

**ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE
DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE
BOMBAMENTO MONITORADO VIA
SUPERVISÓRIO**

SAULO GOMES MOREIRA

CAMPO GRANDE

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE
BOMBEAMENTO MONITORADO VIA SUPERVISÓRIO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

SAULO GOMES MOREIRA

CAMPO GRANDE

2008

ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MONITORADO VIA SUPERVISÓRIO

SAULO GOMES MOREIRA

‘Este trabalho de dissertação foi julgado adequado como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Energia e Linha de Pesquisa Energia, Planejamento, Operação e Controle de Sistemas Elétricos’.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Júnior
Orientador
DEL/CCET/UFMS

Prof. Dr. Valmir Machado Pereira
DEL/CCET/UFMS

Prof. Dr. Jamil Haddad
UNIFEI/ITAJUBÁ

CAMPO GRANDE

2008

A Deus por ter me dado saúde e força para superar os momentos de dificuldades durante o Mestrado e por me presentear com uma vida maravilhosa.

Aos meus queridos pais, Gercino e Vera, e irmãos, Sandro e Márcio, que apesar da distância sempre estiveram em meu coração.

A minha namorada, Jeana, pelo apoio e carinho que nunca me foram negados ao longo desta minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Amâncio Rodrigues da Silva Jr., pela honra de desenvolvermos juntos este trabalho e pela oportunidade de crescimento profissional através dos trabalhos realizados no Laboratório de Eficiência Energética.

Ao amigo e parceiro de trabalho Wellington Rocha Araújo pelo compartilhamento do conhecimento e pelo ânimo sempre presente para o desenvolvimento de novos projetos.

A ELETROBRÁS pelo suporte financeiro e a empresa De Lorenzo do Brasil pelo suporte técnico para a implantação do LAMOTRIZ.

Aos Professores Doutores Valmir Machado Pereira, Félix Abrão Neto e Luciana Cambraia Leite pelas contribuições prestadas durante a realização do trabalho.

Aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMS, em especial a Maria Isabel Coelho pela disponibilidade de sempre em ajudar.

Aos companheiros de profissão, os engenheiros eletricitas, Gervásio Saraiva Lara, João César Okumoto, Rafael Nishimura, Adailton Fleitas Menezes, Luiz Dotto e Celso Fumio Watabe.

A equipe de estagiários do Laboratório de Eficiência Energética, Rafael Darbello Torres, Luiz Fernando Tadashi Abe, Rodrigo Caldas Minari, Éverton Armoa Martos e Fabrício Maia Perim.

Aos amigos Felipe Silva Belluci, Diego de Alcântara Lacerda, Róbson Fleming Ribeiro, Ângelo Camargo Dalben, Diogo Carvalho e Rodrigo Coelho.

Quem conhece a sua ignorância revela a mais profunda sapiência.

Quem ignora a sua ignorância vive na mais profunda ilusão.

Lao-Tsé

Dissertação apresentada a UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ESTRATÉGIAS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMA DE BOMBEAMENTO MONITORADO VIA SUPERVISÓRIO

SAULO GOMES MOREIRA

Fevereiro / 2008

Orientador: Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Jr.

Área de Concentração: Energia.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Sistema de Bombeamento, Motor de Alto Rendimento, Inversor de Frequência, Sistema Supervisório.

Número de Páginas: 92

RESUMO:

