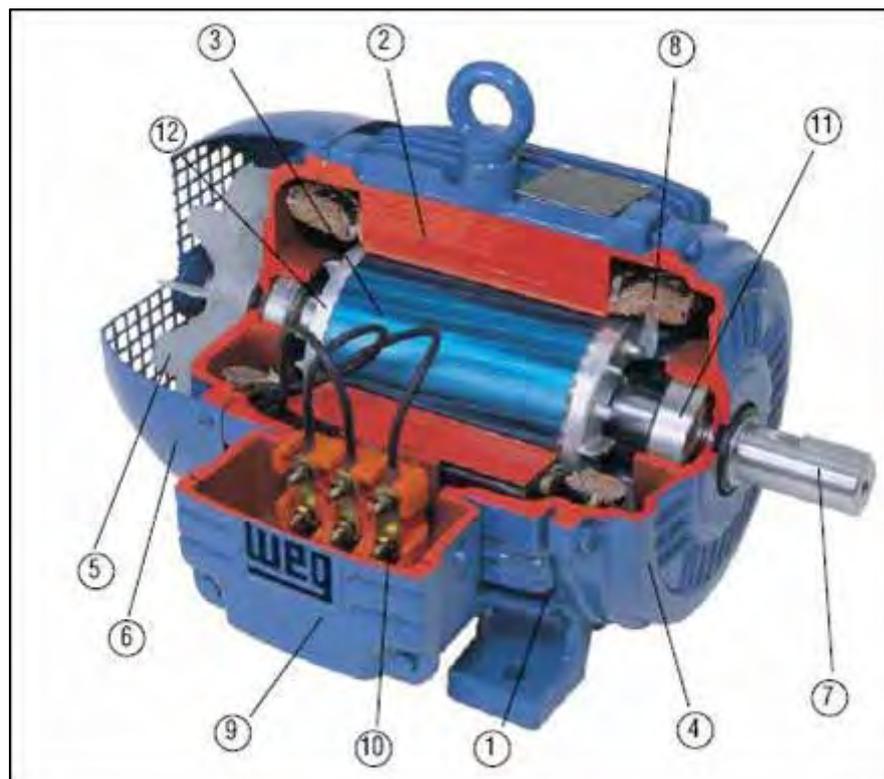


Figura 1. Principais componentes de um motor de indução trifásico (WEG,2005)

Os componentes da Figura 1 são identificados por:

Estatore

- Carcaça (1): estrutura suporte do conjunto; de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e com aletas.
- Núcleo de chapas (2): as chapas são de aço magnético, tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas no ferro.
- Enrolamento trifásico (8): três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico ligado à rede trifásica de alimentação.

Rotor

- Eixo (7): transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor. É tratado termicamente para evitar problemas como empenamento e fadiga.
- Núcleo de chapas (3): as chapas possuem as mesmas características das chapas do estator.
- Barras e anéis de curto-circuito (12): são de alumínio injetado sob pressão numa única peça.

Outras partes do motor de indução trifásico:

- Tampa (4).
- Ventilador (5).
- Tampa defletora (6).
- Caixa de ligação (9).
- Terminais (10).
- Rolamentos (11).

O princípio de funcionamento de um motor elétrico se baseia na Lei de Lenz (KOSOW, 1982, p. 300) que diz que quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente.

No motor trifásico, a distribuição das bobinas das três fases no estator, defasadas de 120° , faz com que a soma dos campos magnéticos provocados por cada uma delas seja um campo uniforme e girante. Este campo circula nos núcleos magnéticos do estator e do rotor, provocando nas barras do rotor uma circulação de corrente. Esta corrente rotórica gera, por sua vez, um campo magnético que tende a opor-se ao movimento que o gerou, de pólos opostos ao do estator. O resultado é que o campo do estator arrasta o rotor girando, entretanto, sempre a uma velocidade maior do que este (o rotor escorrega em relação ao campo girante) (KOSOW, 1982).

Quando uma carga é colocada no eixo do motor, o rotor reduz a sua velocidade, aumentando o escorregamento. Segue-se uma sucessão de eventos como o aumento da velocidade com que o campo magnético corta as barras do rotor, aumento da corrente do rotor, aumento do campo magnético gerado pelo rotor, diminuição do campo magnético total, aumento da corrente no estator e aumento da potência elétrica fornecida ao motor.

O motor, portanto, se auto-regula para atender à carga no eixo: se aumenta a carga, diminui a rotação, aumenta a corrente do motor e aumenta a potência elétrica fornecida (FILIPPO FILHO, 2000).

Apesar de ser uma máquina eficiente, o motor elétrico apresenta vários tipos de perdas, que, em geral, se dividem em perdas fixas, que não dependem do carregamento, e variáveis. (WEG, 2005).

As perdas fixas são:

- Perdas no ferro (núcleos): são as perdas devido à circulação do campo magnético – por histerese e correntes parasitas. Dependem da frequência da rede, da densidade do campo (quanto menos ferro, mais denso), da qualidade do aço (o aço silício é mais suscetível ao campo magnético), da espessura e isolamento das chapas. Representam de 15 a 25% do total de perdas, em operação nominal.
- Perdas mecânicas: perdas por atrito, nos mancais, e ventilação. Contribuem com 5 a 15%.

As perdas variáveis são:

- Perdas no estator: devidas ao efeito Joule pela circulação de corrente no enrolamento do estator, significam a maior parcela de perda em condição nominal: 25 a 40%. Dependem da bitola dos condutores e do comprimento das bobinas.
- Perdas no rotor: igualmente devidas ao efeito Joule nas barras e anéis do rotor, têm também uma contribuição significativa: 15 a 25%. Dependem do material (em geral, alumínio para motores em baixa tensão), seção e comprimento das barras.
- Perdas suplementares: são devidas a várias imperfeições na distribuição dos fluxos magnéticos e de corrente e geralmente medidas por subtração com relação às demais perdas. Podem ser reduzidas com um bom projeto do motor. Representam uma parcela menor nos motores de baixa tensão, 10 a 20%.

A Figura 2 ilustra os tipos de perdas em um MIT.

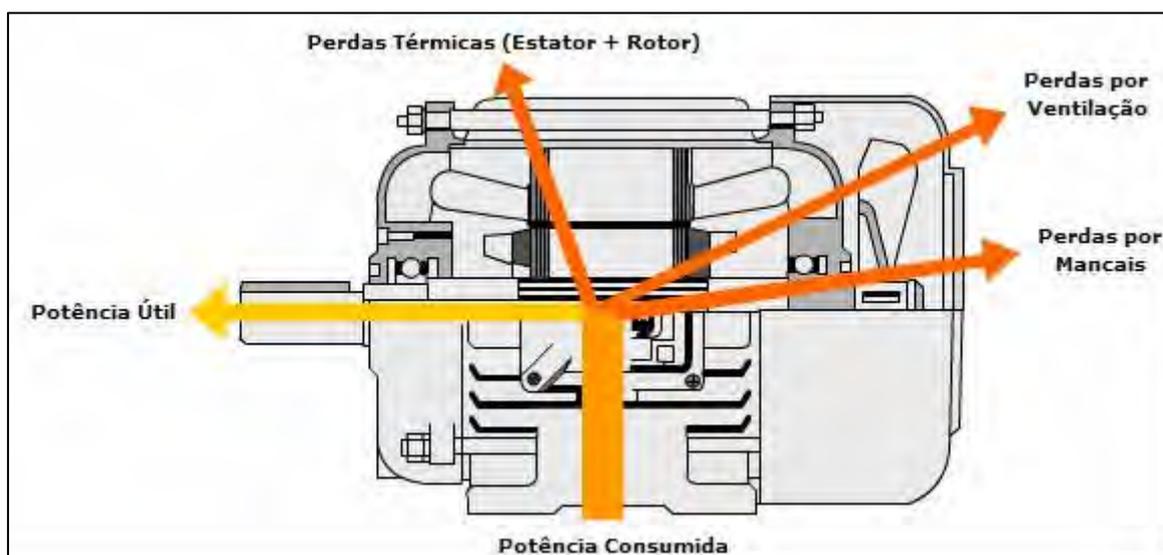


Figura 2: Perdas em um motor de indução trifásico

2.1 MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

Os motores de alto rendimento são motores projetados para fornecer a mesma potência útil do motor padrão, porém, consumir menos energia elétrica da rede. Eles são fabricados com algumas melhorias em relação ao motor padrão, diminuindo assim as perdas e aumentando seu rendimento (WEG, 2005). Com todas as melhorias o motor de alto rendimento possui um rendimento superior que varia de 2 a 6% (MOREIRA et al, 1998), porém, com um custo de aquisição maior, cerca de 20 a 30% (AMERICO, 2003).

Construtivamente os motores de alto rendimento possuem as seguintes características (WEG, 2005):

- Chapas magnéticas de melhor qualidade (aço silício);
- Maior volume de cobre, que reduz a temperatura de operação;
- Enrolamentos especiais, que produzem menos perdas estatóricas;
- Rotores tratados termicamente, reduzindo perdas rotóricas;
- Altos fatores de enchimento das ranhuras, que provêm melhor dissipação do calor gerado;
- Anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas Joule;
- Projetos de ranhuras do motor são otimizados para incrementar o rendimento.

O decreto nº 4.508 (BRASIL, 2002) especificou os rendimentos nominais mínimos para o motor padrão e o motor de alto rendimento, mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Rendimentos nominais mínimos

POTÊNCIA		PADRÃO				ALTO RENDIMENTO			
		Pólos				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	3,0	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		

Fonte: Decreto nº 4.508 (BRASIL, 2002).

Garcia (2003) mostra que motores podem chegar a rendimentos muito inferiores aos rendimentos nominais. Motor sobredimensionado, motor rebobinado, problemas de instalação, problemas na alimentação e problemas na manutenção são algumas causas apontadas.

Augusto (2001) diz que os critérios para o adequado dimensionamento de um motor são:

- Dimensionamento pelo critério de potência eficaz;
- Dimensionamento pelo critério do conjugado máximo;
- Dimensionamento pelo critério do conjugado motor;
- Dimensionamento pelo critério do tempo de aceleração;
- Dimensionamento pelo critério da potência disponível.

Segundo Garcia (2003), para verificar a oportunidade de eficiência energética em motores é necessário analisar o uso de motores de alto rendimento em duas situações principais: para um motor novo, a instalar, ou para substituir um motor já em operação. Na primeira hipótese, é quase sempre viável economicamente usar um motor de alto rendimento, pois a diferença de investimento é apenas entre os custos dos dois motores. Pode apenas não ser compensador em casos com baixíssima utilização do motor. Na segunda hipótese, o investimento a ser considerado é não só o custo total do motor de alto rendimento, mas também o custo de colocá-lo em funcionamento: estudo, compra, frete, eventual adaptação da base e acoplamento, eventual mudança no circuito elétrico (relé térmico), mão-de-obra para troca e condicionamento.

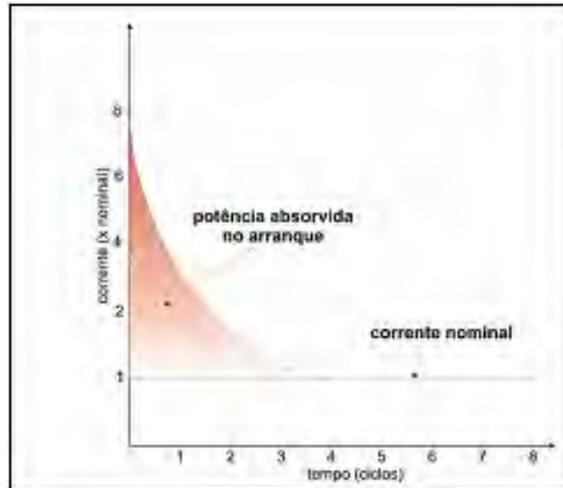
2.2 TIPOS DE ACIONAMENTO DOS MOTORES

Um momento delicado na operação do MIT é a aceleração inicial. Com o escorregamento muito alto, a corrente do motor é muito elevada, chegando tipicamente a oito vezes a corrente nominal. Isto pode causar problemas tanto à rede, provocando queda de tensão, quanto ao próprio motor. O tempo de aceleração é decisivo: ele pode ser igual a 1 segundo para bombas centrífugas e cargas com baixa inércia, mas pode chegar a mais de 30 s para ventiladores e centrífugas, que têm elevada inércia.

Entre as diversas formas de acionamento de motores, apresenta-se as opções mais utilizadas colocadas em ordem crescente de sofisticação e inovação tecnológica (GRUNDFOS, 1996):

2.2.1 Partida direta

O motor é ligado diretamente à rede elétrica. Esse método é o que desenvolve menos calor no motor, entretanto, desenvolve potência extremamente elevada durante a partida, conforme Figura 3. Esse método é utilizado apenas para motores com potência até 45kW e não permite variar a rotação do motor.

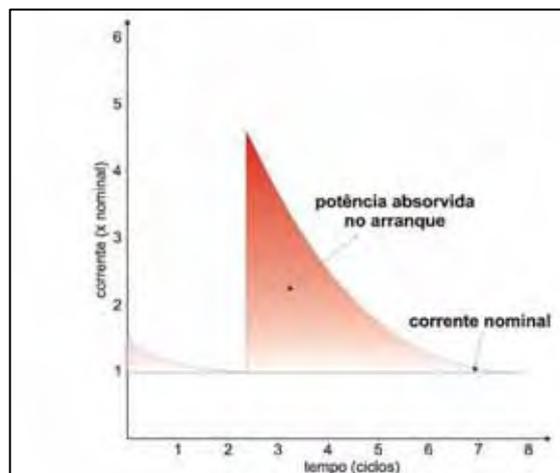


Fonte: Grundfos (1996)

Figura 3. Potência solicitada durante a partida de um motor elétrico na partida direta

2.2.2 Estrela-triângulo

O sistema de partida estrela-triângulo é o mais utilizado para acionamento de bombas centrífugas, por ser simples, seguro e barato. Durante a partida, a ligação dos pólos do motor é feita em estrela e, após um tempo fixo, automaticamente é feita a comutação para funcionamento em triângulo. Na posição estrela o valor da corrente é reduzido a um terço do valor da partida direta. A aplicação desse sistema de acionamento para bombas submersas com baixo momento de inércia não apresenta vantagens significativas. Uma desvantagem é a necessidade de utilização de um cabo adicional, que, no caso de poços com diâmetro reduzido, pode representar uma complicação. A Figura 4 apresenta a curva de acionamento com estrela-triângulo.

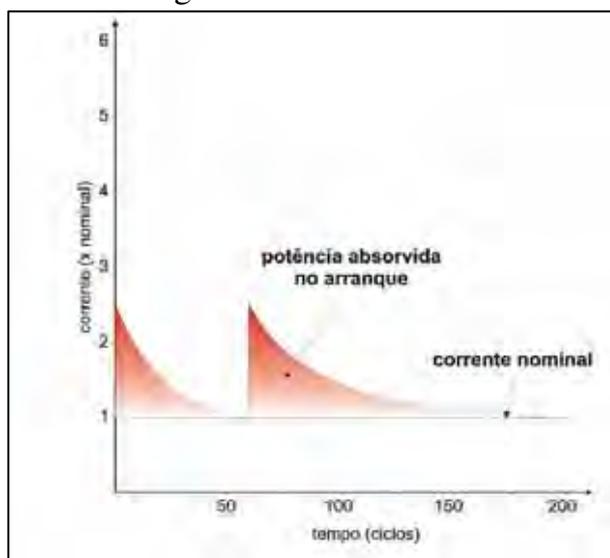


Fonte: Grundfos (1996)

Figura 4. Potência solicitada durante a partida de um motor elétrico com acionamento tipo estrela-triângulo

2.2.3 Autotransformador

Durante a partida, a tensão é reduzida por meio de autotransformadores. Os autotransformadores frequentemente possuem duas tensões de saída: uma de 75% e outra de 60%. Na opção de 60% a redução da corrente de partida é obtida pelo mesmo processo de ligação em estrela. Os equipamentos são mais seguros e mais caros que os anteriores e a principal vantagem do seu uso é que durante a partida, o pico de corrente é desdobrado em dois, conforme Figura 5.

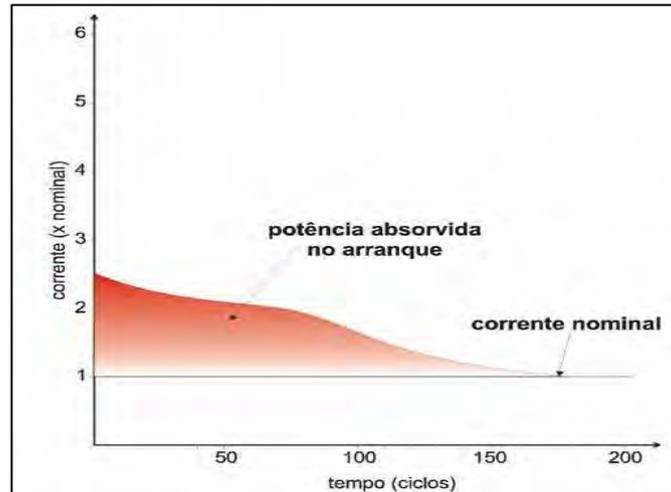


Fonte: Grundfos (1996)

Figura 5. Potência solicitada durante a partida de um motor elétrico com autotransformador

2.2.4 Partida suave

É obtida com um equipamento eletrônico que controla os ângulos de fase e, assim, reduz a tensão e, conseqüentemente, a corrente de partida para um valor duas a três vezes inferior ao valor de trabalho. A potência desenvolvida durante a partida é suavizada em função da rampa de aumento de tensão, conforme Figura 6, que deve ser curta o suficiente para não ocasionar o superaquecimento do motor.

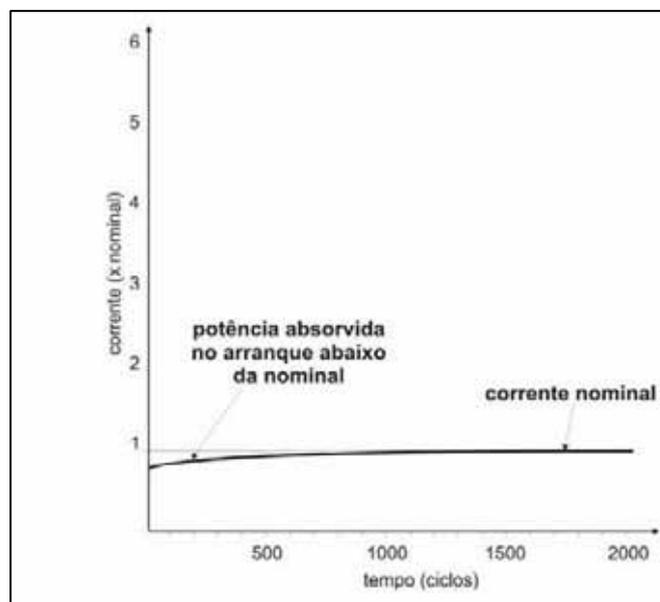


Fonte: Grundfos (1996)

Figura 6. Potência solicitada durante a partida de um motor elétrico com partida suave

2.2.5 Inversor (conversor) de frequência

É o método ideal de partida de motores elétricos, tanto para redução da corrente, que é mantida constante e equivalente à corrente nominal do motor, como para eliminação de oscilações bruscas de pressão na saída da bomba.



Fonte: Grundfos (1996)

Figura 7. Potência solicitada durante a partida de um motor elétrico com inversor de frequência

A relação entre a rotação, a frequência de alimentação, o número de pólos e o escorregamento de um motor de indução obedece à equação 1 (WEG, 2006).

$$n = \frac{120 f_1}{p} (1 - s) \quad (1)$$

n = velocidade de rotação mecânica (rpm);

f_1 = frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);

p = número de pólos;

s = escorregamento.

A análise da equação 1 mostra que se pode atuar em três parâmetros, no intuito de variar a velocidade de um motor de indução. As características de cada opção são discriminadas na Tabela 2 (WEG, 2006).

Tabela 2. Parâmetros e características dos tipos de variação de velocidade de um motor de indução

Varição de velocidade	
Parâmetro	Características
Número de pólos	<ul style="list-style-type: none"> • Variação discreta • Sobredimensionamento da carcaça
Escorregamento	<ul style="list-style-type: none"> • Variação contínua • Perdas rotóricas • Faixa de variação pequena
Frequência da tensão estatórica	<ul style="list-style-type: none"> • Variação contínua • Uso de Conversores

Os conversores estáticos de frequência transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina.

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 (CAPELLI, 2002).

O torque desenvolvido pelo motor de indução é dado pela equação 2. (WEG, 2006).

$$T = k_1 \times \phi_m \times I_2 \quad (2)$$

T = torque ou conjugado disponível na ponta do eixo (N.m);

ϕ_m = fluxo de magnetização (Wb);

I_2 = corrente rotórica (A);

k_1 = constante que depende do material e projeto da máquina.

O fluxo de magnetização (ϕ_m), desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos estatóricos é dado pela equação 3 (WEG, 2006).

$$\phi_m = k_2 \times \frac{V_1}{f_1} \quad (3)$$

V_1 = tensão estatórica (V);

k_2 = constante que depende do material e projeto da máquina;

f_1 = frequência (Hz).

Admitindo-se que a corrente depende da carga e que essa é constante (portanto, corrente praticamente constante), percebe-se, que variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação, o fluxo e, conseqüentemente, o torque permanecem constantes. O motor fornece assim um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica. As perdas podem ser minimizadas de acordo com as condições de carga, mantendo-se constante o escorregamento da máquina em qualquer velocidade, para a mesma carga (WEG, 2006).

Conforme Silva e Cortez (2001), o crescente desenvolvimento dos semicondutores de potência juntamente com a crescente oferta de microprocessadores e microcontroladores no mercado, tornaram o inversor de frequência uma excelente opção técnica-econômica para o controle de velocidade de motores elétricos, proporcionando uma maior facilidade de controle e economia de energia. Pode-se citar algumas vantagens do uso de inversores de frequência para controlar a velocidade de um motor de indução:

- **Controle a distância:** nos sistemas eletrônicos de variação de velocidade, o equipamento de controle pode situar-se em uma área conveniente, ficando apenas o motor acionado na área de processamento - ao contrário dos sistemas hidráulicos e mecânicos de variação de velocidade.
- **Redução de custos de manutenção:** partidas diretas ocasionam picos de corrente, que causam danos não apenas ao motor, mas também a outros equipamentos ligados ao sistema elétrico. Conversores estáticos proporcionam partidas mais suaves, reduzindo custos com manutenção.

- **Aumento de produtividade:** sistemas de processamento industrial geralmente são sobredimensionados na perspectiva de um aumento futuro de produtividade. Conversores estáticos possibilitam o ajuste da velocidade operacional mais adequada ao processo, de acordo com os equipamentos disponíveis e a necessidade de produção a cada momento.
- **Eficiência energética:** o rendimento global do sistema de potência depende não apenas do motor, mas também do controle. Os conversores estáticos de frequência apresentam rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Motores elétricos também apresentam alto rendimento, tipicamente de 70% em máquinas pequenas até 95% ou mais em máquinas maiores operando sob condições nominais. Na variação de velocidade, a potência fornecida pelo motor é variada de maneira otimizada, influenciando diretamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + conversor).
- **Versatilidade:** conversores estáticos de frequência são adequados para aplicações com qualquer tipo de carga. Com cargas de torque variável (pequena demanda de torque em baixas rotações), o controle reduz a tensão do motor compensando a queda de rendimento que normalmente resultaria da diminuição de carga. Com cargas de torque (ou potência) constante a melhoria de rendimento do sistema provém da capacidade de variar continuamente a velocidade, sem necessidade de utilizar múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade (como polias e engrenagens), que introduzem perdas adicionais.
- **Maior qualidade:** o controle preciso de velocidade obtido com conversores resulta na otimização dos processos. O controle otimizado do processo proporciona um produto final de melhor qualidade.

Hammond e Penteado (1997) argumentam que inversores apresentam algumas desvantagens em sua utilização, pois injetam uma quantidade significativa de harmônicos de corrente na rede e operam com fator de potência baixo quando a velocidade é reduzida.

3 QUALIDADE DE ENERGIA

A qualidade de energia é definida como ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensões, surtos e harmônicos (SILVA e CORTEZ, 2001).

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões são perfeitamente senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes, se considerarmos uma carga linear acoplada à rede. Em contrapartida, uma carga não linear provoca uma distorção na forma de onda de corrente e de tensão (IEEE, 1993).

Em geral as análises que orientam a implementação de programas de eficiência energética baseiam-se fundamentalmente em estudos de viabilidade econômica dos investimentos visando a diminuição dos custos operacionais da instalação. Ocorre, entretanto, que a implantação de projetos desta natureza normalmente leva a uma crescente utilização de equipamentos e dispositivos auxiliares baseados em acionamento a estado sólido, os quais, quando utilizados em grande escala acabam criando outros problemas do ponto de vista operacional, devida a perda de qualidade da energia elétrica ofertada. (TAKAHASHI et al, 1995).

Mammede Filho (1989) destaca que a energia elétrica que aciona as máquinas ou outros equipamentos industriais é composta, em geral de duas parcelas; energia ativa e energia reativa.

Quando a carga é aplicada a um motor elétrico, a potência aparente de alimentação se decompõe em potência ativa que é transformada em potência mecânica e em potência reativa que é necessária para manter o campo girante, cita Golovach (1967).

Fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentes das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem. Os sinais variantes no tempo devem ser periódicos e de mesma frequência. Quando os sinais forem puramente senoidais, ele é medido através do co-seno do ângulo de atraso da corrente em relação à tensão ($\cos\phi$). (GARCIA, 2003). Uma primeira indicação da presença significativa de harmônicos pode ser um fator de potência medido diferente do valor do $\cos\phi$. A atual regulamentação brasileira estabelece que o valor mínimo para o fator de potência das unidades

consumidoras alimentadas em baixa tensão é de 0,92, sendo de 0,9 para unidades produtoras (ANEEL, 2005).

Harmônicos é o nome dado para uma distorção na forma de onda do sinal elétrico que não possui somente a frequência fundamental em sua composição, mas também, sinais cujas frequências são múltiplas da fundamental (SILVA e CORTEZ, 2001).

Os harmônicos combinados com a frequência fundamental produzem uma forma de onda distorcida. As distorções harmônicas são devido às características não-lineares dos dispositivos e cargas no sistema. Estes dispositivos podem usualmente ser modelados como fontes de corrente que injetam correntes harmônicas no sistema. As distorções de tensão são o resultado da queda de tensão devido a passagem de uma corrente não linear sobre as impedâncias do sistema (HAFNER, 2006).

A Figura 8a mostra o sinal senoidal fundamental e sua quinta harmônica. Já a Figura 8b demonstra o sinal senoidal somado à sua quinta harmônica.

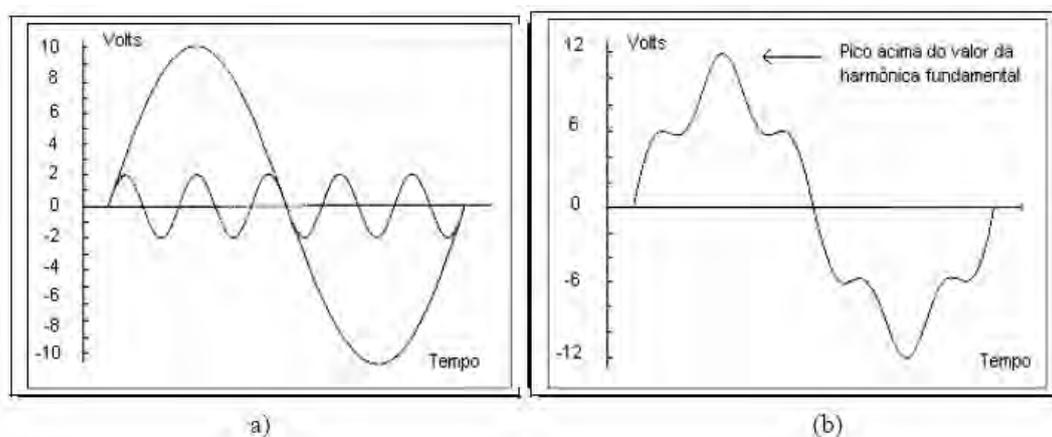


Figura 8: (a) Onda senoidal fundamental e sua 5ª harmônica. (b) Forma de onda resultante da soma dos dois sinais gerando uma onda com distorção

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal. Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental (como o 5º harmônico). Alguns pares de componentes harmônicas (por exemplo, 5ª e 7ª) podem

produzir oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a um potencial de excitação de ressonâncias mecânicas. (POMILIO, 2005).

Uma das formas de quantificar a distorção harmônica é através do cálculo da Distorção Harmônica Total (IEEE 519-1992) que representa a distorção devida a todos os harmônicos presentes em um sinal, sendo definida como uma porcentagem da frequência fundamental, mostrada pela equação 4 e pela equação 5.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (4)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (5)$$

Para lidar com esta preocupação de caracterizar correntes harmônicas de um modo consistente, a IEEE-519 (1992) define outro termo, a demanda de distorção total. A grandeza Demanda de Distorção Total (DDT) é definida como a distorção harmônica da corrente, em percentual da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 minutos). Isto significa que a medição da DDT deve ser feita no pico de consumo (POMILIO, 2005).

Correntes harmônicas circulando no sistema de distribuição aumentam as perdas elétricas no sistema e limitam a capacidade de transporte de demanda, além da possibilidade de ocorrência de ressonâncias harmônicas em determinados pontos do sistema, que podem provocar danos às instalações (sobretensões harmônicas).

Distorções harmônicas podem ainda provocar queima de capacitores e fusíveis, sobreaquecimento de motores e transformadores, vibração ou falha de motores, falha ou operação indevida de disjuntores, mal funcionamento de relés de proteção, problemas em controle de equipamentos, interferência telefônica, medições incorretas de energia elétrica, dentre outros defeitos (KAGAN et al, 2005).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), as medições de distorção harmônica nos sistemas elétricos trifásicos devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrado e fase-fase para as demais configurações e o

espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica.

A Tabela 3 mostra os valores máximos de THD de tensão exigidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

Tabela 3. Valores de referências no Brasil das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
$V_n < 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n < 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n < 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n < 138\text{kV}$	3

Fonte: (ANEEL, 2005)

Não há limites de valores de THD de corrente em normas brasileiras.

As normas internacionais que disciplinam esta matéria estão baseadas muito mais na realidade das plantas industriais do que em teorizações a respeito do tema, o que, aliás, é extremamente complexo por se tratar de análise de dispositivos não-lineares e suas conseqüências do ponto de vista da matemática envolvida.

No contexto internacional existem recomendações relativas ao monitoramento da qualidade de energia elétrica (IEEE-1159, 1995) e outras que estabelecem limites harmônicos para sistemas elétricos de energia em alta tensão (IEEE-519, 1992), e em sistemas a níveis de tensão de distribuição (IEC-61000, 1990). O aspecto fundamental e inovador da IEEE-519 (1992) é a divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária, e os limites de distorção de corrente, nesse mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Valores de referências globais das distorções harmônicas totais

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Corrente [%]	Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
$V_n < 69\text{kV}$	3,0	5
$69\text{kV} < V_n < 138\text{kV}$	1,5	2,5
$V_n > 138\text{kV}$	1,0	1,5

Fonte: (IEEE - 519, 1992)

Tabela 5. Valores de referências globais das distorções harmônicas totais (120V a 69kV)

$\frac{I_{\text{curto-circuito}}}{I_{\text{carga}}}$	Distorção Harmônica Total de Corrente [%]
<20	5
20-50	8,0
50-100	12,0
100-1000	15,0
>1000	20,0

Fonte: (IEEE - 519, 1992)

Os harmônicos pares são limitadas a 25% dos valores indicados nas tabelas para os harmônicos ímpares.

A norma europeia (IEC 61000-2-2, 1995), referência mundial para as medições dos níveis harmônicos em sistemas de distribuição, fornece as principais características da tensão, no ponto de entrega ao consumidor, em baixa e média tensão, sob as condições normais de operação (Tabela 6).

Tabela 6. Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa tensão – (IEC 61000-2-2)

Harmônicos ímpares não múltiplos de 3		Harmônicos ímpares múltiplos de 3		Harmônicos pares	
H	$V_h/V_1(\%)$	h	$V_h/V_1(\%)$	h	$V_h/V_1(\%)$
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+0,5*25/h$				

Para fins práticos, geralmente os componentes harmônicos de ordens elevadas (de 25 a 50) são desprezíveis para a análise de sistema de potência. Apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, elas usualmente não representam perigo aos sistemas de potência (DUGAN et al, 2002).

Controlar a presença das correntes harmônicas na instalação elétrica é fundamental e necessária para assegurar as seguintes condições (PROCOBRE, 2001):

- Garantir uma distribuição elétrica “limpa” com um baixo THD_i através da redução ou eliminação das correntes harmônicas;

- Obter valores de THD_V aceitáveis de modo a garantir que as cargas de uma instalação recebam uma alimentação praticamente senoidal;
- Possuir uma instalação que atenda os requisitos normativos existentes;
- Conseguir uma redução na demanda em kVA, evitando assim um sobredimensionamento das fontes de alimentação (transformadores e grupos geradores);

3.1 INFLUÊNCIA DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA NA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO MOTOR

Sendo o motor de indução, uma máquina robusta e de construção simples, a sua vida útil depende quase exclusivamente da vida útil da isolação dos enrolamentos. Esta é afetada por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus na temperatura da isolação acima de sua classe térmica, reduz sua vida útil pela metade (WEG, 2005).

Motores de indução podem apresentar uma elevação de temperatura maior quando alimentados por conversores do que quando alimentados com tensão senoidal. Essa sobrelevação de temperatura é decorrente do aumento das perdas do motor, em função das componentes de alta frequência do sinal PWM, aliada à reduzida transferência de calor decorrente da variação de velocidade.

As distorções harmônicas da forma de onda de tensão do motor alimentado por conversor contribuem para o incremento das perdas, uma vez que criam no aço magnético laços menores de histerese, aumentando a saturação efetiva do núcleo, além de gerarem correntes harmônicas de alta frequência, que acarretam aumento das perdas Joule nos condutores. No entanto, essas componentes de alta frequência não contribuem para a produção de torque do motor em regime, uma vez que não aumentam o fluxo fundamental no entreferro, que gira à velocidade síncrona. A operação do motor em baixas rotações provoca redução na ventilação e conseqüente perda de resfriamento, acarretando também a elevação de temperatura de estabilização térmica.

Quando se fala em diminuição da vida útil do motor, não se refere às temperaturas elevadas, quando o isolante se queima e o enrolamento é destruído repentinamente mas sim ao envelhecimento gradual do isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder isolante, até que não suporte mais a tensão aplicada e produza o curto-circuito.

Resultados na prática têm demonstrado que a isolação tem uma duração praticamente ilimitada, se a sua temperatura for mantida abaixo do limite de sua classe térmica. Acima deste valor, a vida útil da isolação vai se tornando cada vez mais curta, à medida que a temperatura de trabalho é mais alta. Este limite de temperatura é muito mais baixo que a temperatura de “queima” do isolante e depende do tipo de material empregado.

O que diferencia as classes de isolamento são os materiais isolantes utilizados. Os materiais e sistemas isolantes são classificados conforme a resistência à temperatura por longo período de tempo. Especifica-se que em um equipamento eletromecânico, a classe térmica representa a temperatura máxima que o equipamento pode alcançar no seu ponto mais quente, ao estar operando em carga nominal. A classificação térmica de um material ou sistema é baseada na comparação com sistemas ou material de referência conhecidos (WEG, 2005, 2006).

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme ABNT NBR-7034 (1981) são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7. Níveis de temperatura máxima para as classes de isolamento NBR-7034 (ABNT, 1981)

Classes de Isolamento	Temperatura máxima
Classe A	105 °C
Classe E	120 °C
Classe B	130 °C
Classe F	155 °C
Classe H	180 °C

4 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Os sistemas de abastecimento urbano de água são compostos geralmente pelas unidades de captação, tratamento, estação elevatória, adução, reservatórios, rede de distribuição e ligações prediais (GOMES, 2004).

A captação é a unidade que retira água em quantidade necessária e suficiente para atender ao consumo dos usuários. Pode ser o leito de um rio, um reservatório, artificial ou não, ou um poço artesianos. Consiste de obras civis que direcionam a água para o sistema de bombeamento. O tratamento da água bruta, tornando-a adequada para o consumo se dá nas estações de tratamento de água (ETA). Nela estão localizados sistemas de mistura, limpeza, laboratórios e instalações administrativas.

O transporte da água pode ocorrer por gravidade, por recalque ou de ambas as maneiras. Pode ser uma bomba ou um conjunto de bombas. É responsável pela maior parte do consumo de energia de todo o sistema de abastecimento de água. Pode localizar-se ao longo de todo o sistema, com o fim de bombear água bruta ou água tratada. No caso de “*boosters*” (bombeamento intermediário), serve como estação de transferência de energia potencial para a água, dando-lhe condição de atingir pressões ou alturas mais elevadas.

Os reservatórios são usados para regularizar o abastecimento. Conforme seu dimensionamento auxilia na redução do consumo de energia em horários cujo consumo seja mais caro (horário de ponta).

A rede de distribuição é formada por adutoras, que interligam os sistemas de captação e de tratamento com os reservatórios ou boosters. Enfim, interliga unidades da empresa, sem incluir as redes que abastecem os consumidores finais. Como consiste de tubos, válvulas, conexões e outros acessórios, não envolve consumo de energia, mas seu acabamento interno, posicionamento, comprimento, diâmetro e obstruções presentes influem decisivamente no dimensionamento dos sistemas de bombeamento. As interligações da rede de distribuição ao interior dos estabelecimentos consumidores de água são realizadas mediante as ligações prediais.

O conjunto de equipamentos consumidores de água: torneiras, tanques, chuveiros, bacias sanitárias, lavadores é o ponto final do sistema de abastecimento, sobre o qual a

empresa de abastecimento não tem controle. É exatamente sua demanda por água que determina o dimensionamento de todo o sistema de abastecimento e o consumo de energia.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DAS TURBOBOMBAS

As bombas hidráulicas são equipamentos que transformam trabalho mecânico, geralmente fornecido por uma máquina motriz, em energia hidráulica, comunicando ao líquido um acréscimo de energia sob as formas de energia potencial de pressão e cinética (MACINTYRE, 1987).

As bombas se classificam em duas categorias: turbobomba (bombas cinéticas) e bombas de deslocamento positivo (ELETROBRÁS, 2004). As bombas cinéticas fornecem energia à água sob forma de velocidade, transformando essa velocidade do fluido dentro da bomba em pressão, atingindo cotas mais elevadas. Nas bombas de deslocamento positivo não há troca de energia interna na massa líquida, sendo a vazão proporcional à velocidade do acionador da máquina (TSUTIYA, 2001).

As turbobombas são caracterizadas por possuírem um órgão rotatório dotado de pás, chamado rotor, que exerce sobre o líquido forças que resultam da aceleração que lhe imprime (MACINTYRE, 1987).

Segundo Macintyre (1987), as turbobombas podem ser classificadas conforme a trajetória do líquido no rotor, de acordo com o número de rotores, de acordo com a disposição do conjunto motor-bomba e em função da sua rotação específica.

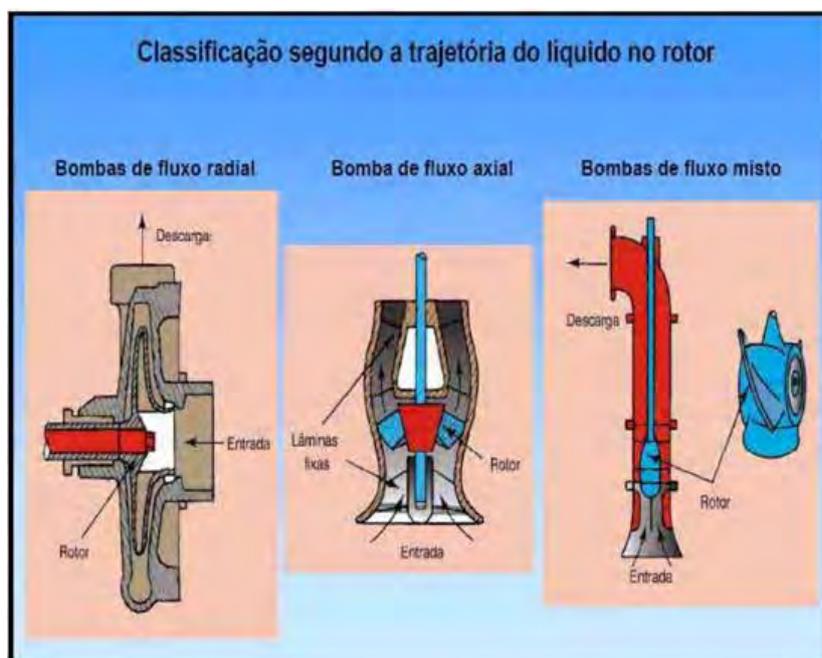
Pelo critério da trajetória do líquido no rotor, classificam-se em bombas centrífugas de fluxo radial, de fluxo axial e de fluxo misto.