Devido à baixa eficiência dos sistemas de bombeamento existentes no setor industrial (onde são responsáveis por aproximadamente 18% da força motriz utilizada) este trabalho tem o objetivo de elaborar estratégias de ensaios em uma bancada de simulação para verificação dos potenciais de eficiência energética nestes sistemas. O estudo foi realizado no Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ – da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. Foi utilizado um sistema de bombeamento hidráulico composto por uma bomba centrífuga acionada por um motor de indução de 1,5 cv. Todo o processo foi monitorado e controlado por um sistema supervisório – SCADA – e novas funções foram desenvolvidas para representar sistemas de bombeamento encontrados na prática. Na primeira simulação foi verificado que o máximo de economia de energia obtida pelo uso do inversor de frequência para controle de vazão foi de aproximadamente 90% e que o uso de motor de alto rendimento possibilitou uma redução de 6,18 a 8,93 % quando substituindo um motor *standard* de mesma potência. Também foi observado que o uso do inversor de frequência causou uma redução significativa do fator de potência. Os resultados para a simulação de uma curva de vazão variável mostraram que a utilização do inversor de frequência em substituição à válvula de estrangulamento proporcionou uma economia de energia de 71 % e também que a substituição do motor *standard* por modelo de alto rendimento reduziu em 7,5 % o consumo de energia. Para a simulação de um sistema funcionando com religamento automático por nível, a utilização do inversor de frequência possibilitou uma redução de aproximadamente 73 % na energia consumida quando ajustado para trabalhar a uma frequência de 35 Hz.

Abstract of Dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

SIMULATION STRATEGIES FOR ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY IN A PUMPING SYSTEM MONITORED BY SUPERVISORY CONTROL

SAULO GOMES MOREIRA

February / 2008

Advisor: Amâncio Rodrigues da Silva Jr., Dr.

Area of Concentration: Energy.

Keywords: Energy Efficiency, Pumping System, High-Efficiency Motor, Frequency Inverter, Supervisory System.

Number of Pages: 92

ABSTRACT:

Due to the low efficiency of pumping systems in the industrial sector (where it is responsible for up to 18% of the motive power used) this work has the objective to elaborate strategies of tests in a testing bench simulation to verify the energy efficiency potentials in these systems. The study was held in the Laboratory of Energy Efficiency in Motor Systems – LAMOTRIZ - of the Federal University of Mato Grosso do Sul - UFMS. A hydraulic pumping system composed of a centrifugal pump driven by an 1.5 cv induction motor was used. The whole process was monitored and controlled by a supervisory system – SCADA – and new functions were developed to represent pumping systems found in practice. In the first simulation it was verified that the maximum energy saving achieved by using the frequency inverter to control the flow was approximately 90% and that the use of high efficiency motor provided a reduction ranging from 6,18 to 8,93 % when replacing a standard motor of the same power. It was also observed that the use of frequency inverter did cause a significant reduction of the power factor. The results for the simulation of a variable outflow curve showed that the use of frequency inverter , replacing the strangulation valve, provided an energy saving of 71 % and that the replacement of the standard motor for a model of high efficiency reduced the energy consumption in 7,5 %. For the simulation of a system functioning with automatic restart by level, the use of the frequency inverter made possible a reduction of approximately 73 % in the consumed energy when adjusted to work on 35 Hz frequency.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura do Trabalho.....	3
2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	4
2.1. Consumo e Conservação de Energia	4
2.2. Consumo de Energia na Indústria Brasileira.....	7
2.3. Sistemas motrizes industriais	8
2.4. Eficiência em Motores Elétricos na Indústria	13
2.5. Motores de Alto Rendimento	15
2.6. Acionamento Eletrônico.....	19
2.7. Sistemas de Bombeamento.....	22
2.8. Características das Bombas Centrífugas e do Sistema de Bombeamento	22
2.9. Leis de similaridade dos sistemas de bombeamento	23
2.10. Conservação de Energia em Sistemas de Bombeamento	24
3 SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	28
3.1. Automação Industrial	28
3.1.1. Analogia entre Automatismo e Corpo Humano	28
3.1.2. Histórico e Vantagens da Automação Industrial.....	29
3.2. Controlador Lógico Programável (CLP)	32
3.2.1. Arquitetura Básica de um CLP	34
3.3. Sistemas SCADA	36
3.3.1. Componentes Físicos.....	37
3.3.2. Componentes Lógicos de um Sistema SCADA	38
3.4. <i>Software</i> Supervisório.....	39
3.5. Linguagem de Programação.....	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
4.1. O Convênio ECV 024/2004 – UFMS / ELETROBRÁS	40
4.2. Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ	40
4.3. Estação de Simulação da Bomba Centrífuga.....	44