Na bomba centrífuga radial o líquido penetra no rotor paralelamente ao eixo, sendo dirigido pelas pás para a periferia, seguindo trajetórias contidas em planos normais ao eixo. Pela sua simplicidade, se prestam à fabricação em série, sendo utilizada na maioria das instalações de água limpa, descargas de 5 a 500 l/s, para pequenas, médias e grandes alturas de elevação (MACINTYRE, 1987).

Nas bombas de fluxo axial o formato do rotor impõe um escoamento no sentido axial e são empregadas para recalcar grandes vazões e pequena altura de elevação (TSUTIYA, 2004).

Quando o formato do rotor impõe um escoamento simultâneo nos sentidos axial e radial tem-se bombas de fluxo misto, que são empregadas nos casos em que a altura de elevação seja relativamente baixa e a vazão elevada (TSUTIYA, 2004).

A Figura 9 ilustra a classificação das turbobombas.



Fonte: (TSUTIYA, 2004)

Figura 9. Classificação das turbobombas segundo a trajetória do líquido no rotor

Pelo critério do número de rotores, as turbobombas se classificam em bomba de simples estágio e bomba de múltiplo estágio. As bombas de simples estágio possuem somente um rotor, sendo o fornecimento de energia ao líquido feito em um único estágio. As bombas de múltiplos estágios possuem dois ou mais rotores fixados ao mesmo eixo. É utilizada quando se deseja uma altura de elevação grande (MACINTYRE, 1987).

Na classificação conforme a disposição do conjunto motor-bomba, tem-se o conjunto motor-bomba de eixo horizontal, o conjunto motor-bomba de eixo vertical (bombas submersas e bombas não submersas) e o conjunto motor-bomba submerso (PORTO, 2004).

As classificações das bombas em função da rotação específica de seus rotores pode ser obtida através da equação 6.

$$N_q = \frac{N \times Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (6)$$

N_q =rotação específica (rpm);
 N = rotação da bomba (rpm);
 Q = vazão (m^3/s);
 H = altura manométrica total (m).

Macintyre (1987), Porto (2004) e Tsutiya (2004) definem rotação específica como a rotação (em rpm) em que uma bomba, de uma dada geometria, produz uma vazão unitária ($1 m^3/s$) contra uma altura manométrica unitária (1 m), nas condições de máximo rendimento.

Macintyre (1987) e Porto (2004) também definem a rotação específica como a rotação (em rpm) em que uma bomba de uma dada geometria desenvolve uma unidade de potência (1CV) sob uma altura manométrica unitária (1m), nas condições de máximo rendimento e expressa de forma geral pela equação 7.

$$N_s = \frac{N \times P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (7)$$

N_s =rotação específica (rpm);
 N = rotação da bomba (rpm);
 P = potência (CV);
 H – altura manométrica total (m).

Macintyre (1987) classifica as turbobombas em relação à velocidade específica em:

- Lentas: $N_q < 90$
- Normais: $90 < N_q < 130$
- Rápidas: $130 < N_q < 220$
- Extra-rápidas: $220 < N_q < 440$.
- Helicoidais: $440 < N_q < 500$
- Axiais: $N_q > 500$.

4.2 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS BOMBAS

Segundo a Eletrobrás (2005a), para selecionar uma bomba é necessário calcular a vazão e a altura manométrica total (AMT) requerida. Para a caracterização de uma bomba são utilizadas quatro curvas: curva pressão em função da vazão, curva potência em função da vazão, curva rendimento em função da vazão e curva NPSH em função da vazão.

De acordo com Porto (2004), a vazão em sistemas de bombeamento urbano cresce ao longo do tempo, tornando inviável o dimensionamento para a vazão máxima, devendo recorrer à associação de duas ou mais bombas em série ou em paralelo. Para Tsutiya (2001), é necessário considerar períodos de projetos de 20 anos.

4.2.1 Curva da pressão em função da vazão

Essa curva representa a relação entre a vazão que a bomba é capaz de recalcar e a altura manométrica total “contra” a qual essa vazão pode ser recalçada.

É obtida a partir dos ensaios de pressão e vazão da bomba. Embora seja, teoricamente, uma parábola, devem-se descontar os efeitos do atrito, que mudam a curva teórica. Nos modelos simuladores, costuma ser interpolada por uma curva do segundo grau (parábola). Desde que se considerem apenas os pontos próximos ao ponto de funcionamento, essa aproximação não traz maiores problemas. Não deve, contudo, ser utilizada para toda a faixa de funcionamento dada pelo catálogo (ELETROBRÁS, 2005a). A Figura 10 ilustra a curva.

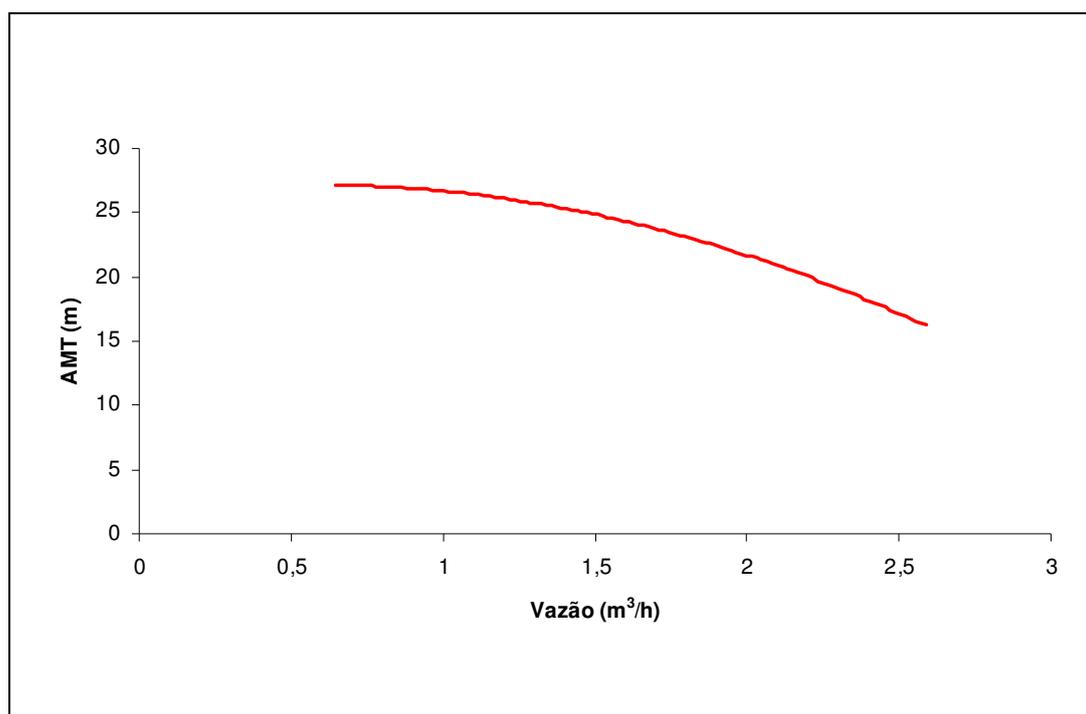


Figura 10. Curva da pressão em função da vazão

4.2.2 Curva da potência em função da vazão

Representa a relação entre a vazão bombeada e a potência necessária para tal. Vale uma observação sobre essa potência: ela é denominada usualmente de BHP (*Brake Horse Power*) e quer dizer a potência hidráulica absorvida pela bomba. É a potência que o motor deve fornecer ao eixo da bomba. Não é a potência que é demandada da concessionária de energia elétrica. Essa é o resultado da divisão da potência dada pelo catálogo do fabricante (BHP) pelo rendimento do motor e pelo fator de potência da instalação (ELETROBRÁS, 2005a). A Figura 11 mostra a curva.

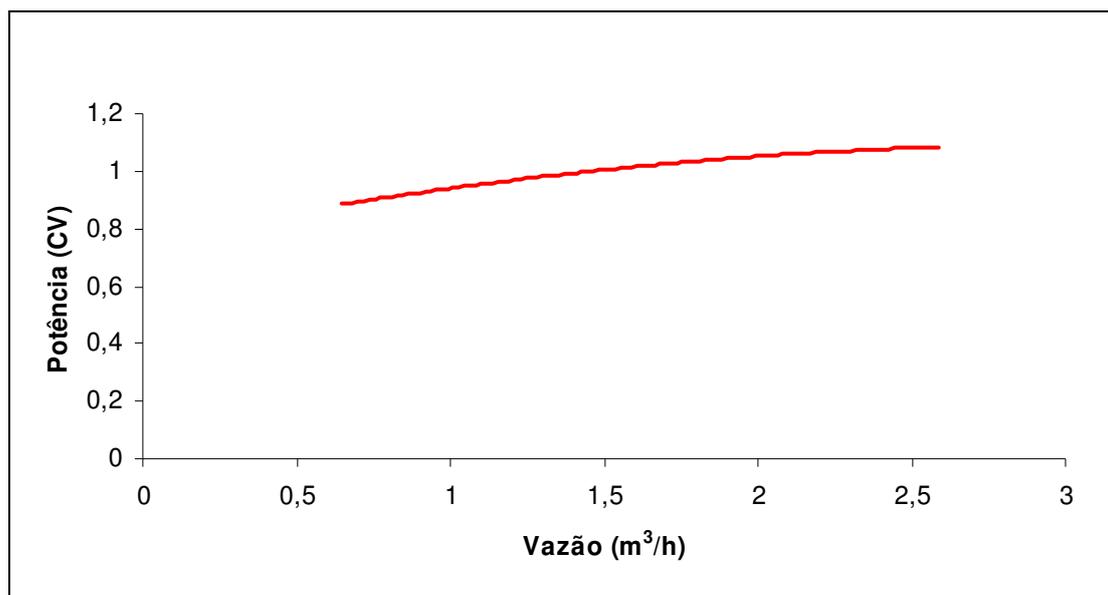


Figura 11. Curva da potência em função da vazão

4.2.3 Curva rendimento em função da vazão

É a curva que mostra a “região” do intervalo de vazões possíveis para a bomba, onde se dá o melhor rendimento (máximo da curva) e seu valor (ELETROBRÁS, 2005a). A Figura 12 ilustra a curva.

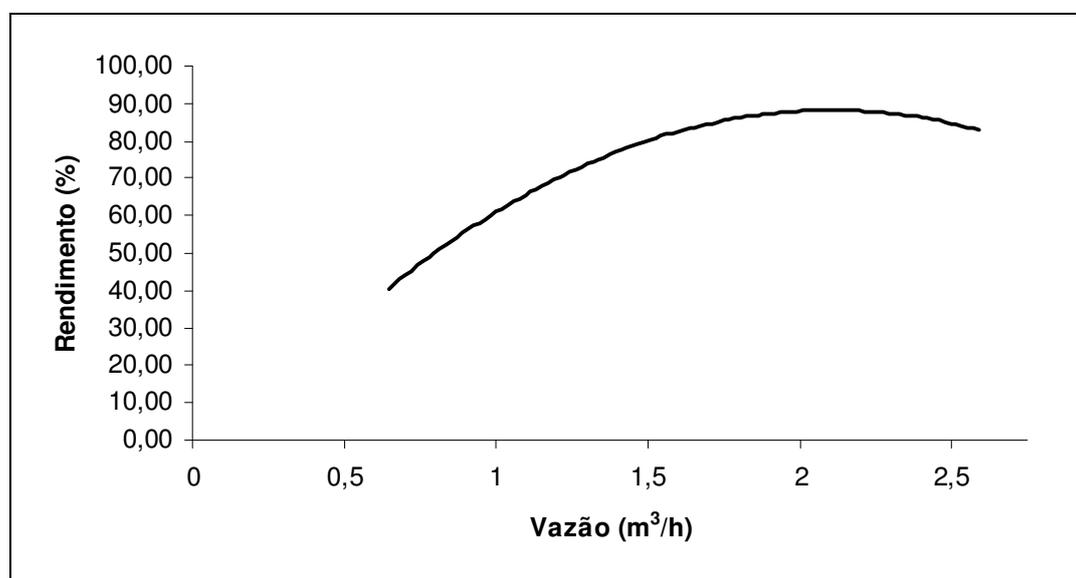


Figura 12. Curva do rendimento em função da vazão

4.2.4 Curva NPSH em função da vazão

No bombeamento de líquidos, a pressão em qualquer ponto da tubulação de sucção nunca deverá atingir o valor da pressão de vapor líquido em questão. Desta forma, como a entrada do rotor é a região onde se verifica o menor valor de pressão, alguns cuidados devem ser tomados para que este valor mínimo de pressão seja sempre maior que a pressão de vapor do líquido. A este valor de pressão (energia piezométrica) a ser garantido na entrada do rotor dá-se o nome de NPSH (*net positive suction head*).

Se a pressão na entrada do rotor atingir um valor menor que a pressão de vapor do líquido bombeado, ocorrerá a vaporização de parte do líquido. As partículas de vapor formadas na região de baixa pressão do rotor, ao atingirem a região de alta pressão na saída do rotor retornam instantaneamente à fase líquida, ocorrendo a implosão das partículas o que é feito com um grande desprendimento de energia, havendo violento choque das mesmas contra as paredes do rotor. Esta implosão é chamada de cavitação e causa a penetração das partículas nos poros do rotor provocando o arrancamento de material do mesmo.

O nível de ruído elevado e o aumento da vibração causado pela cavitação produzem rupturas na tubulação e nas suas junções devido à fadiga dos materiais (SISSOM e PITTS, 1988).

O NPSH disponível é a energia disponível no reservatório e o NPSH requerido é fornecido pelo fabricante e corresponde a um valor mínimo para não haver cavitação. Deve-se assegurar que o NPSH disponível seja sempre maior que o NPSH requerido (ELETROBRÁS, 2005a). A Figura 13 mostra a curva.

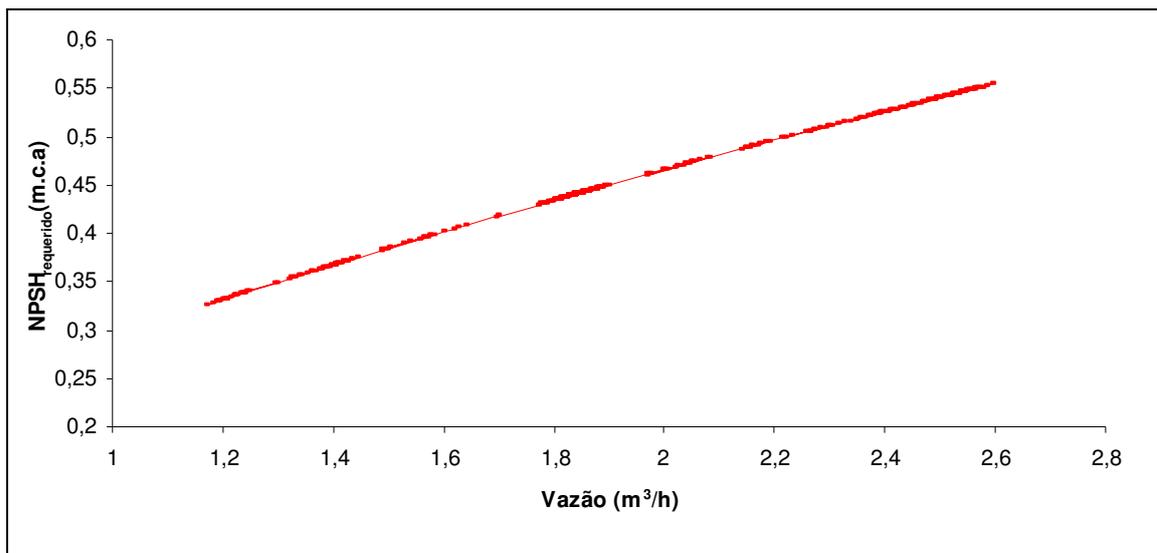


Figura 13. Curva NPSH em função da vazão

4.3 OPORTUNIDADES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO

O setor de saneamento no Brasil é responsável por cerca de 3% de todo o consumo nacional em energia elétrica, correspondendo a um custo anual de aproximadamente US\$ 900 milhões (SNIS, 2005). A energia elétrica é o segundo maior item de despesa nas empresas de saneamento do Brasil, perdendo apenas para gastos com recursos humanos. Outro ponto importante a destacar é que, do total de energia elétrica consumida no setor, cerca de 90% advém da utilização de conjuntos moto-bomba (BAHIA, 1998; GOMES, 2005; TSUTIYA, 2001).

A ineficiência no uso de energia elétrica, seja por uso de tecnologia obsoleta, seja por mal dimensionamento de equipamentos elétricos, tem influência direta na eficiência da operação dos sistemas de abastecimento de água. Por outro lado, a perda de água, por rompimento em adutoras ou extravasamento de reservatórios, influencia diretamente o consumo de energia elétrica desses sistemas.

No caso do Brasil, verificam-se elevados índices de perdas nos sistemas de abastecimento de água, compostas por perdas comerciais e técnicas, que variam entre 20% e 75% (SNIS, 2005).

Quality Tonnes (2004) registra que existe uma tendência internacional de crescimento da preocupação com a eficiência de sistemas de saneamento devido à grande

parcela do consumo de energia que esse setor representa. Desde 1998, com a assinatura do protocolo GHG (*Greenhouse Gás*) para a redução da emissão de gases e controle do efeito estufa, os planos de otimização da eficiência energética na área de saneamento adotaram como indicador o cálculo do consumo de energia por metro cúbico de água produzida (kWh/m^3) que é multiplicado pela carga de carbono da energia utilizada (CO_2 por kWh). O índice de consumo específico de energia é utilizado para aferir a eficiência energética de um sistema antes e após a implementação.

Segundo Camoirano e Dellepiane (2005), sistemas de bombeamento são fortes candidatos a receberem projetos de conservação de energia, visto que nesses sistemas são utilizadas geralmente válvulas para o controle de vazão, o que modifica a curva de carga, causando grande desperdício de energia e diminuindo a vida útil dos equipamentos.

James et al (2002) afirmam que o consumo de energia, na maioria dos sistemas de distribuição de água no mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25%, com adoção de medidas de eficiência energética e hidráulica.

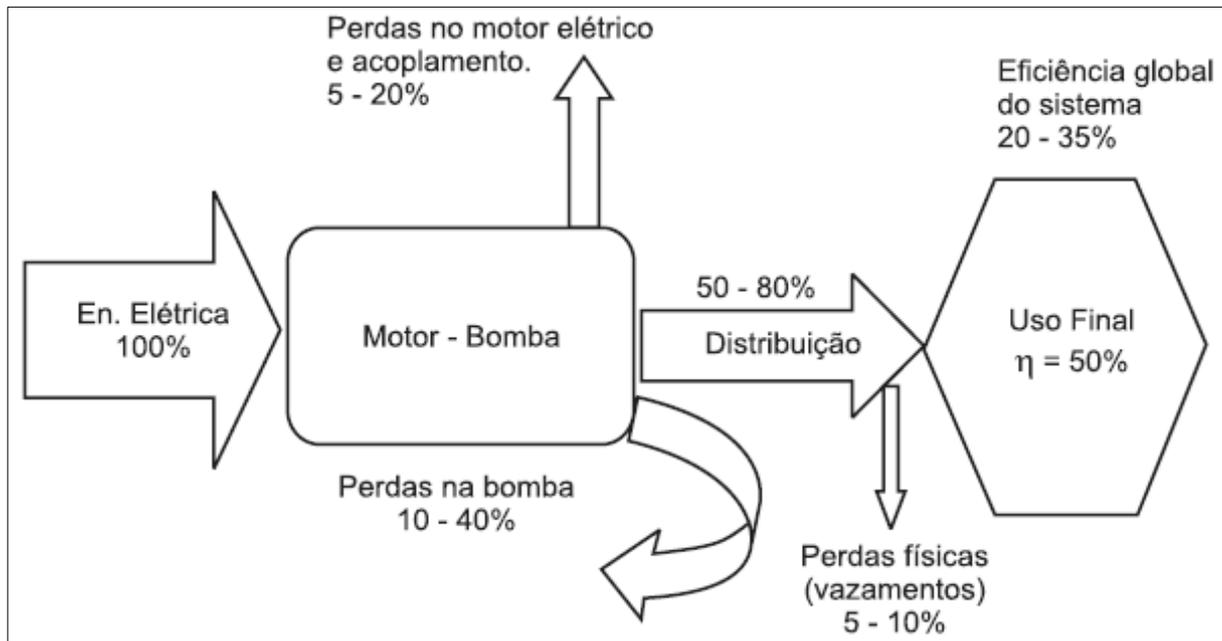
Para evitar a pressurização constante das redes de um sistema de distribuição de água em que a reservação não flutue, Walski et al (2004) sugeriu uma bomba de velocidade variável para o bombeamento direto aos consumidores.

De acordo com a Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES (2005), **cada valor monetário unitário investido em conservação de energia no Brasil evita oito vezes em novos investimentos necessários para a geração de energia elétrica**. Trata-se de um benefício estratégico para o país, cujo beneficiário é a nação como um todo.