4.4. Sistema supervisorio - Indusoft Web Studio 6.1	48
4.5. Implementações no supervisorio	50
4.5.1. Criação de funções no IWS	51
4.5.2. Função de acionamento por tempo.....	52
4.5.3. Função de set-point automático.....	53
4.5.4. Função de religamento automático por nível do reservatório	55
4.6. Metodologia dos ensaios	56
5 SIMULAÇÕES DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	58
5.1. Análise do sistema para faixa de vazão entre 0,1 e 2,6 m ³ /h.....	58
5.1.1. Comparação entre o uso de válvula e de inversor de frequência para controle de vazão	59
5.1.2. Comparação entre a utilização de motor <i>standard</i> e de alto rendimento	63
5.1.3. Comportamento do fator de potência	66
5.2. Simulação de um sistema de bombeamento com curva de vazão variável.....	69
5.2.1. Comparação entre o uso da válvula e do inversor de frequência	72
5.2.2. Comparação entre o uso de motor <i>standard</i> e de alto rendimento	73
5.3. Sistema funcionado com religamento automático por nível (liga e desliga).....	74
5.3.1. Frequência mínima de operação do conjunto motor-bomba	75
5.3.2. Comparação do consumo de energia para frequência nominal (60 Hz) e demais frequências.....	76
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	78
6.1 Conclusões.....	78
6.2 Recomendações para trabalhos futuros.....	79
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICES	87
- Apêndice A –.....	88
- Apêndice B –.....	89
- Apêndice C –.....	90
- Apêndice D –.....	91

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Consumo de energia elétrica ano a ano em TWh segundo o setor da economia.....	6
2.2 - Evolução do consumo de eletricidade, energia total e PIB (1984-2000).	7
2.3 - Consumo de energia por setor no ano de 2006.....	7
2.4 - Consumo de energia final na indústria por uso final.	9
2.5 - Uso de energia para força motriz.	9
2.6 - Distribuição da força motriz por uso final.....	10
2.7 - Triângulo de potências para carga indutiva.....	12
2.8 - Curvas típicas: a) η x carga; b) $\cos\phi$ x carga.....	15
3.1- Fluxo de Informações em um Sistema de Controle Digital.....	32
3.2 – Arquitetura básica de um CLP.....	34
3.3 - Diagrama de um Sistema SCADA	38
4.1 – CLP <i>Schneider Electric- Telemecanique</i> instalado no painel de comando e proteção.....	41
4.2 – Arquitetura da rede do LAMOTRIZ.....	43
4.3 – Rede de comunicação da bancada da bomba centrífuga.....	43
4.4 – Bomba centrífuga <i>Schneider BC92-HSB</i>	44
4.5 – Fluxograma simplificado do sistema da bomba	45
4.6 – Diagrama esquemático da estação da bomba centrífuga do LAMOTRIZ.....	46
4.7 – Estação de simulação da bomba centrífuga do LAMOTRIZ.....	47
4.8 – Painel de comando e proteção	47
4.9 – Tela principal do sistema supervisão do LAMOTRIZ.....	48
4.10 – Tela de comando do sistema da bomba	49
4.11 – Janelas <i>pop-up</i> (a e b) usadas na função de <i>set-point</i> automático em modo contínuo e descontínuo.....	53
4.12 – Fluxograma do <i>script</i> do <i>set-point</i> automático	54
4.13 – Janela de controle PID da bancada da bomba com indicação do SP de vazão.	57
5.1 – Função de <i>set-point</i> automático no modo contínuo	58
5.2 – Comparação entre uso de válvula e inversor de frequência.....	59
5.3 – Economia percentual obtida pela utilização do inversor de frequência para controle de vazão (associado ao uso do motor <i>standard</i>).	60
5.4 – Variação da potência com variação da rotação do motor.	62
5.5 – Variação da frequência com variação da vazão (uso do inversor de frequência).	63
5.6 – Comparação entre utilização de motor <i>standard</i> com motor de alto rendimento (associados ao uso de partida direta).	65