A diminuição dos gastos com a energia elétrica da estação de bombeamento produzirá, na mesma proporção, uma diminuição do custo de produção de água de abastecimento, podendo levar a uma diminuição na tarifa de água cobrada ao consumidor (GOMES, 2005).

Para analisar a oportunidade do uso de motores de alto rendimento e de inversores de frequência é necessária uma análise econômica dos custos de investimentos, do tempo de funcionamento do equipamento, da economia de energia gerada e do tempo de retorno financeiro (MORENO et al. 2007).

Para identificar os pontos de oportunidades para um uso racional da energia em um sistema de bombeamento é importante ter o conhecimento do balanço energético característico deste sistema. A Figura 14 apresenta um balanço energético simplificado de um sistema de bombeamento, considerando apenas uma bomba centrífuga.



Fonte: Eletrobrás (2005b)

Figura 14. Balanço de energia em um sistema de bombeamento

Eletrobrás (2005b) cita algumas oportunidades de eficiência, tais como:

- Reduzir o desperdício de água;
- Reduzir as perdas por vazamento;
- Reduzir a altura manométrica;
- Aumento do diâmetro da tubulação para reduzir a perda de carga;
- Melhorar a rugosidade para reduzir a perda de carga;
- Deslocar o consumo de energia do horário de ponta;
- Melhorar o rendimento da bomba;
- Melhorar o rendimento do motor;
- Reduzir a vazão recalçada;
- Usar variadores de velocidade;
- Fazer a associação adequada de bombas;
- Eliminar os problemas de cavitação;
- Promover a automação;

- Fazer a adequação do contrato de energia;
- Reduzir o consumo próprio de água.

Portanto, Eletrobrás (2005b) sugere valores de economias que podem chegar quando do uso racional de energia em um sistema de bombeamento, apontados na Tabela 8.

Tabela 8. Oportunidades de economia em sistema de bombeamento

ÁREAS PARA MELHORIA	ENERGIA ECONOMIZADA
Uso final da água	Até 70%
Redução de vazamentos	15%
Melhoria da rugosidade	15%
Melhoria do rendimento do motor	5%
Melhoria do rendimento da bomba	5%
Variadores de velocidade	27%

Fonte: (Eletrobrás 2005b)

4.3.1 Controle de vazão em sistemas de bombeamento

Os métodos mais utilizados para o controle de vazão em sistemas de bombeamento são:

- *By-pass* na saída da bomba;
- Estrangulamento por válvula;
- Variação da velocidade do motor através de inversor de frequência.

4.3.2 By-pass na saída da bomba

Controle de by-pass é realizado pela abertura de uma válvula instalada no duto auxiliar da bomba. Conforme aumenta-se a abertura da válvula, diminui-se a vazão na tubulação de recalque. A Figura 15 mostra tal instalação.

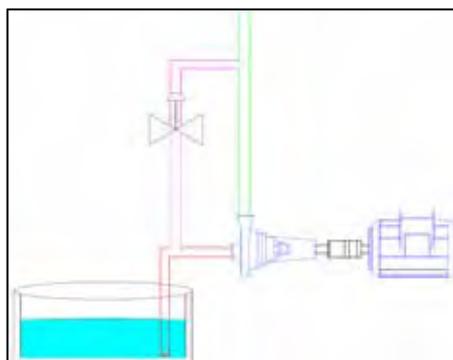


Figura 15. Instalação de uma válvula de by-pass

4.3.3 Válvula de estrangulamento

O controle de vazão por válvula é o mais utilizado em sistemas de bombeamento. Através de uma válvula instalada na tubulação de saída da bomba, é possível diminuir a vazão (BERNARDO, 1989; NETO E ALVAREZ, 1992). A Figura 16 mostra essa instalação.

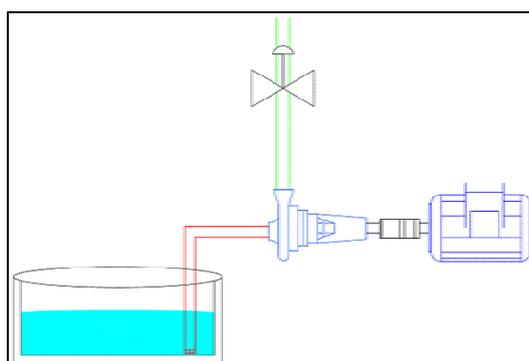


Figura 16. Instalação da válvula de estrangulamento

Segundo Tsutiya (2001) é possível reduzir a vazão da bomba até a vazão zero, porém, deve-se evitar que essa operação seja realizada, pois ocorre recirculação da água dentro da carcaça, provocando vibrações exageradas, aquecimento da carcaça e do motor. Uma sugestão é manter a vazão mínima acima de 20% da vazão máxima.

Keller e Bliesner (1990) mostra que é comum a instalação de válvulas ao longo da tubulação de bombeamento, obtendo valores de pressão necessários ao funcionamento dos equipamentos, porém, implicando em perdas de carga adicionais ao sistema.

4.3.4 Inversores de frequência

Conzett e Robeček (1983) sugere o uso de inversores de frequência para controlar a vazão da bomba, pois ele permite à bomba alterar seu ponto de trabalho sem introduzir perda de carga ou reduzir seu rendimento, proporcionando menor consumo de potência.

Os inversores são dispositivos que alteram eletronicamente a frequência da corrente elétrica e, conseqüentemente, a rotação dos motores de forma contínua e suave. A Figura 17 ilustra a instalação de um inversor de frequência para o controle da rotação de um motor em um sistema de bombeamento.

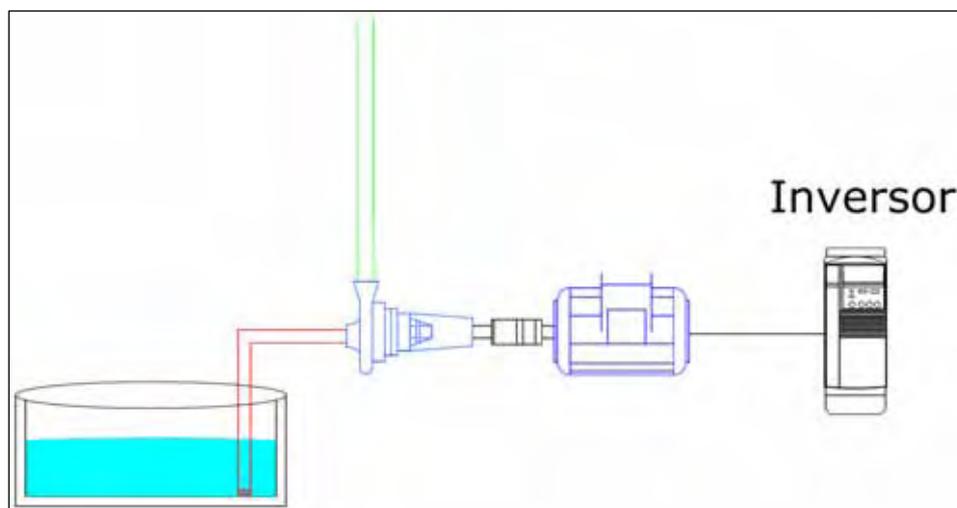


Figura 17. Instalação de um inversor de frequência

Através das leis de semelhança física de máquinas hidráulicas rotativas, as curvas de funcionamento de uma bomba centrífuga são alteradas, mudando assim o ponto de operação do sistema (MACINTYRE, 1987; SANKS, 1998; TSUTIYA, 2006).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (8)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (9)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (10)$$

N_1, N_2 = Velocidade de rotação da bomba;
 Q_1, Q_2 = Vazão da bomba;
 H_1, H_2 = Altura manométrica total da bomba;
 P_1, P_2 = Potência consumida da bomba.

Curtis (2005) e Eletrobrás (2004) demonstraram que uma redução de 10% nas velocidades de bombeamento com o uso de inversores de frequência representa 27% de economia de energia, de acordo com as leis de semelhança.

Os variadores de frequência são recomendados, segundo Willian e Kubik (1963), em sistemas onde a altura geométrica de recalque é menor que o somatório das perdas de carga ao longo da tubulação.

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

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

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

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

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo foram utilizados os recursos disponíveis no Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ, localizado na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP - Campus de Guaratinguetá.

A estação de simulação do sistema de bombeamento possui dois motores trifásicos assíncronos fabricante WEG, 2 pólos, 1,5CV, sendo um do tipo padrão e outro do tipo alto rendimento, uma bomba centrífuga da marca *Schneider*, modelo BC-92SHB, que tem sua vazão controlada por uma válvula de estrangulamento fabricante FOXWALL modelo RC-WCB tipo pneumática instalada na saída da tubulação, ou por inversor de frequência trifásico fabricante *Schneider Electric* modelo Altivar31. Há três opções de acionamento do motor, um *soft-start* trifásico fabricante *Schneider Electric* modelo Altistart, a partida direta através do contator da *Schneider Electric* modelo U com comunicação TCP/IP e o inversor de frequência. Todos os parâmetros da estação são controlados por um controlador lógico programável (CLP), fabricante *Schneider Electric* família TWIDO. Transmissores de pressão fabricante *Siemens*, transdutor de torque e rotação fabricante HBM e medidor de energia trifásico fabricante *Schneider Electric* modelo *Power meter series* também enviam sinais para o CLP. Todas as variáveis são monitoradas e controladas através de um Software Supervisório fabricante Indusoft, modelo *web studio* versão 6.1.

A fixação dos motores na bancada permite que os mesmos sejam permutados de posição, podendo optar pelo motor de alto rendimento ou pelo convencional. Os motores são acoplados diretamente à bomba centrífuga através de acoplamentos elásticos.

O CLP concentra as funções de comando das partidas, leitura dos parâmetros dos sensores, transmissores e dispositivos de aquisição de dados através de entradas e saídas digitais, entradas e saídas analógicas e porta de comunicação modbus.

A Comunicação entre o CLP e micro computador onde encontra-se instalado o *Software Supervisório* é Ethernet TCP-IP, padrão Modbus TCP. A comunicação entre o CLP e os acionamentos (partida suave, inversor de frequência e partida direta) e entre o

CLP e o medidor de energia é Modbus RTU. A Figura 18 mostra a arquitetura de rede da bancada de bomba centrífuga.

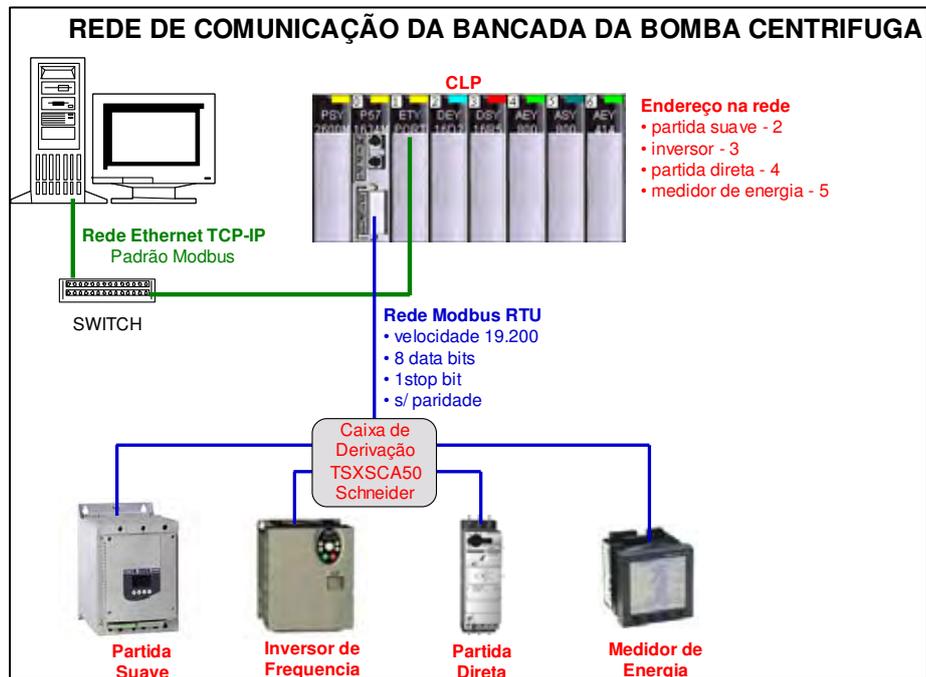


Figura 18. Arquitetura de rede da bancada de bomba centrífuga

A Figura 19 ilustra a instalação da bancada do sistema de bombeamento de água.



Figura 19. Bancada de bomba centrífuga

Para a medição de vazão foram utilizados uma placa de orifício e um transdutor de pressão diferencial (precisão de 0,5%), a medida de pressão foi realizada a partir de um transmissor de pressão manométrico (precisão de 0,5%), a rotação da bomba foi medida através de um transdutor de torque e rotação (classe de precisão 0,2%), a medição de temperatura nos enrolamentos e na carcaça do motor foi realizada através de sensores de temperatura do tipo PT100 instalados em cada enrolamento do estator (0,5%) e a medição das grandezas elétricas foi obtida a partir de um medidor de energia multifunção trifásico, medição True RMS (exatidão de 0,5%). Os dados foram registrados pelo CLP com uma integração de 250ms.

A Figura 20 ilustra o fluxograma da bancada do sistema de bombeamento mostrado pelo Software Supervisório.

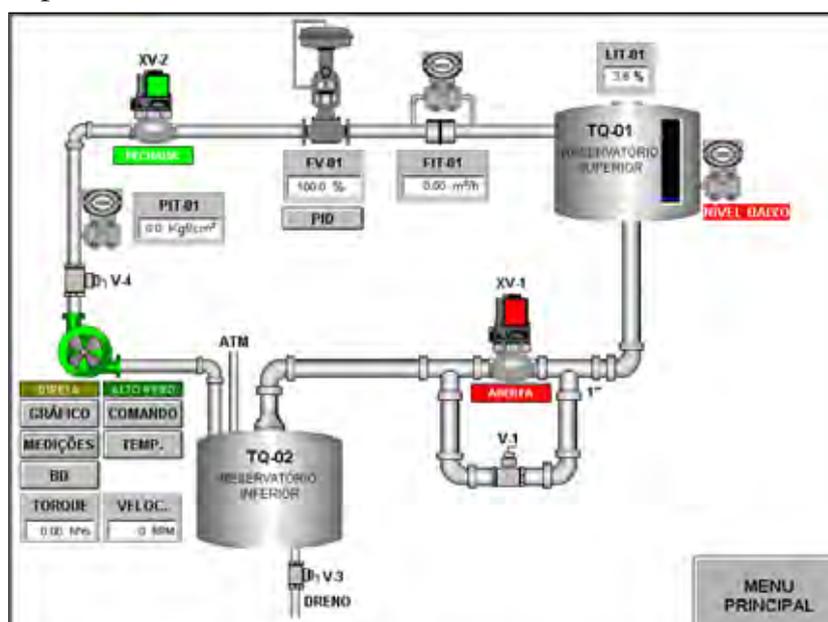


Figura 20: Fluxograma da bancada de bomba centrífuga mostrado pelo software supervisório

O conjunto moto bomba está instalado acima do reservatório inferior (sucção negativa). Na tubulação de recalque da bomba está instalado o transdutor de pressão (PIT-01), a válvula de estrangulamento (FV-01) e o medidor de vazão (FIT-01). O reservatório superior tem seu nível de água monitorado pelo medidor de nível (LIT-01).

A Figura 21 mostra a indicação das medições da temperatura nas três fases e na carcaça do motor.



Figura 21. Indicação da temperatura nas três fases e na carcaça do motor

O controle de vazão desta bancada pode ser realizado por meio da válvula de estrangulamento ou pelo inversor de frequência. As duas opções são realizadas no Software Supervisório através de um sistema PID, permitindo o usuário fazê-lo automaticamente ou manualmente, conforme ilustrado na Figura 22.

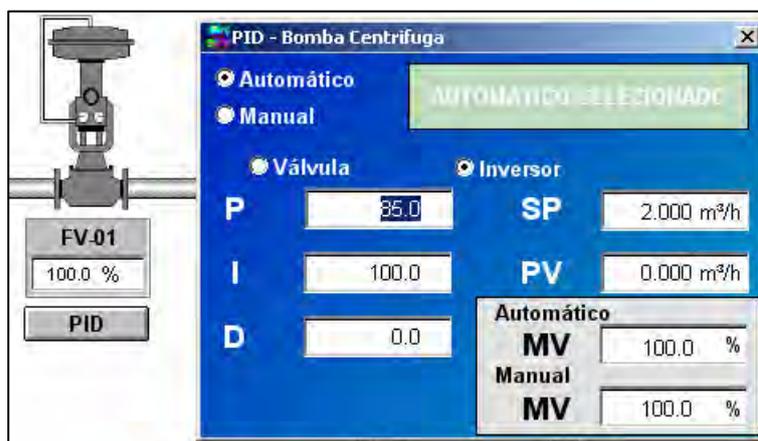


Figura 22. Indicação do controle da vazão – PID

Indicações:

P – controle proporcional (de 0 a 10.0000)

I – controle integral (de 0 a 10.0000)

D – controle derivativo (de 0 a 10.0000)

SP – *Set Point* (valor desejado em m³/h)

PV – Variável de processo (valor da vazão medida em m³/h)

MV – Variável manipulada (abertura da válvula de controle em %)

Faixas:

SP - 0 a 5 m³/h

MV - 0 a 100%

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para analisar os benefícios e as conseqüências das medidas de eficiência energética em um sistema de bombeamento realizou-se a comparação de dois tipos de controle de vazão para dois tipos de motores, identificando e quantificando os parâmetros de qualidade de energia elétrica.

6.1 CURVA DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA

Levantou-se o campo de funcionamento da bomba centrífuga a partir de medições de vazão e pressão.

Na realização das medições, o motor foi acionado em diferentes rotações através do inversor de frequência e a cada minuto fechou-se a válvula de estrangulamento de saída em 5%. Com isso o gráfico de pressão x vazão para quatro diferentes rotações foi construído e é mostrado na Figura 23 para o motor padrão e na Figura 24 para o motor de alto rendimento.

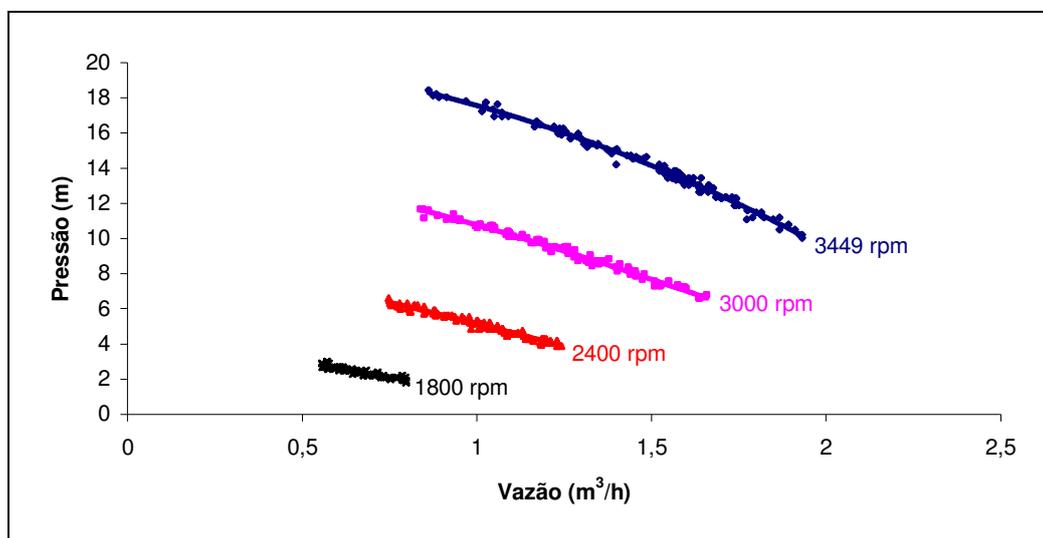


Figura 23. Curva de pressão em função da vazão considerando o motor padrão

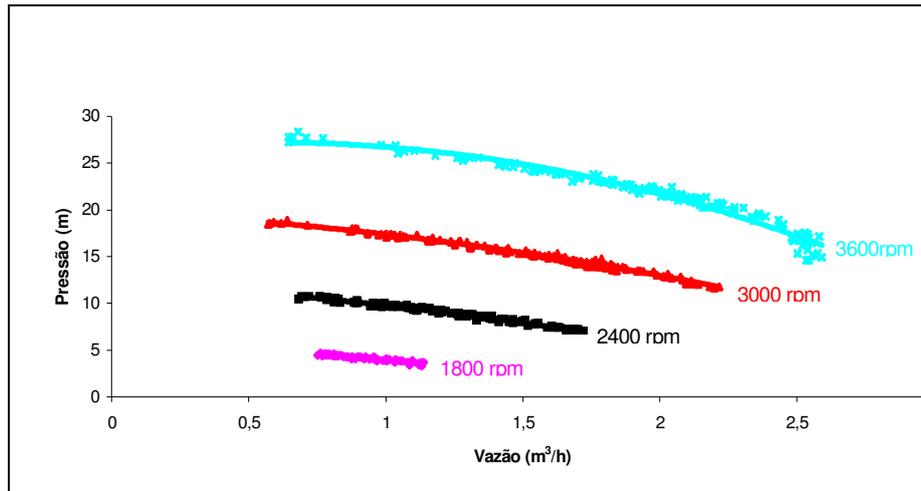


Figura 24. Curva de pressão em função de vazão considerando o motor de alto rendimento

Através das Figuras 23 e 24, observa-se que com o motor de alto rendimento alcança-se uma maior vazão. Isso se deve ao fato do mesmo possuir menor perda no rotor e com isso fornecer maior velocidade comparando com o equivalente padrão.