5.7 – Economia percentual obtida pela substituição do motor <i>standard</i> pelo motor de alto rendimento (associados ao uso de partida direta).	65
5.8 – Comportamento do fator de potência com a variação da vazão.	67
5.9 – Janela <i>pop up</i> da função de variação automática de vazão	69
5.10 – Curva simulada de consumo de água de um sistema de bombeamento.....	70
5.11 – Curva de carga para os quatro conjuntos.	71
5.12 – Consumo de energia elétrica (comparativo entre uso de válvula e inversor).	72
5.13 – Consumo de energia elétrica (comparativo entre uso de motor <i>standard</i> e de alto rendimento).....	73
5.14 – Janela de Comando do supervisor com função de religamento automático por nível.....	74
5.15 – Variação do nível do reservatório para diferentes frequências.....	75
5.16 – Consumo de energia do sistema de bombeamento funcionando com diferentes frequências.	76

LISTA DE QUADROS

4.1 – Características dos motores utilizados.....	44
4.2 – Função de acionamento por tempo.....	52
4.3 – Função de religamento automático por nível	55

LISTA DE TABELAS

5.1 – Valores médios de rotação, frequência e potências ativas medida e calculada.....	61
5.2 – Valores médios de potências para os motores <i>standard</i> e alto rendimento.....	64
5.3 – Consumo de energia e economia percentual com relação à frequência nominal	76

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BEN – Balanço Energético Nacional

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

CLP – Controlador Lógico Programável

CPU – Central Processing Unity

CSV – Comma-Separated Values

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GLD – Gerenciamento pelo Lado da Demanda

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IHM – Interface Homem-Máquina

IP – Internet Protocol

IWS – Indusoft Web Studio

LAMOTRIZ – Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes

MAP – Manufacturing Automation Protocol

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio

MME – Ministério de Minas e Energia

OLE – Object Linking and Embedding

OPC – OLE for Process Control

PIB – Produto Interno Bruto

PID – Proporcional Integral Derivativo

PROCEL – Programa de Conservação de Energia Elétrica

PWM – Pulse Width Modulation

SCADA – Supervisory Control and Data Aquisition

TCP – Transmission Control Protocol

UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

VB – Visual Basic

XML – Extensible Markup Language

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Diante das recentes crises do sistema energético com as quais o Brasil conviveu, as discussões em busca de soluções para o atendimento da crescente demanda observada nos últimos anos se tornaram mais evidentes.

Busca por novas fontes de geração, ampliação e adequação dos sistemas de transmissão e distribuição foram rapidamente citadas como formas de minimizar os impactos causados pelas eventuais faltas de energia. Entretanto, uma solução mais econômica e de alcance mais imediato está na eliminação do desperdício de energia elétrica, ou seja, na eficiência energética.

O aquecimento da economia implica diretamente na ampliação do parque industrial brasileiro, notoriamente reconhecido como o grande setor consumidor de energia elétrica. Do total da energia consumida no país, estima-se, segundo a Empresa de pesquisa energética - EPE (2007), que aproximadamente a metade (44%) é consumida pelo setor industrial. Os motores destacam-se dentre as cargas elétricas de uma indústria representando até 60% do total de energia elétrica consumida na mesma, de acordo com Garcia (2003). Somando a esses dados o fato de que nos motores são verificadas grandes parcelas de desperdício de energia (devido ao mau dimensionamento, falta de manutenção, excesso de rebobinagens, não utilização de acionamento eletrônico, etc.) reforça-se a importância de estudos direcionados à eficiência energética em sistemas motrizes.

Entre os processos que utilizam motores elétricos estão os sistemas de bombeamento hidráulico, que representam 18% da força motriz utilizada na indústria (PEREIRA, 2007). No Mato Grosso do Sul, além do crescimento do número de indústrias em instalação, existe também uma significativa utilização de sistemas de bombeamento hidráulico no setor agropecuário.

Portanto, o presente trabalho se mostra importante pelo fato de que os resultados aqui apresentados possam servir de subsídio para a realização de investimentos na utilização de acionamento eletrônico e na troca de motores convencionais por modelos de alto rendimento em sistemas de bombeamento sejam eles no setor industrial ou nos setores agropecuário e comercial.

1.2 Objetivos

Objetivou-se com o trabalho elaborar estratégias de ensaios em uma bancada de simulação controlada via supervisor para verificação dos potenciais de efficientização energética em um sistema de bombeamento hidráulico.

Especificamente, foram realizados ensaios visando o levantamento dos valores de vazão de água do sistema, rotação (do motor), além da potência elétrica consumida pelo acionador e a partir de então foram elaborados gráficos e quadros comparativos.

As medições foram feitas com diferentes conjuntos de “acionador + controle de vazão”. São eles:

- Motor *Standard* + válvula pneumática;
- Motor *Standard* + inversor de frequência;
- Motor de Alto Rendimento + válvula pneumática;
- Motor de Alto Rendimento + inversor de frequência.

Visou-se fundamentalmente, através da implementação de novas funções para o sistema supervisor, criar condições de representar o comportamento de sistemas de bombeamento reais encontrados na prática e estabelecer qual tipo de motor e controle de vazão são mais eficientes.

Espera-se que os resultados contribuam com os estudos de viabilidade econômica de investimentos em métodos de conservação de energia em sistemas de bombeamento e também para o aumento das atividades de pesquisa direcionadas à eficiência energética em sistemas motrizes industriais no estado de Mato Grosso do Sul.

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho é composta de 07 capítulos conforme a seqüência:

- Capítulo 1 - Destaca o tema do trabalho e enfatiza os objetivos gerais e específicos.
 - Capítulo 2 - Apresenta a revisão bibliográfica relacionada à eficiência energética, consumo de energia na indústria, motores elétricos de indução, acionamento eletrônico, e descreve o estado da arte em conservação de energia em sistemas de bombeamento.
 - Capítulo 3 - Descreve as características de sistemas de automação industrial (sistema supervisor) e seus componentes.
 - Capítulo 4 - Apresenta o Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ, especificamente a estação de simulação da bomba centrífuga, além de descrever quais são as metodologias de ensaio e implementações no supervisor.
 - Capítulo 5 - Apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos durante as simulações.
 - Capítulo 6 - São apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos durante a metodologia desenvolvida e as sugestões para novos trabalhos.
 - Capítulo 7 - São apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização deste trabalho.
-

CAPÍTULO 2

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

2.1. Consumo e Conservação de Energia

A conservação de energia leva à exploração racional dos recursos naturais, conforme ELETROBRÁS (2007). Uma maneira limpa e de baixo custo de se economizar energia elétrica é combatendo o seu desperdício. A energia que está sendo desperdiçada poderá ser utilizada para a alimentação de outra carga, sendo de baixo custo pelo fato da não necessidade de novos investimentos, e limpa por não agredir o meio ambiente.

A preocupação quanto à possibilidade da falta de suprimento de energia elétrica remete à necessidade de se avaliar de que forma esse tipo de energia vem sendo utilizado. Isso torna evidente que o problema não se limita apenas à necessidade de gerar cada vez mais energia, mas, primeiramente, a eliminar desperdícios, buscando o máximo de desempenho com o mínimo de consumo, avalia a ELETROBRÁS (1998).

Entretanto, essa busca por consumo eficiente de energia não desponta como uma situação fácil. Dos mais variados obstáculos para introdução da eficiência energética e conservação de energia no setor elétrico podem-se citar os seguintes fatores: falta de conhecimento das melhorias efetivas na utilização de energia elétrica por parte dos consumidores, falta de comprometimento dos usuários de equipamentos elétricos com a redução do desperdício e falta de capital dos consumidores para investimento em novas tecnologias que na maioria das vezes são mais eficientes.