Para o levantamento da curva de potência mecânica em função da vazão foram medidos valores da potência ativa total e da vazão. Utilizou-se a equação 11 para a transformação da potência elétrica em potência mecânica.

$$Pot.elétrica = \frac{Pot.mecânica \times 736}{\eta_m} \quad (11)$$

Potência elétrica em watts.

Potência mecânica em cv.

$$1cv = 736W$$

η_m = rendimento do motor.

Para os rendimentos dos motores foram considerados os valores de placa: 83% para o motor de alto rendimento e 78,6% para o motor padrão.

O consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento com rotação constante é dado pela equação 12.

$$C = \frac{\gamma \times AMT \times V}{\eta \times 3600} \quad (12)$$

C =Consumo de energia elétrica (Wh);

γ : Peso específico do fluido (N/m^3);

V =Volume (m^3);

AMT: Altura manométrica total (m);

η : Rendimento do conjunto moto-bomba;

Através da equação 12, observa-se que o consumo de energia elétrica é proporcional ao volume de água, ou seja, o gráfico do consumo de energia elétrica em função do volume de água é uma reta.

Construiu-se o gráfico da potência mecânica em função da vazão para quatro tipos de rotação. A Figura 25 ilustra a curva para o motor padrão e a Figura 26 ilustra a curva para o motor de alto rendimento.

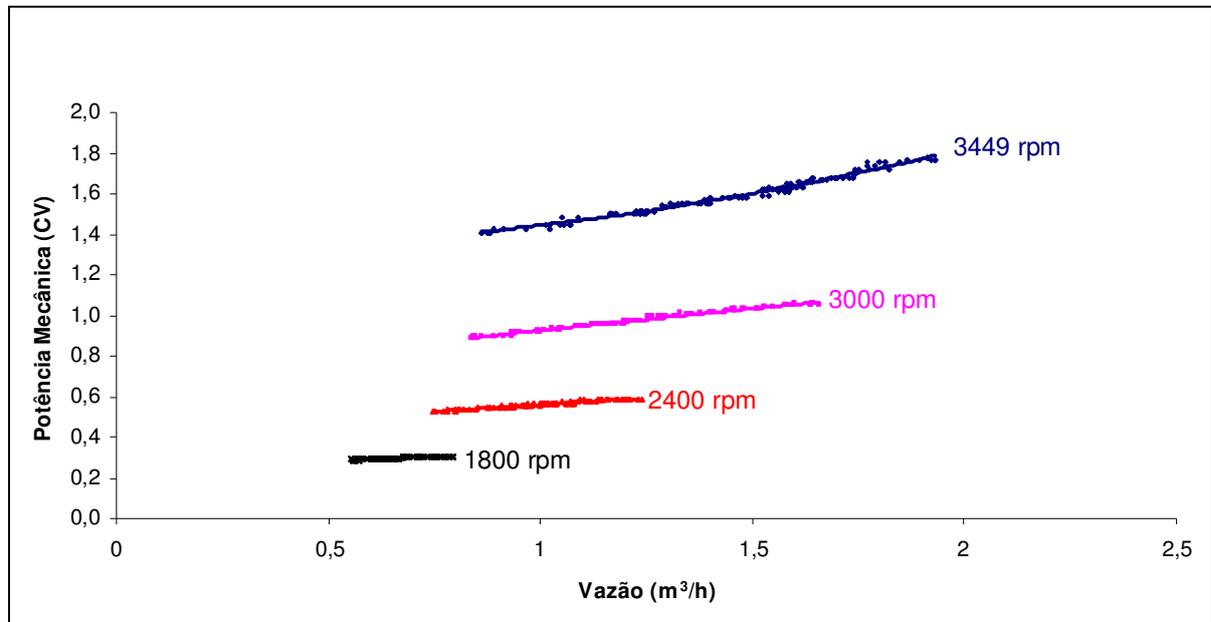


Figura 25. Curva potência x vazão para o motor convencional

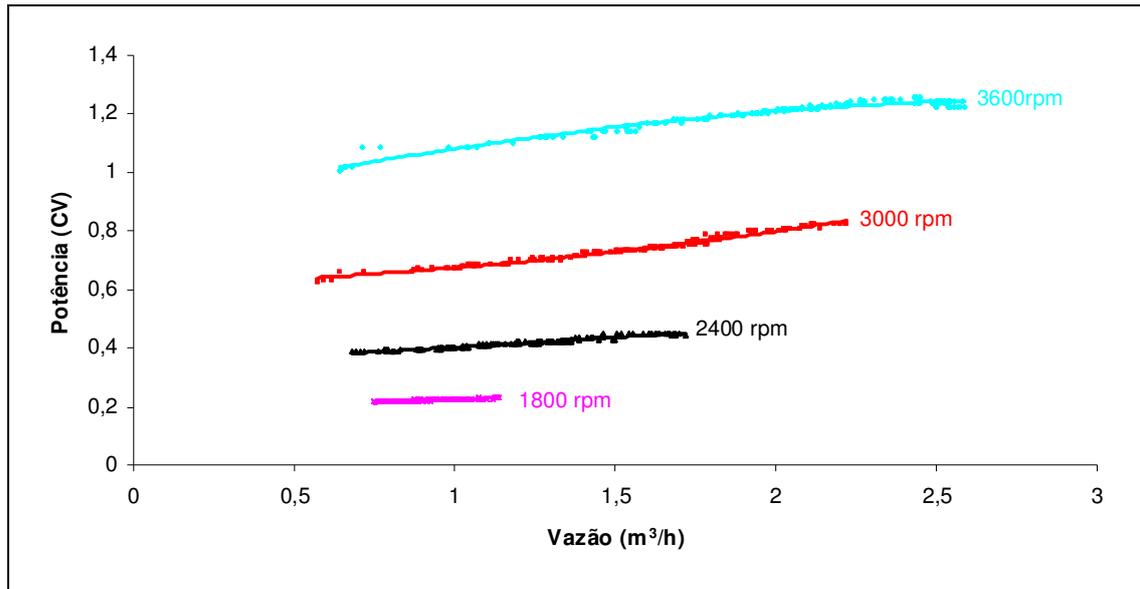


Figura 26. Curva potência x vazão para o motor de alto rendimento

Através das Figuras 25 e 26 observa-se uma maior potência mecânica consumida do motor convencional em relação ao motor de alto rendimento.

Levantou-se também a curva de NPSH requerido e disponível em função da vazão.

Como o líquido deve permanecer como tal (estado líquido) durante o bombeamento de modo a evitar os problemas causados pela cavitação, o cálculo do NPSH disponível é dado pela equação 13 (Eletrobrás, 2004).

$$NPSH_{DISP} = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - S - h_{fs} \quad (13)$$

P_{atm} = Pressão atmosférica (Pa);

P_v = Pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento (Pa);

S = Altura geométrica de sucção (m);

h_{fs} = Somatório das perdas de carga de sucção (m).

Um dos fatores que influencia o NPSH é o diâmetro da tubulação de sucção. A redução ou aumento do diâmetro resultará respectivamente no aumento ou diminuição da vazão (admitindo a mesma velocidade) e conseqüentemente aumento ou diminuição da perda de carga. Com isso tem-se, respectivamente o aumento ou diminuição do NPSH, conforme a equação 14: cálculo perda carga distribuída - Darcy-Weisbach (Eletrobrás, 2004).

$$\Delta H = Cf \times 0,0826 \frac{L \times Q^2}{D^5} \quad (14)$$

ΔH =Perda de carga distribuída;

L =Comprimento da tubulação(m);

Q =Vazão (m³/s)

D = diâmetro interno da tubulação (m).

Cf =Coeficiente de atrito;

O coeficiente de atrito é calculado pela equação 15 (Eletrobrás, 2004).

$$Cf = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{\epsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (15)$$

ϵ =Rugosidade absoluta: PVC=1,5*10⁻⁶ (m)

Re = número de Reynolds;

O número de Reynolds é dado pela equação 16 (Eletrobrás, 2004).

$$Re = \frac{v \times D}{\nu} \quad (16)$$

V =velocidade média do fluido (m/s);

D = diâmetro interno da tubulação (m).

ν = Viscosidade cinemática=1,007*10⁻⁶ m²/s

Para calcular a perda de carga localizada, utilizou-se a equação 17 (Eletrobrás, 2004).

$$\Delta h_i = Ki \times \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Ki = coeficiente de perda de carga;

v = velocidade (m/s)

Para o Cálculo de Ki foram consideradas as peças existentes. (NETO, 1973).

Válvula de pé:	1,75
Crivo	0,75
3 Curvas 90°	1,2
Ki TOTAL	3,7

Com isso o somatório das perdas de carga é dado pelo somatório da perda de carga distribuída com a perda de carga localizada.

Para o cálculo do $NPSH_{requerido}$, utiliza-se a equação de Pfleiderer, mostrada na equação 18 (Eletrobrás, 2004).

$$NPSH_{requerido} = \left[\left(\frac{n}{100} \right)^2 \times \frac{Q}{k * K} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (18)$$

n=rotação da bomba - rpm;

Q= vazão da bomba - m³/s;

k= coeficiente de redução da seção de entrada do rotor - 0,8;

K=coeficiente adimensional - 2,6 para bombas radiais;

A área da tubulação é dada pela equação 19 (Eletrobrás, 2004).

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (19)$$

Variou-se a válvula de entrada da bomba, obtendo-se os valores de vazão e da velocidade da bomba. A partir das equações 13 a 17 e equação 19, calculou-se o diâmetro da tubulação, a perda de carga localizada, o somatório das perdas de carga e os valores do $NPSH_{disponível}$.

Através da equação 18 calculou-se os valores do $NPSH_{requerido}$.

Com isso plotou-se os gráficos do $NPSH_{disponível}$ e do $NPSH_{requerido}$ em relação a vazão, conforme mostrado na Figura 27.

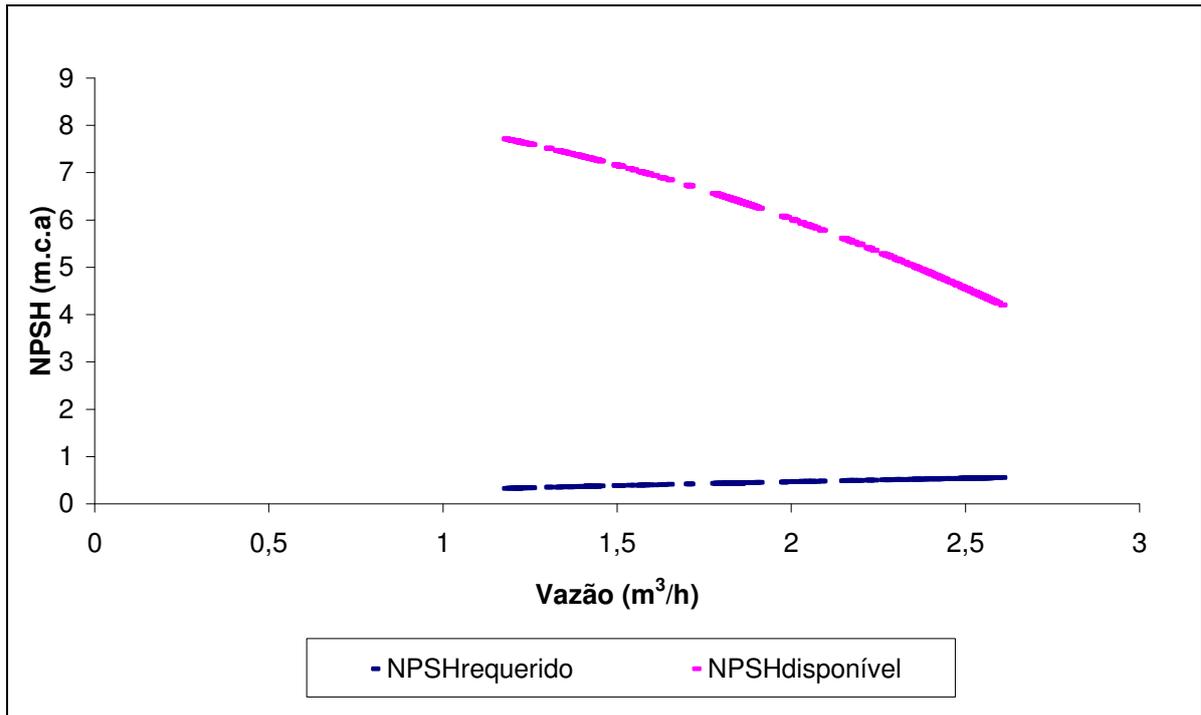


Figura 27. Gráfico do NPSH em função da vazão

Através da Figura 27, foi possível comprovar que não houve cavitação, já que o $NPSH_{\text{disponível}}$ foi sempre maior do que o $NPSH_{\text{requerido}}$.

6.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE CONTROLE DE VAZÃO

Em sistemas de bombeamento a vazão solicitada à bomba nem sempre é constante. Na maioria das vezes, para se obter a vazão requerida, as bombas operam em rotação constante e utilizam-se válvulas de estrangulamento na saída. Uma outra forma de se ter uma variação da vazão de saída é alterando a rotação do motor. Um dos modos utilizados é inserir um acionamento eletrônico (inversor de frequência).

Variou-se a vazão e mediu-se a potência elétrica consumida, construindo o gráfico da potência consumida em função da vazão, mostrado na Figura 28, com as quatro possibilidades: controle de vazão pela válvula com motor padrão, controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento, controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão e controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

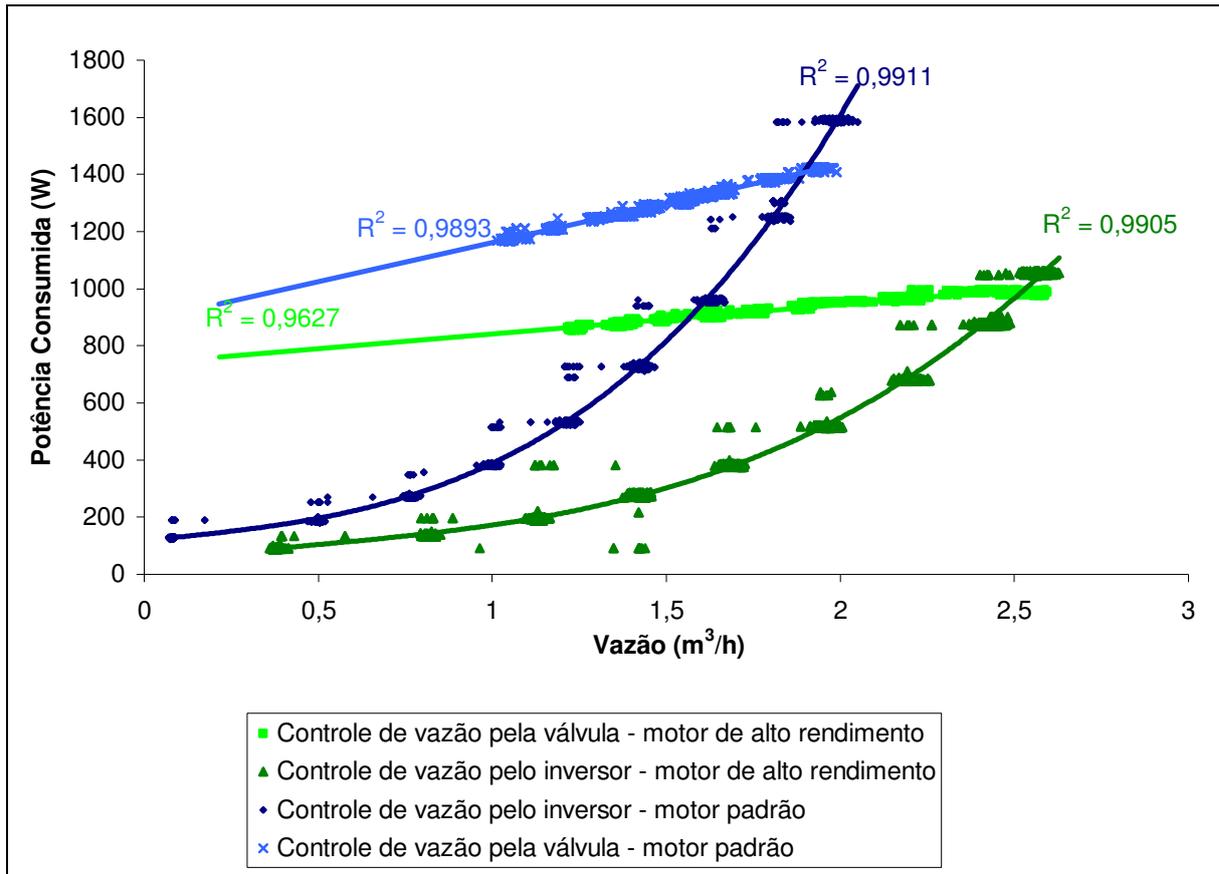


Figura 28. Curva de potência consumida em função da vazão para cada tipo de motor e para os dois métodos de controle de vazão

Na Figura 28, R^2 representa o coeficiente de correlação e indica o quanto os pontos encontram-se dispersos em relação à curva. Observa-se que os valores se encontram próximos à unidade, o que ressalta a qualidade do método utilizado.

Através da Figura 28, observa-se que quando o inversor opera a 60Hz, a sua utilização se torna inviável em relação à válvula de estrangulamento, isto se deve ao fato do inversor gerar uma quantidade significativa de harmônicos e com isso, consumir maior potência *True RMS* quando operado a 60Hz.

Para comparar os resultados de economia foi realizada a medição e verificação (M&V) com base no Protocolo Internacional de Medição e Verificação (IPMVP – *International Performance Measurement and Verification Protocol*) (MILANEZ, SOUZA, MESQUITA, 2001) e no Manual para elaboração do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2008).

6.3 PROTOCOLO DE MEDIÇÃO E VERIFICAÇÃO

O desenvolvimento do Protocolo Internacional de Medição e Verificação foi iniciado nos anos 1990 por um grupo de voluntários reunidos por iniciativa do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE-*Department of Energy*), motivado pelos baixos investimentos em projetos de eficiência energética devido às incertezas relacionadas às economias futuras a serem obtidas por meio dessas ações.

Em 1997 foi lançado o primeiro Protocolo Internacional de Medição e Verificação, tendo como vantagem não apresentar regras rígidas para cada ação de conservação de energia, ficando, portanto, a critério dos desenvolvedores de um Plano de Medição e Verificação a escolha da metodologia a ser adotada, adequada à situação encontrada no local (MILANEZ, SOUZA, MESQUITA, 2001).

6.3.1 Opções de medição e verificação

O Protocolo de Medição e Verificação apresenta quatro opções para realizar a M&V: *Retrofit* Parcialmente Isolado, *Retrofit* Isolado, Medição de toda a Instalação e Simulação Calibrada.

Neste caso foi utilizada a opção B – *Retrofit* Isolado, na qual as economias são determinadas por medições de campo do uso de energia dos sistemas ao qual a ação foi aplicada, em separado do uso de energia do restante da instalação. Foi escolhida a opção B, pois esta opção isola o impacto dos *retrofits* dos outros fatores que influem o uso de energia na instalação.

6.3.2 Fronteiras de medição e verificação

As fronteiras de medição são os volumes de controle que delimitam até onde se quer controlar a interação da Ação de Conservação de Energia (ACE) com o restante o sistema e ambiente. As fronteiras são determinadas por medidores, os quais isolam as variáveis do sistema a serem controladas do resto do sistema.

Neste projeto, a fronteira de medição foi a alimentação de energia elétrica da bancada. O medidor foi instalado conforme Figura 29.