É importante definir a conservação de energia como a forma de utilizar a energia elétrica de um modo mais eficiente, ou seja, melhorar a maneira de utilizá-la, sem abrir mão do conforto e das vantagens que ela proporciona. Portanto, a conservação de energia pretende diminuir o consumo, com isso uma diminuição dos custos, sempre levando em consideração que não se perca a qualidade dos processos produtivos proporcionada pelo uso da energia elétrica.

No cenário energético mundial pode-se perceber um grande aumento do desenvolvimento humano e conseqüentemente um aumento do consumo de energia elétrica. Esse significativo potencial de aumento de consumo de energia gera mais investimentos, que por sua vez implicam na degradação do meio ambiente, caso sejam consideradas as atuais formas de produção de energia. Embora o crescimento seja necessário, também deve haver a preocupação com a preservação do meio ambiente, assim, medidas de minimização da destruição dessa condição natural devem ser tomadas, é o que conclui Goldemberg (1998).

Segundo La Rovere (1985) e Dias (1999), a conservação de energia passa por seis níveis de intervenção perante a comunidade, sendo eles:

- Eliminação de desperdício;
- Aumento da eficiência das unidades consumidoras;
- Aumento da eficiência das unidades geradoras;
- Reaproveitamento dos recursos naturais pela reciclagem e redução do conteúdo energético dos produtos e serviços;
- Rediscussão das relações centro/periferia, no que tange ao transporte e à localização de empresas produtoras e comerciais;
- Mudança dos padrões éticos e estáticos, a partir dos quais a sociedade poderia penalizar os produtos e serviços mais energointensivos.

Para Dias et al. (2007), o papel da sociedade na conservação de energia ainda está aquém do que o que realmente deveria ser. Para uma maior atuação da sociedade no papel de conservar a energia, a mesma primeiramente deve ter o mínimo de conhecimento de como os sistemas energéticos influem em seu cotidiano, quais as suas implicações no meio ambiente e como isso resultaria em uma economia de capital e das reservas energéticas.

Segundo as metas estabelecidas pelo PROCEL (2007), caso seja mantida a estrutura atual de uso de energia elétrica, projeta-se uma necessidade de suprimento, em 2015, em torno de 780 TWh/ano. Caso os desperdícios sejam reduzidos, estima-se uma conservação anual de até 130 TWh (equivalente a produção de aproximadamente duas usinas de Itaipu). Uma das metas do PROCEL é a redução das perdas na transmissão e distribuição para um valor próximo de 10%. Juntamente com a adoção do SELO PROCEL espera-se um aumento médio de 10% no desempenho dos equipamentos que participam do programa.

Com a crise energética ocorrida nos anos de 2001 e 2002, o conhecido “apagão”, pôde-se perceber com maior intensidade a importância e o papel dos esforços em melhorias nos

usos finais de energia pelos diversos setores da sociedade. Significativas reduções do consumo de energia foram verificadas, chegando em algumas regiões do país até a 20%. Foram resultadas da introdução de tecnologias mais eficientes, substituições de eletricidade por energia solar e gás (GN e GLP) e também de grandes alterações nos padrões de comportamento, especialmente do consumidor residencial, é o que comenta Jannuzzi (2001). Portanto, uma demonstração do potencial existente, a eficiência energética foi a precursora das ações para o controle da demanda de eletricidade, comprovando o impacto positivo das medidas conservacionistas.

A crise de energia mostrou duramente como a energia elétrica não é abundante, cita Tolmasquim (2002). As conseqüências dela foram danosas para a economia do país, resultando em um crescimento do PIB de 1,4% (IBGE, 2003), muito abaixo das expectativas da época, deixando claro o quanto é estreita a relação entre desenvolvimento econômico e oferta de energia, e a necessidade de um planejamento em longo prazo de ampliação do parque gerador nacional.

O aumento contínuo do consumo de energia elétrica devido ao aumento populacional e ao aumento da produção industrial exige um planejamento antecipado e execução de políticas econômicas governamentais. Assim, essas políticas governamentais podem suprir a tempo as necessidades de expansão da produção de energia.

Um dos estudos mais importantes na área do setor energético brasileiro a respeito da formulação de políticas energéticas e orientações para o planejamento setorial é o BEN – Balanço Energético Nacional. A figura 2.1 ilustra o aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, com principal destaque para o setor industrial.