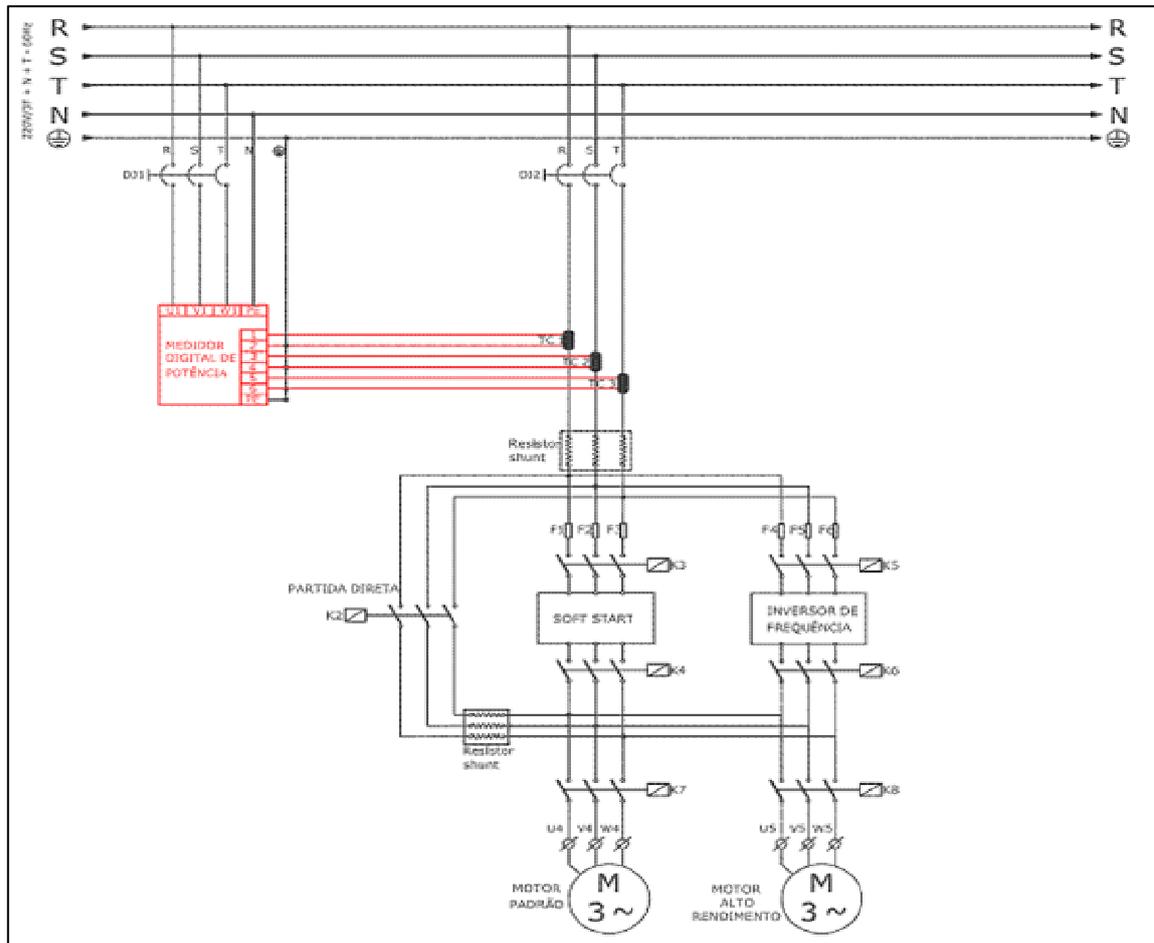


Figura 29. Instalação do medidor de energia – fronteira de medição

6.3.3 Parâmetros de influência

Os parâmetros de influência sobre o consumo de energia elétrica foram identificados e se subdividem em dois grupos:

1. Variáveis independentes: são aquelas que influenciam diretamente no consumo de energia elétrica. Neste projeto foi definida como variável independente o volume de água bombeado.
2. Fatores estáticos: são parâmetros que influenciam o consumo de energia elétrica mas que espera-se que não variem ao longo do tempo, como por exemplo, o tempo de funcionamento das bombas.

6.3.4 Extensão da medição

O ano base é um período definido de qualquer duração antes da implementação de uma Ação de Conservação de Energia (MILANEZ, SOUZA, MESQUITA, 2001).

6.3.5 Análise de dados - *Baseline*

A *Baseline* é o modelo matemático do conjunto de dados que representam a correlação entre o volume de água (variável independente) e o consumo de energia elétrica (variável dependente) durante o ano base.

Neste projeto foram medidas as tensões, as correntes, a potência elétrica, o fator de potência, o consumo de energia elétrica, a pressão e o volume de água bombeado para cada combinação de controle de vazão e motor.

A Tabela 9 mostra os valores do consumo de energia elétrica e o volume de água bombeada para cada situação. Mediu-se o consumo de energia com uma integração de 250ms e a cada minuto foi alterado a frequência do motor ou a abertura da válvula, sendo assim, a frequência do inversor variou de 60Hz a 20Hz e a abertura da válvula variou de 100% a 10%, sendo que em 100% a válvula estava totalmente aberta.

Tabela 9. Consumo de energia e volume de água bombeado para cada situação

Medição	Válvula + Motor padrão		Válvula + Motor AR		Inversor + Motor padrão		Inversor + Motor AR	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)
1	33,22	44,84	23,25	58,54	32,18	41,26	21,65	53,92
2	31,91	40,26	22,99	53,76	23,80	36,76	16,81	49,37
3	31,11	37,41	22,42	47,29	17,09	31,62	12,20	43,28
4	30,51	35,43	21,82	42,97	11,79	25,84	8,23	35,26
5	29,88	33,15	21,43	39,18	7,37	19,57	4,87	25,43
6	29,00	29,44	20,93	34,27	4,84	13,20	3,81	21,96
7	27,93	25,65	20,42	30,83	3,05	3,75	2,39	12,25
TOTAL	213,55	246,18	153,26	306,85	100,12	172,01	63,77	207,25

6.3.6 Ajuste da *Baseline*

A economia de energia elétrica é calculada através da equação 20.

$$\text{Economia} = \text{consumo baseline} - \text{consumo pós ACE} \pm \text{ajustes} \quad (20)$$

Ajustes de rotina são necessários para trazer o consumo de energia elétrica no ano base e no pós ACE (ação de conservação de energia) para a mesma base de dados.

Através dos valores mostrados na Tabela 9, contruiu-se o gráfico de correlação da *baseline*, mostrado na Figura 30.

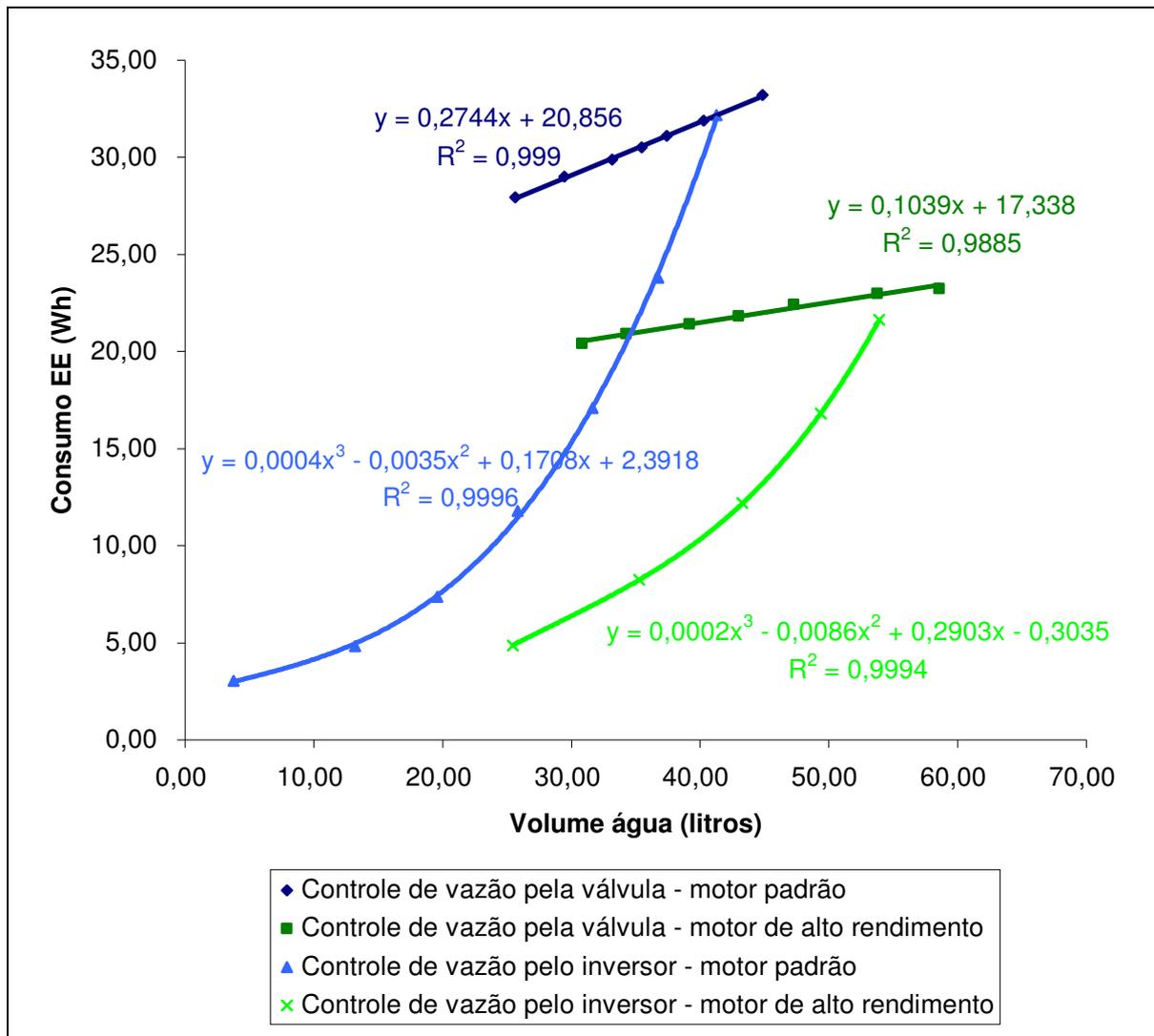


Figura 30. Gráfico da *baseline* para cada situação

As equações das curvas da Figura 30 representam o modelo matemático da *baseline*. Através dos valores da Tabela 9 e do modelo matemático de cada curva da *baseline* (Figura 30) foi possível ajustar os dados do pós ACE para a *baseline*.

Foi simulado seis situações de ACE:

1. Caso 1: substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão.

A Tabela 10 mostra os resultados encontrados para este caso.

Tabela 10. Consumo de energia evitado – Caso 1

Medição	Ano Base Válvula + MSTD		Pós Ace Inversor + MSTD		Ajuste <i>Baseline</i>		Economia Energia	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Equação Ajuste	Consumo (Wh)	Consumo (Wh)	%
1	33,22	44,84	32,18	41,26	$Y = 0,2744x + 20,856$	32,18	-0,01	-0,02
2	31,91	40,26	23,80	36,76		30,94	7,14	23,09
3	31,11	37,41	17,09	31,62		29,53	12,44	42,13
4	30,51	35,43	11,79	25,84		27,95	16,16	57,83
5	29,88	33,15	7,37	19,57		26,23	18,85	71,89
6	29,00	29,44	4,84	13,20		24,48	19,64	80,24
7	27,93	25,65	3,05	3,75		21,88	18,84	86,07
Total	213,55	246,18	100,12	172,01		193,19	93,08	48,18

2. Caso 2: substituição do controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

A Tabela 11 mostra os resultados encontrados para este caso.

Tabela 11. Consumo de energia evitado – Caso 2

Medição	Ano Base Válvula + MAR		Pós Ace Inversor + MAR		Ajuste <i>Baseline</i>		Economia Energia	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Equação Ajuste	Consumo (Wh)	Consumo (Wh)	%
1	23,25	58,54	21,65	53,92	$y = 0,1039x + 17,338$	22,94	1,28	5,60
2	22,99	53,76	16,81	49,37		22,47	5,66	25,19
3	22,42	47,29	12,20	43,28		21,83	9,63	44,12
4	21,82	42,97	8,23	35,26		21,00	12,77	60,80
5	21,43	39,18	4,87	25,43		19,98	15,11	75,61
6	20,93	34,27	3,81	21,96		19,62	15,81	80,59
7	20,42	30,83	2,39	12,25		18,61	16,22	87,14
TOTAL	153,26	306,85	69,97	241,46		146,45	76,48	52,22

3. Caso 3: substituição do controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão.

A Tabela 12 mostra os resultados encontrados para este caso.

Tabela 12. Consumo de energia evitado – Caso 3

Medição	Ano Base Válvula + MAR		Pós Ace Inversor + MSTD		Ajuste Baseline		Economia Energia	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Equação Ajuste	Consumo (Wh)	Consumo (Wh)	%
1	23,25	58,54	32,18	41,26	$Y = 0,1039x + 17,338$	21,63	-10,56	-48,82
2	22,99	53,76	23,80	36,76		21,16	-2,64	-12,49
3	22,42	47,29	17,09	31,62		20,62	3,53	17,13
4	21,82	42,97	11,79	25,84		20,02	8,24	41,14
5	21,43	39,18	7,37	19,57		19,37	12,00	61,94
6	20,93	34,27	4,84	13,20		18,71	13,87	74,15
7	20,42	30,83	3,05	3,75		17,73	14,68	82,81
Total	153,26	306,85	100,12	172,01		139,24	39,12	28,10

4. Caso 4: substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento.

A Tabela 13 mostra os resultados encontrados para este caso.

Tabela 13. Consumo de energia evitado – Caso 4

Medição	Ano Base Válvula +MSTD		Pós Ace Válvula + MAR		Ajuste Baseline		Economia Energia	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Equação Ajuste	Consumo (Wh)	Consumo (Wh)	%
1	33,22	44,84	23,25	58,54	$y = 0,2744x + 20,856$	36,92	13,67	37,03
2	31,91	40,26	22,99	53,76		35,61	12,61	35,42
3	31,11	37,41	22,42	47,29		33,83	11,41	33,72
4	30,51	35,43	21,82	42,97		32,65	10,83	33,16
5	29,88	33,15	21,43	39,18		31,61	10,18	32,20
6	29,00	29,44	20,93	34,27		30,26	9,33	30,84
7	27,93	25,65	20,42	30,83		29,31	8,90	30,36
TOTAL	213,55	246,18	153,26	306,85		230,19	76,93	33,42

5. Caso 5: substituição do controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

A Tabela 14 mostra os resultados encontrados para este caso.

Tabela 14. Consumo de energia evitado – Caso 5

Medição	Ano Base Inversor + MSTD		Pós Ace Inversor + MAR		Ajuste Baseline		Economia Energia	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Equação Ajuste	Consumo (Wh)	Consumo (Wh)	%
1	32,18	41,26	21,65	53,92	$y = 0,0004x^3 - 0,0035x^2 + 0,1708x + 2,3918$	32,18	10,53	32,72
2	23,8	36,76	16,81	49,37		23,8	6,99	29,37
3	17,09	31,62	12,2	43,28		17,09	4,89	28,61
4	11,79	25,84	8,23	35,26		15,75	7,52	47,75
5	7,37	19,57	4,87	25,43		6,88	2,01	29,22
6	4,84	13,2	3,81	21,96		5,11	1,3	25,44
7	3,05	3,75	2,39	12,25		2,77	0,38	13,72
TOTAL	100,12	172,01	69,97	241,46		103,58	86,2	32,45

6. Caso 6: substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

A Tabela 15 mostra os resultados encontrados para este caso.

Tabela 15. Consumo de energia evitado – Caso 6

Medição	Ano Base Válvula +MSTD		Pós Ace Inversor + MAR		Ajuste Baseline		Economia Energia	
	Consumo (Wh)	Volume (L)	Consumo (Wh)	Volume (L)	Equação Ajuste	Consumo (Wh)	Consumo (Wh)	%
1	33,22	44,84	21,65	53,92	$y = 0,2744x + 20,856$	35,65	14,00	39,26
2	31,91	40,26	16,81	49,37		34,40	17,59	51,14
3	31,11	37,41	12,20	43,28		32,73	20,53	62,72
4	30,51	35,43	8,23	35,26		30,53	22,30	73,04
5	29,88	33,15	4,87	25,43		27,83	22,96	82,49
6	29,00	29,44	3,81	21,96		26,88	23,07	85,83
7	27,93	25,65	2,39	12,25		24,22	21,82	90,11
Total	213,55	246,18	69,97	241,46		212,25	142,28	67,03

A Tabela 16 mostra todos os casos estudados e seus respectivos resultados.

Tabela 16. Consumo de energia evitado – todos os casos estudados

	ANO BASE	PÓS ACE	ECONOMIA (MWh)	%
Caso 1	Válvula + MSTD	Inversor + MSTD	93,08	48,18
Caso 2	Válvula + MAR	Inversor + MAR	76,48	52,22
Caso 3	Válvula + MAR	Inversor + MSTD	39,12	28,10
Caso 4	Válvula + MSTD	Válvula + MAR	76,93	33,42
Caso 5	Inversor + MSTD	Inversor + MAR	86,2	32,45
Caso 6	Válvula + MSTD	Inversor + MAR	142,28	67,03

O Caso 6 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento) ocasionou-se na maior economia anual de energia elétrica, resultando em 67% de economia. O Caso 3 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão) resultou no pior resultado (28,1%).

Para analisar a redução de demanda, foi medida a demanda máxima em cada situação. A Tabela 17 mostra os resultados.

Tabela 17. Potência máxima das quatro situações possíveis da bancada

Descrição da situação		Potência máxima (W)
Motor Padrão	Controle de vazão pela válvula	1.424,84
	Controle de vazão pelo inversor de frequência	1.599,03
Motor de alto rendimento	Controle de vazão pela válvula	993,38
	Controle de vazão pelo inversor de frequência	1.061,62

Observa-se que a utilização do inversor de frequência demanda uma maior potência consumida em relação ao controle pela válvula para o mesmo motor. Isto se deve ao fato do inversor a 60Hz (vazão máxima) ter uma potência maior do que a válvula operando totalmente aberta (vazão máxima) (Figura 28).

Através da Tabela 17 observa-se que a simples substituição do motor padrão para o motor de alto rendimento ocasiona uma redução de potência de 30,28% para o controle de vazão pela válvula e 33,61% para o caso do controle de vazão pelo inversor de frequência.

6.4 ANÁLISE ECONÔMICA

Para analisar a viabilidade econômica, foram calculados índices objetivando a informação da atratividade do investimento. Não foi levado em consideração o preço da mão de obra visto que essa varia de acordo com o local. A análise econômica foi

realizada levando em consideração que o projeto faz parte do Programa de Eficiência Energética da ANEEL.

O tempo de retorno simples é o índice mais difundido no meio técnico para análises de viabilidade. Esse índice não leva em consideração a taxa de juros. Esta análise foi feita apenas dividindo-se o custo da implantação pelo benefício auferido.

A taxa de desconto considerada na avaliação financeira foi de 8% a.a. Esta taxa tem por base o Plano Decenal de Expansão 1999/2008 aprovado pela Portaria MME nº 151, de 10 de maio de 1999 (ANEEL, 2008).

O valor presente líquido (VPL) é a diferença entre os valores presentes totais dos custos e dos benefícios, ele se torna economicamente viável se for maior do que zero. O VPL foi calculado através da equação 21 (HIRSCHFELD, 1998).

$$VPL = -Inv + \sum_{j=1}^{12} \frac{G}{(1+i)^j} \quad (21)$$

VPL: Valor presente líquido (R\$);

Inv: Investimento inicial (R\$);

G: Ganho financeiro anual (R\$);

i: taxa de desconto (12%).

A relação VPL/investimento reflete o quanto o benefício líquido de um projeto aumenta por unidade de investimento.

A taxa interna de retorno (TIR) é o índice que torna o investimento igual a zero, serve de comparação com as taxas de investimento disponíveis no mercado e foi calculada através da equação 22 (HIRSCHFELD, 1998).

$$Inv = \sum_{j=1}^{12} \frac{G}{(1+i)^j} \quad (22)$$

G: Ganho financeiro anual (R\$);

Inv: Investimento inicial (R\$);

i: TIR;

Custos evitados são as economias decorrentes do adiamento de investimentos na expansão do sistema elétrico (custo da demanda evitada) e/ou da redução de despesas operacionais (custo da energia economizada). Para quantificar os custos totais evitados, multiplicam-se as quantidades de demanda e de energia evitadas pelos respectivos custos unitários evitados (ANEEL, 2008).

O custo unitário evitado de energia considerado é dado pela ANEEL (2008, p. 39) e foi de 157,69 R\$/MWh.

O custo unitário evitado de demanda é dado pela ANEEL (2008, p. 39) e foi de 341,68 R\$/kW.

A vida útil considerada foi de 10 anos, visto que é a vida útil média de um motor elétrico (ANEEL, 2008).