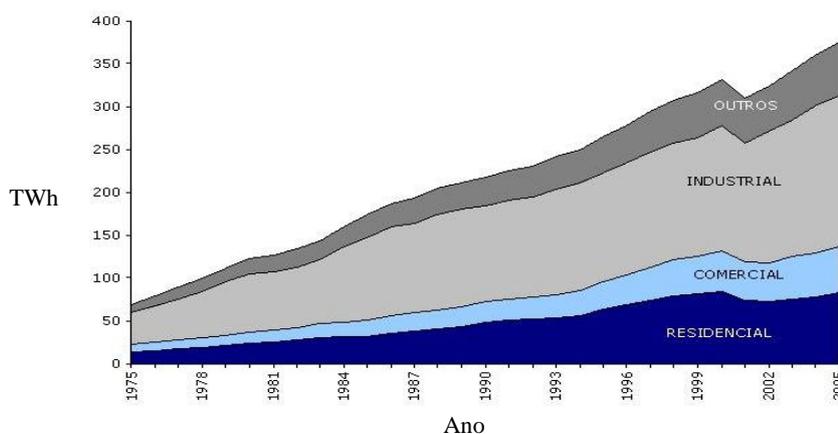


Figura 2.1 - Consumo de energia elétrica ano a ano em TWh segundo o setor da economia.

Fonte: BEN (2006).

O mercado de eletricidade tem crescido continuamente a taxas superiores às do crescimento do PIB, conforme ilustrado na figura 2.2. Portanto verifica-se a necessidade de um correto planejamento antecipado para a expansão do sistema de geração e distribuição no Brasil.

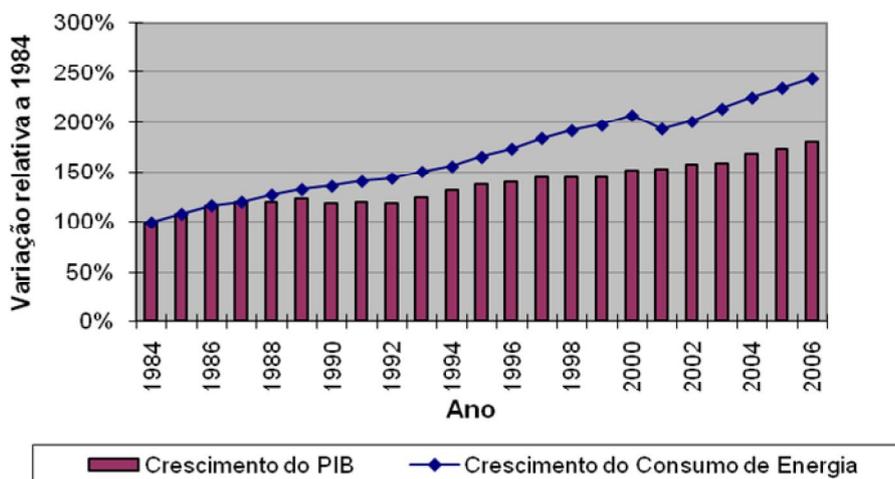


Figura 2.2 - Evolução do consumo de eletricidade, energia total e PIB (1984-2006).

Fonte: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada e Ministério de Minas e Energia

2.2. Consumo de Energia na Indústria Brasileira

O setor da economia brasileira que possui o maior consumo de energia é o industrial, com 44% desse consumo, conforme pode ser visto na figura 2.3. Para EPE (2007), a classe industrial contribuiu com um consumo de energia elétrica de quase 154 GWh no ano de 2006. Dessa maneira, também é responsável por grande parcela do desperdício da mesma. Portanto, são fundamentais estudos e investimentos para a conservação e uso eficiente de energia nesse setor.