A relação custo/benefício (RCB) resulta do valor presente dos custos pelo valor presente dos benefícios. A ANEEL exige para os atuais planos de eficiência energética uma RCB menor que 0,8 (ANEEL, 2008, p. 13). O cálculo do RCB é dado pela equação 23 (HIRSCHFELD, 1998).

$$RCB = \frac{Inv_a}{G} \quad (23)$$

Inv_a: Investimento anualizado;

G: Ganho financeiro anual (R\$);

Para o cálculo do Inv_a foi utilizada a equação 24 (HIRSCHFELD, 1998).

$$Inv_a = Inv \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (24)$$

Inv: Investimento inicial;

i: taxa de desconto (12%);

n: vida útil do projeto.

A Tabela 18 mostra a potência consumida e o consumo de energia elétrica. Foi medida durante meia hora a energia elétrica de cada caso. Para calcular o consumo anual foi considerado que cada sistema funciona durante 24 horas por dia e durante 365 dias por ano.

Tabela 18. Consumo de energia medido e consumo de energia anual das quatro situações possíveis da bancada

Descrição da situação		Potência Consumida (W)	Consumo Anual (MWh/ano)
Motor Padrão	Controle de vazão pela válvula	1.424,84	3,74
	Controle de vazão pelo inversor de frequência	1.599,03	1,75
Motor de alto rendimento	Controle de vazão pela válvula	993,38	2,69
	Controle de vazão pelo inversor de frequência	1.061,62	1,12

A Tabela 19 mostra o custo médio dos componentes utilizados.

Tabela 19. Descrição dos equipamentos com os respectivos preços

Descrição do equipamento	Preço médio
Motor 1,5CV WEG tipo padrão	R\$ 363,41
Motor 1,5CV WEG tipo alto rendimento	R\$ 456,57
Inversor de frequência	R\$ 1.140,00

Fonte: BD Motor / Coreval Comércio de Materiais Elétricos e Representações Ltda.

A Tabela 20 mostra os índices da análise econômica para cada sistema proposto.

Tabela 20. Análise econômica das possibilidades de controle de vazão e motor

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Investimento Inicial (R\$)	1.140,00	1.140,00	1.503,41	456,57	456,57	1.596,57
Vida útil do Projeto (ano)	10	10	10	10	10	10
Energia anual economizada (MWh/ano)	1,99	1,57	0,94	1,05	0,63	2,62
Redução de demanda (kW)	- 0,174	-0,0682	-0,606	0,43	0,54	0,36
Custo evitado de energia elétrica (R\$)	313,8	247,57	148,22	165,57	99,34	413,15
Custo evitado de demanda (R\$)	-5,95	-23,31	-206,93	147,42	183,63	124,11
Ganho financeiro anual (custo evitado de energia + custo evitado de demanda) (R\$)	307,85	224,25	-58,70	313	282,97	537,25
Tempo de Retorno Simples (ano)	3,7	5,08	-	1,46	1,61	2,80
Valor Presente Líquido VPL (R\$)	1.710,46	936,39	-	2.441,58	2.163,52	3.471,13
Relação VPL/Investimento	1,50	0,82	-	5,35	4,74	2,31
Taxa Interna de Retorno TIR (%)	31	22	-	76	69	41
Investimento anualizado (R\$)	169,89	169,89	-	68,04	68,04	224,05
RCB (Resultado Custo/Benefício)	0,55	0,76	-	0,22	0,24	0,42
R\$/MWh economizado	572,86	726,11	-	434,83	724,71	609,38
R\$/ kW economizado	-	-	-	1.061,79	845,5	4.434,92

Caso 1: Substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão.

Caso 2: Substituição do controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

Caso 3: Substituição do controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão.

Caso 4: Substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento.

Caso 5: Substituição do controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

Caso 6: Substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento.

No investimento inicial foi considerado que o sistema já possuía motor padrão e válvula. Com isso, foi considerado o preço do inversor e/ou do motor de alto rendimento.

Através da Tabela 18 foi possível calcular a economia de energia e a demanda retirada na ponta. Observa-se que nos casos 1, 2 e 3 obteve-se uma redução de demanda negativa, explicado pelo fato de se ter um aumento da potência máxima alcançada.

Os custos evitados de energia e demanda foram calculados multiplicando a economia e a demanda pelo custo unitário evitado de energia e demanda respectivamente. Somando o custo evitado de demanda e energia obteve-se o ganho financeiro anual. Nota-se que o caso 3 é inviável pois possui um ganho financeiro negativo (prejuízo).

O tempo de retorno simples foi calculado através da divisão do investimento inicial pelo ganho financeiro anual. Observa-se que o caso 4 (Substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento) obteve o menor tempo de retorno de investimento.

Segundo ANEEL (2008), a energia economizada, medida em MWh/ano, e a redução de demanda no horário de ponta, medida em kW, são os principais indicadores quantitativos para projetos de eficiência energética, portanto, o projeto mais benéfico foi o caso 6 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento) e o mais desvantajoso foi o caso 3 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor padrão).

Os projetos devem apresentar, no máximo, uma Relação Custo-Benefício (RCB) igual a 0,80. (ANEEL, 2008), com isso tem-se o caso 4 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento) como o mais benéfico.

Assim sendo, tem-se o caso 4 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pela válvula com motor de alto rendimento) o mais benéfico economicamente (menor RCB e retorno simples), porém, quando observado os índices de eficiência energética relevantes (economia de energia e redução de demanda), tem-se o caso 6 (substituição do controle de vazão pela válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento) como o mais adequado para o Programa de Eficiência Energética da ANEEL. Portanto, cabe ao gestor do projeto a escolha entre o caso mais viável economicamente (substituição do motor padrão para o motor de alto rendimento no

controle de vazão pela válvula) ou o caso com maior economia de energia e redução de demanda (substituição do controle de vazão por válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência e motor de alto rendimento).

6.5 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

Para avaliar a influência das medidas de eficiência energética na qualidade da energia foram mensurados índices de qualidade de energia (THD Tensão, THD Corrente e fator de potência) para cada acionamento e cada tipo de motor. A medição de THD levou em consideração até a 50^a harmônicas. A Tabela 21 mostra os resultados.

Tabela 21. Índices de qualidade de energia elétrica para todos os três diferentes acionamentos e os dois tipos de motores

Descrição da situação		THD Tensão (%)	THD Corrente (%)	Fator de potência	Temperatura média nos enrolamentos (°C)	Temperatura na carcaça (°C)
Motor Padrão	Acionamento por partida direta	3,5	4,8	0,84	27,93	27
	Acionamento pelo inversor de frequência	3,0	138,0	0,92	41,17	29,8
	Acionamento pela Soft-Start	3,5	4,4	0,85	31,23	27,5
Motor de alto rendimento	Acionamento por partida direta	3,4	5,2	0,8	27,52	27,5
	Acionamento pelo inversor de frequência	3,0	153,9	0,9	30,7	28,7
	Acionamento pela Soft-Start	3,4	5,2	0,81	29,27	28

Como esperado, a THD tensão e a temperatura na carcaça não alteraram. O acionamento do motor pelo inversor de frequência causou um acréscimo da THD corrente e da temperatura nos enrolamentos, em contrapartida, causou uma elevação no fator de potência.

De acordo com a ANEEL (2005), a THD tensão não deve ultrapassar 10%, porém, essa norma não limita o valor de máximo de THD corrente. A IEEE – 519 (1992) limita em 5% a THD corrente, deste modo, a THD tensão ficou com valores aceitáveis de

acordo com a norma brasileira e a THD corrente no acionamento com inversor ficou acima do tolerado pela IEEE.

Segundo ABNT NBR-7034 (Tabela 7), a temperatura máxima no enrolamento de um motor de indução trifásico Classe B é 130°C, portanto, os valores alcançados ficaram abaixo do limite máximo.

A Figura 31 mostra o gráfico do espectro de harmônico de tensão.

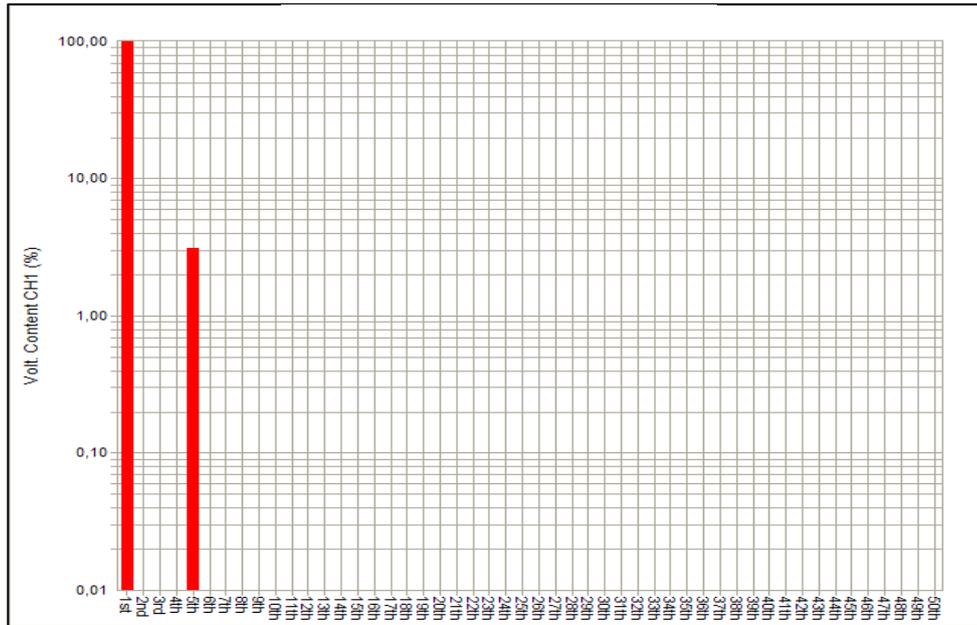


Figura 31. Espectro do harmônico de tensão

Através da Figura 31, observa-se que o harmônico de tensão possui somente a componente de quinta ordem que está em torno de 3%.

A Figura 32 mostra o gráfico do espectro de harmônico de corrente para o motor de alto rendimento acionado por inversor de frequência.

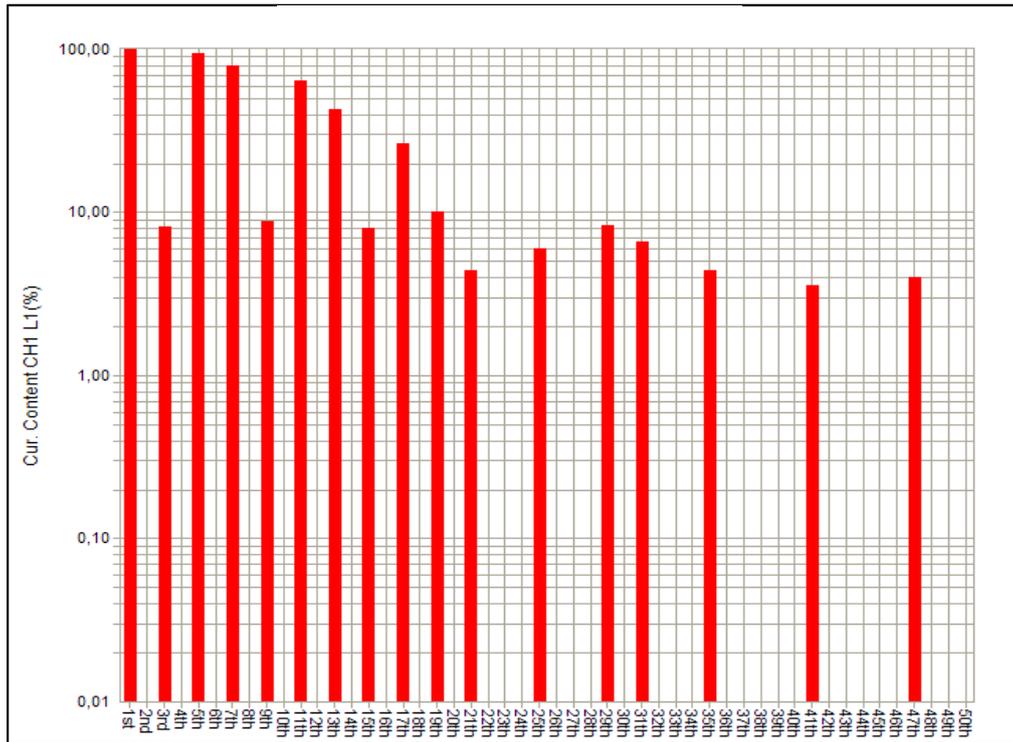


Figura 32. Espectro do harmônico de corrente – Inversor de frequência – motor de alto rendimento

Através da Figura 32, observa-se que o espectro de harmônico de corrente possui elevados índices de harmônicos, com destaque para 90,60% na 5ª harmônica, 72,40% na 7ª, 51% na 11ª e 29,60% na 13ª, além de presença de correntes de 47ª ordem.

A Figura 33 mostra a forma de onda da corrente quando utilizado o inversor de frequência.

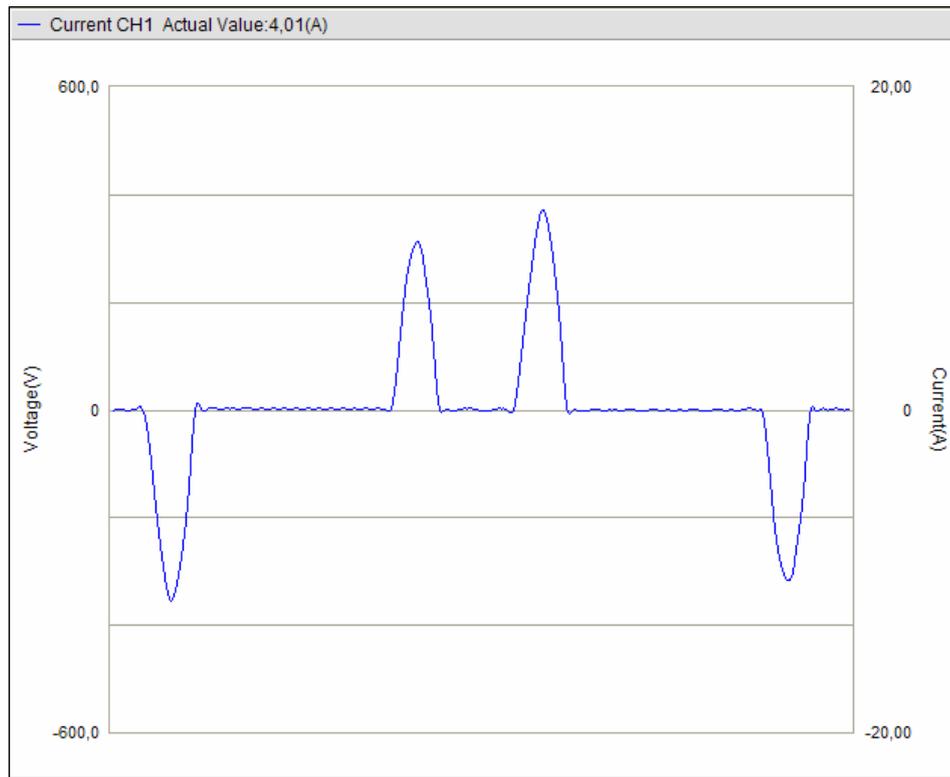


Figura 33. Forma de onda da corrente – Inversor de frequência – motor de alto rendimento

A Figura 33 ilustra uma forma de onda da corrente distorcida e com elevado fator de crista (2,06).

7 ESTUDO DE CASO: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE POTIRENDABA-SP

Será apresentado o projeto de eficiência energética que foi realizado no Serviço de Abastecimento de Água (SAE) da cidade de Potirendaba-SP. Este projeto foi realizado pela empresa Energia Assessoria em Sistemas de Energia e Comércio Ltda através do Programa de Eficiência Energética ANEEL ciclo 2007/2008 da CPFL Energia.

Potirendaba situa-se na região de São José do Rio Preto, a 396 km da cidade de São Paulo. De acordo com o Censo Demográfico do IBGE (2004), a população é de 14.327 habitantes, onde 85,92% dos domicílios possuem abastecimento de água, 13,96% possuem poços nas propriedades e 0,12% não possuem abastecimento de água.

Este projeto foi realizado na estação elevatória da represa que possui dois conjuntos moto-bombas de 25CV que operam em média 20 horas por dia, são acionados manualmente por chave compensadora e o controle de vazão é realizado por válvula de estrangulamento na tubulação de recalque. Os conjuntos recalcam água de um reservatório de água tratada para um reservatório de distribuição. A Figura 34 mostra os conjuntos antes da ação de conservação de energia (ACE).



Figura 34. Conjuntos moto-bombas antes da ACE – SAE Potirendaba-SP

Neste projeto foi realizada a substituição dos dois conjuntos moto-bombas e de seus acionamentos. A Tabela 22 mostra os equipamentos antes e após a substituição.

Tabela 22. Equipamentos substituídos – SAE Potirendaba-SP

Equipamento	Antes ACE	Após ACE
Motor	GE Standard	WEG Alto rendimento
	25CV	25CV
	1750rpm	1750rpm
	220V	220V
Bomba	KSB ETA 80-40/2	KSB ETA 80-40/2
	Q=57,6 m ³ /h	Q=57,6 m ³ /h
	H=60 mca	H=60 mca
	ano 1959	ano 2008
Acionamento	Compensadora	Inversor de Frequência 25CV / 220V

A Figura 35 ilustra o ponto de funcionamento da bomba instalada.

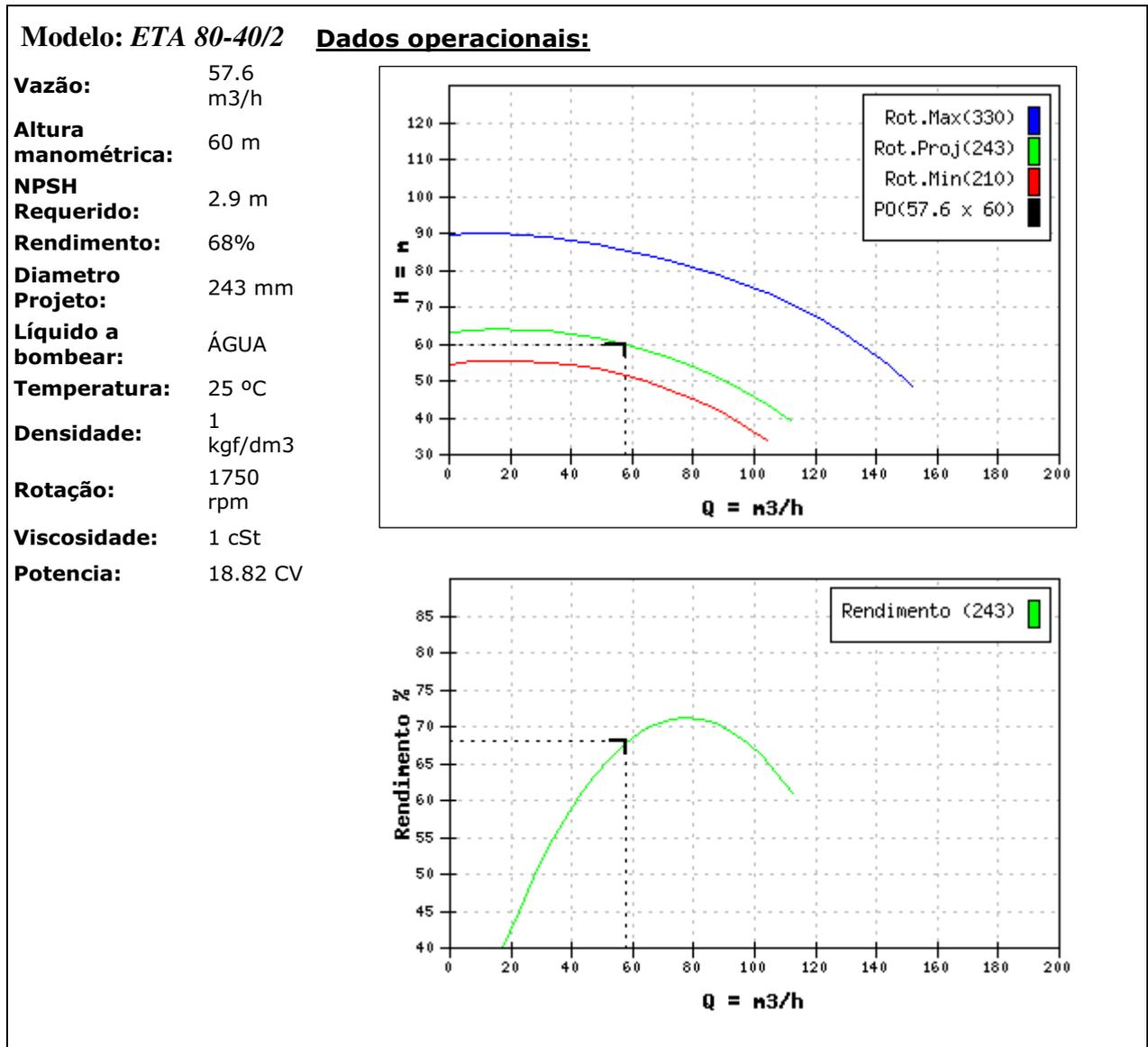


Figura 35. Ponto de funcionamento bomba instalada – SAE Potirendaba-SP

Observa-se pela Figura 35 que a bomba instalada operava na região de máximo rendimento (68%), portanto, foi instalada a bomba do mesmo modelo e dados operacionais. O novo painel instalado possui um inversor de frequência e saída para os dois motores através de contator modular. O controle da vazão é realizado através de um sensor de pressão instalado na tubulação de recalque.

Para comprovar os resultados de economia deste projeto foi realizada a medição e verificação com base no Protocolo Internacional de Medição e Verificação que fornece uma visão geral das melhores práticas atualmente disponíveis para medir e verificar os resultados de projetos de eficiência energética. Foram mensuradas as grandezas elétricas,

a vazão e a pressão por um período de 168 horas (sete dias) antes e após a implementação do novo sistema.

Neste projeto, a fronteira de medição foi o quadro geral da instalação Represa que alimenta os dois conjuntos moto-bombas. A Tabela 23 ilustra os resultados das medições na *baseline* e seu ajuste para alcançar a economia final.

Tabela 23. Medição e ajuste baseline para cálculo economia de energia – SAE Potirendaba-SP

DATA	BASELINE		PÓS ACE		AJUSTE BASELINE	ECONOMIA ENERGIA
	Consumo (kWh)	Volume (m ³)	Consumo (kWh)	Volume (m ³)	Consumo (kWh)	Consumo (kWh)
domingo	516,95	1.373,07	255,22	1.140,59	485,75	230,52
segunda-feira	587,96	1.797,46	246,37	1.092,18	478,56	232,18
terça-feira	583,69	1.714,02	249,52	1.114,33	481,85	232,33
quarta-feira	586,52	1.842,72	247,83	1.109,28	481,10	233,27
quinta-feira	552,77	1.705,64	262,84	1.193,20	493,56	230,72
sexta-feira	584,43	1.809,60	252,32	1.133,37	484,67	232,36
sábado	553,90	1.551,75	252,89	1.108,71	481,01	228,13
TOTAL	3.966,22	11.794,27	1.766,99	7.891,66	3.386,50	1.619,51
Economia Anual (MWh)						84,45

A Tabela 23 mostra uma economia de energia de 1.619,51kWh no período analisado o que leva a uma economia anual de 84,45MWh.

Para analisar a redução de demanda na ponta (RDP), mediu-se a potência máxima consumida no horário de ponta durante 168 horas (sete dias) antes e após a ACE. Os resultados são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24. Redução de demanda na ponta – SAE Potirendaba-SP

	Demanda máxima Baseline (kW)	Demanda máxima após ACE (kW)	RDP (kW)
Segunda-feira	24,68	10,87	13,81
Terça-feira	24,85	11,22	13,63
Quarta-feira	25,13	10,91	14,22
Quinta-feira	25,03	11,99	13,04
Sexta-feira	24,91	10,86	14,06
Potência Máxima registrada	25,13	11,99	14,22

A partir da Tabela 24, observa-se uma redução média de demanda na ponta de 14,22 kW.

Através dos resultados alcançados foi possível calcular alguns índices para demonstrar a atratividade econômica do projeto. Os índices calculados estão na Tabela 25.

Tabela 25. Índices da atratividade econômica do projeto - SAE Potirendaba-SP

Descrição	Valor Alcançado
Redução do consumo anual de energia (MWh)	84,45
Redução de demanda na ponta (kW)	14,22
Porcentagem de economia de energia (%)	40,95
Economia anual por unidade (R\$)	18.175,56
Custo Projeto (R\$)	80.000,00
Tempo de Retorno Simples (Ano)	4,4
Relação R\$/kW economizado	5.625,88
Relação R\$/MWh economizado	947,31
RCB (Resultado Custo/Benefício)	0,79

Através da Tabela 25, conclui-se que este projeto foi viável, principalmente do ponto de vista da economia de energia, que chegou a 40%, porém, alguns valores poderiam inviabilizar economicamente o projeto, tal como RCB de 0,79 e tempo de retorno simples de 4,4 anos.

A Figura 36 ilustra a medição do consumo de energia elétrica e da vazão de água na *baseline* e no pós ACE.

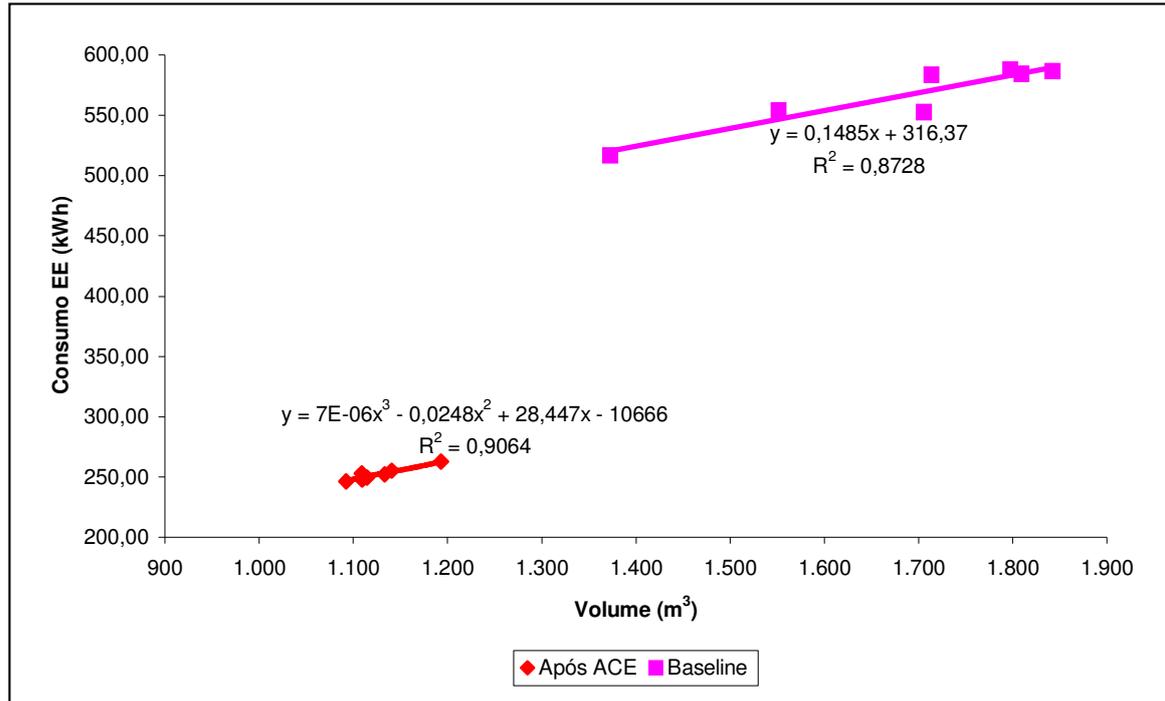


Figura 36. Medição *baseline* e no pós ACE – SAE Potirendaba-SP

As equações da Figura 36 representam o modelo matemático da *baseline* e do pós ACE e a variável R^2 representa o coeficiente de correlação e indica o quanto os pontos encontram-se dispersos em relação à curva. Observa-se que a equação da curva da *baseline* é linear e a equação do pós ACE é de terceiro grau, o que é comprovado pelas equações 8 e 10.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram comparados dois métodos de controle de vazão em um sistema de bombeamento, por válvula de estrangulamento ou por inversor de frequência, e para cada caso foram utilizados dois tipos de motores de mesma potência: motor padrão e motor de alto rendimento. Através de medidas de vazão, pressão, rotação e grandezas elétricas observou-se uma economia de energia quando substituído o controle de vazão por válvula pelo controle de vazão pelo inversor de frequência ou pela troca do motor padrão pelo motor de alto rendimento.

Para a análise dos resultados realizou-se a medição e verificação dos resultados tendo como base o Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance (PIMVP), que fornece uma visão geral das melhores práticas atualmente disponíveis para medir e verificar os resultados de projetos de eficiência energética. Os indicadores de eficiência energética medidos foram a economia economizada em MWh/ano e a redução de potência, medida em kW.

A simples substituição do motor padrão para o motor de alto rendimento, para o controle de vazão pela válvula, acarretou numa redução de consumo de energia de 33,42% e a mesma substituição para o controle de vazão por inversor de frequência ocasionou numa redução de 32,45% para a faixa de vazão utilizada. Mantendo o mesmo motor e substituindo o controle de vazão pela válvula para o controle de vazão por inversor de frequência conseguiu-se uma economia entre 47,18% a 52,22%. Para o caso de trocar o motor padrão para o de alto rendimento e substituir o controle pela válvula para o controle pelo inversor de frequência alcançou uma economia de 67,03%.

Realizou-se a análise econômica entre todas as possibilidades de motores e controle de vazão, observando que a maior redução no consumo anual de energia elétrica se deu quando substituído o controle de vazão por válvula com motor padrão para o controle de vazão pelo inversor de frequência com motor de alto rendimento (redução de consumo anual de 2,62 MWh/ano), porém essa substituição foi a que demandou o maior investimento (R\$ 1.596,57), o que acarreta num valor de tempo de retorno de 2,8 anos. Com a substituição do motor padrão para o motor de alto rendimento no controle de vazão pela válvula obteve a menor relação custo benefício (RCB de 0,22), sendo o caso

mais rentável economicamente. Portanto, tecnicamente a substituição do controle pela válvula e motor padrão para o controle com inversor de frequência e motor de alto rendimento é o caso mais eficiente (maior economia de energia e redução de demanda), porém, o caso mais viável economicamente foi manter o controle pela válvula e substituir o motor padrão para o motor de alto rendimento, ficando a cargo do gestor do projeto a melhor opção.

O aumento dos programas de eficiência energética leva a uma crescente utilização de equipamentos e dispositivos auxiliares baseados em acionamentos a estado sólido.

As análises para implementação de eficiência energética baseiam-se basicamente em estudos de viabilidade econômica dos investimentos, sem levar em consideração a perda na qualidade de energia elétrica que alguns componentes introduzem na rede.

Foram comparados alguns parâmetros de qualidade de energia elétrica para três acionamentos de motores (partida direta, inversor de frequência e soft-start) e para dois tipos de motores (padrão e alto rendimento), demonstrando a influência das medidas de eficiência energética na qualidade da energia elétrica. A inserção do inversor de frequência ocasionou o aumento do fator de potência de 0,84 para 0,92, entretanto, acarretou no aumento de 4,4% para 138% na distorção harmônica total de corrente.

Para comprovar a viabilidade de instalação de motor de alto rendimento e de inversores de frequência foi realizado um estudo de caso de um projeto de eficiência energética do SAE de Potirendaba-SP. Neste projeto foi substituído dois motores padrão de 25CV e controle de vazão por válvula por dois motores de alto rendimento e controle de vazão por inversor de frequência, alcançando uma economia de energia elétrica de 40%, com redução anual de R\$ 18.175,56, 84,45MWh e 14,22kW de demanda na ponta.

Conclui-se, portanto, que a utilização de motores de alto rendimento e de inversores de frequência para controle de vazão em sistemas de bombeamento são viáveis, porém, necessita de uma análise técnica-econômica para cada caso.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual para elaboração do Programa de Eficiência Energética – MPEE**, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - qualidade da energia elétrica**. Ago. 2005.

ALTMANN, D; LANG, P.C; RIGON, K. **Modulação da velocidade em bombas submersas para redução das perdas físicas e energéticas nos sistemas de distribuição**. Disponível em:

<[http://semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/pdf/35Assemae024 .pdf](http://semasa.sp.gov.br/admin/biblioteca/docs/pdf/35Assemae024.pdf)>. Acesso em 12 Maio 2008.

AMERICO, M. **Sistemas Motrizes: Eficiência Energética e Técnicas de Acionamento**. Cepel/Sebrae-RJ/UFF. Niterói-RJ. 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Uso Racional de Energia e Água em Saneamento**. Rio de Janeiro-RJ. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 07034 - Classificação Térmica de Materiais Isolantes Elétricos**. Rio de Janeiro. Dez. 1981.

AUGUSTO, N. **Motores de alto rendimento: dimensionamento e viabilidade econômica**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001. 157p.

AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G.A. **Manual de hidráulica**. 7 ed. São Paulo:Blücher, 1992. 335p.

BAHIA, S. R. **Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento**. Rio de Janeiro: IBAM - ELETROBRÁS/PROCEL, 1998.

BANDEIRANTE ENERGIA. **Tarifas para o fornecimento de energia elétrica**. 2006. Disponível em: <http://www.bandeirante.com.br/clientes_alta_tensao/informacoes/tarifas/tabela/tabela.asp>. Acesso em 17 jan.2008.

BDMOTOR. Rio de Janeiro: Eletrobrás. **Programa para avaliação de comparação e dimensionamento de motores**. Versão 4.2. 2008.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5 ed. Viçosa: UFV, 1989. 596 p.

BRASIL. **Decreto 4.059 de 19.dez.01**. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 20.dez.2001. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em 28 jan.2008.

BRASIL. **Decreto 4.508 de 11.dez.02**. Dispõe sobre 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 ou uso no Brasil, e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 12.dez.2002. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 28 jan.2008.

BRASIL. **Lei 10.295, de 17.out.01** – “Lei de Eficiência Energética”. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. D.O.U., Brasília, DF, 18.out.2001. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em 28 jan.2008

BRASIL. **Lei nº. 9.991, 2000**. Dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisas e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. 2000

In: Agência Nacional de Energia Elétrica. Eficiência Energética. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 28 jan.2008.

CAMOIRANO, R., DELLEPIANE, G. **Variable frequency drives for MSF desalination plant and associated pumping stations**. Milano, Itália. 2005.

CAPELLI, A. **Inversores de Frequência**, Revista Mecatrônica Atual nº 2, Fev. 2002.

CONZETT, J.C., ROBECHER, J.R. **Acionamentos de velocidade variável aplicados a bombas centrífugas**. São Paulo: Reliance Elétrica, 1983. p.1-8.

CURTIS, P.; **How drives save money in pumping applications**. Disponível em: <<http://www.drivesurvey.com>>. Acesso em 01 Jan. 2008.

DUGAN, R.; MCGRANAGHAN, M.; SANTOSO, S. **Electrical Power System Quality**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2002.

ELETROBRÁS, FUPAI/EFFICIENTIA, **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento – Guia prático**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005a. 103p.

ELETROBRÁS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005b. 272p.

ELETROBRÁS. **Bombas – Guia avançado**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2004. 316p.

EUROPUMP; HYDRAULIC INSTITUTE; **Variable speed pumping. A guide to successful applications** . 1ªed. Bodmin, Cornwall: Elsevier, 2004.

FILIPPO FILHO, G. **Motor de Indução**. São Paulo: Érica, 2000.

FINEP. **Capacitação para a tomada de decisões na área de energia – O planejador do sistema elétrico: desafios e controvérsias**. Rio de Janeiro. 1989.

GARCIA, A.G.P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria.** 2003. 139p. Dissertação (Mestrado)– Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 2003.

GELLER, H. S. **Energy Revolution: Policies for a Sustainable Future.** Washington: Island Press, 2003.

GOLOVACH, A. **Electric drive in woodworking.** Moscow: Mir Publishers, 1967. 323p.

GOMES, H. P. **Sistemas de Abastecimento de Água: Dimensionamento Econômico e Operação de Redes e Elevatórias.** 2ª Ed. Editora Universitária – UFPB. João Pessoa-PB. 2004. 204p.

GOMES, H.P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: análise econômica de projetos.** ABES. Rio de Janeiro-RJ. 2005.114p.

GRUNDFOS. **Manual de engenharia, Bombas Grundfos de Portugal.** Lisboa. 1996. 66p.

WALSKI, T; CHASE, D.V; SAVIC, D; GRAVMAN, W.M; BECKWITH, S; KOELLE, E. **Advanced water distribution modeling and management.** 1ªed. Chapter 8. Waterbury: Haestad Press, 2004.

HAFNER, A. A. **Estudo e simulação dos módulos lógicos de um medidor de qualidade de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado) em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. UTFPR, 2006.

HAMMOND, P.W.; PENTEADO JUNIOR, E. **Inversores de MT: nova solução para uma melhor qualidade da energia.** Eletricidade Moderna, São Paulo, n. 276, p. 76-84, 1997.

HIRANO, A.. Análise das perturbações causadas na rede de alimentação elétrica devido a utilização de inversores de frequência no controle de motores elétricos. Universidade São Judas Tadeu. 2007.

HIRSCHFELD, H.. Engenharia econômica e análise de custos: aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores. São Paulo: Atlas. 1998. 407p.

IBGE. Censo Demográfico 2004 - Resultados do universo. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 05 Mai. 2009.

IEC 61000-2-2. Limits for Harmonic Current Emissions". International Electrotechnical Commission Standard. Mar. 1995.

IEEE 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. 1995.

IEEE 519-1992 Standard. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System (ANSI). 1992.

IEEE TASK FORCE. Effects of Harmonic on Equipament (1993) – IEEE Transation on Power Delivery. Vol 8, N.2, pp 672-680, Abr.1993.

JAMES, K; GODLOVE, C.E; CAMPBELL, S.L; Água e Energia – Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Exploradas nos Sistemas Municipais. Aliança para conservação de Energia. 2002. 159p.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. [S.l.]: Edgard Blücher, 2005.

KELLER, J., BLIESNER, R.D. Sprinkle and trickle irrigation. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 4.ed. Tradução de Felipe Daiello e Percy Soares. Porto Alegre: Globo, 1982. 2v.

MACINTYRE, A.J., **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2a edição, Guanabara Koogan S.A., 1987.

MAMMED FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 3. ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1989. 528p.

MAYS, L. W.; **Hydraulic design handbook**, 1ª ed. McGraw-Hill 1999.

MILANEZ, F. C. S; SOUZA, M. H. M; MESQUITA, A. (Tradutores). **Protocolo Internacional para Medição e Verificação de Performance**. INEE. Rio de Janeiro.Out. 2001.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional. Ano Base 2006**. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>> Acesso em: 28 jan.2008.

MOREIRA, J.F, SOARES G.A, TABOSA, R.P, SHINDA, R. **Guia operacional de motores elétricos**. Rio de Janeiro. 1998.

MORENO, M.A., CARRIÓN, P.A., PLANEÉIS, P., ORTEGA,J.F., TARJUELO, J.M. **Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations**. Centro regional de estudios del agua, Castilla-La Mancha University, Albacete, Espanha. 2007.

POMILIO, J. A. **Normas relativas à corrente de linha: fator de potência e harmônicos de baixa frequência**. 2005. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/htmlfile/harmo/fpcap2.html>>. Acesso em 7 maio 2008.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. São Carlos. 3ª Edição Revisada. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – EESC-ESP. 2004. 540p.

PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas instalações elétricas – causas, efeitos e soluções**. São Paulo. 2001.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Dados da instituição, 2008**. Disponível em www.elektrobras.gov.br/procel. Acesso em 28 jan.2008.

QUALITY TONNES, **Energy Efficiency Improvements in Municipal Water Utilities in Karnataka, Índia**. Project Design Document. Disponível em <http://www.qualitytonnes.com>. Acesso em 07 maio08.

SANKS, R.L. **Pumping station design**. 2ª ed., Butterworth-Heinemann, 1998.

SILVA, V.F; CORTEZ, J.A. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. Apoio Eletrobrás / Procel. Itajubá – MG: FUPAI. 2001.467p.

SISSOM, L.E.; PITTS, D.R. **Fenômenos de transporte**. Editora Guanabara. Rio de Janeiro-RJ. 1988.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2005**. Brasília: SEDU/PR-IPEA, 2005.

TAKAHASHI, K., MALISZEWSKI, R.M., MESLIER, F., WALLACE, P., SALVADERI, L., WATANABE, T., **Impacts of demand side power electronics technologies on power system planning**. CIGRE SC-37. 1995.

TSUTIYA, M.T. **Redução do custo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e ambiental – ABES. 1ª ed. São Paulo. 2001.185p.

TSUTIYA, M.T. **Utilização de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento**. VI SEREA – Seminário

Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. João Pessoa. Paraíba, junho 2006.

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

WEG. **Catálogo Geral de Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul – SC. 2005. Disponível em <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em 18 Jan. 2008.

WEG. **Motores de indução alimentados por conversores de frequência PWM**. Jaraguá do Sul – SC. Setembro 2006. Disponível em <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em 29 Jan. 2008.

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