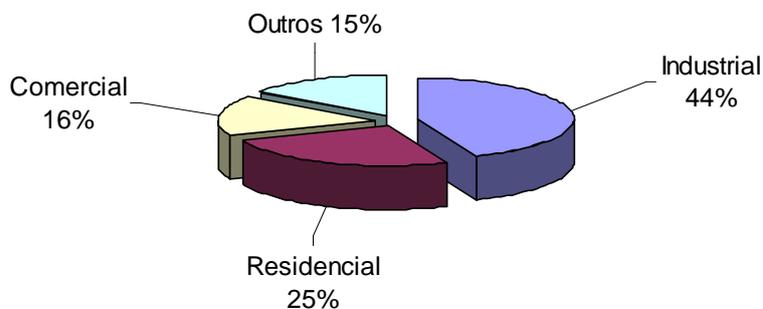


Figura 2.3 - Consumo de energia por setor no ano de 2006.

Fonte: EPE (2007).

A produção industrial brasileira apresentou um aumento de 4,5% no período de janeiro de 2006 à janeiro de 2007. Destacaram-se os setores de alimentos (crescimento de 5,5%), metalurgia básica (7,6%) e bebidas (13,1%), que se caracterizam por consumirem mais energia elétrica relativamente aos outros ramos. O aumento de 3,4% no consumo de energia, registrado de Janeiro de 2006 a Janeiro de 2007, reflete a tendência de avanço da produção industrial, que pela sétima vez consecutiva mostra acréscimo na comparação com o mês do ano anterior, é o que conclui EPE (2007).

A acelerada mudança do mercado nas últimas décadas obriga as empresas a acompanhar um ritmo veloz através de inovações, que podem ser: de métodos, de processos, de estratégias e de produtos, só assim, com esse aumento da competitividade, a sobrevivência no mercado é garantida. As empresas precisam constantemente melhorar seu desempenho pela otimização de seus recursos (água, energia, matéria-prima e resíduos). A meta é produzir mais com menos recursos, sem prejudicar a qualidade e segurança dos produtos, processos e serviços.

Em uma indústria os empreendimentos são desenvolvidos inicialmente com alguns propósitos particulares, mas, fundamentalmente, visam o lucro. Porém, estas empresas fazem uso de recursos naturais e insumos para a produção de bens e de serviços que movimentarão seus negócios. Portanto, o modelo de desenvolvimento econômico adotado pela indústria é de fundamental importância quando se refere ao desenvolvimento sustentável.

Young e Lustosa (2007) concluem que no sentido da utilização mais racional dos recursos, o aumento da produtividade e tornar a empresa mais competitiva só serão possíveis através de inovações, como a redução de custos e/ou pela melhoria de seus produtos.

2.3. Sistemas motrizes industriais

Analisando o BEN 2002, Garcia (2003) cita que a fonte de energia no setor industrial de maior participação é a elétrica, com 1/5 de contribuição, seguindo-se o bagaço de cana, com maiores consumos que os combustíveis fósseis.

Apesar do calor (aquecimento direto e calor processo) ser o maior representante do consumo de energia (86%), como observado na figura 2.4, suas fontes são principalmente o coque e o bagaço de cana.

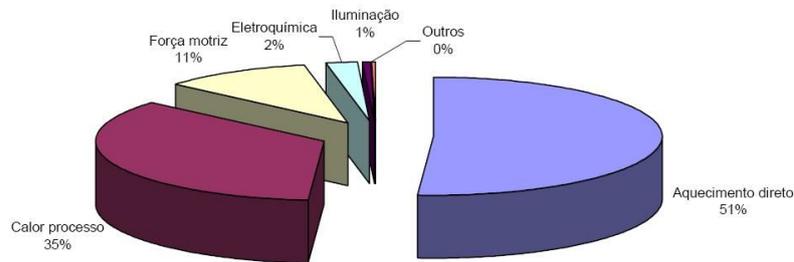


Figura 2.4 - Consumo de energia final na indústria por uso final.

Fonte: Garcia (2003).

A força motriz, que é objeto de estudo desse trabalho, é responsável por 11%. Contudo, a força motriz tem como principal fonte a eletricidade, conforme ilustra a figura 2.5.

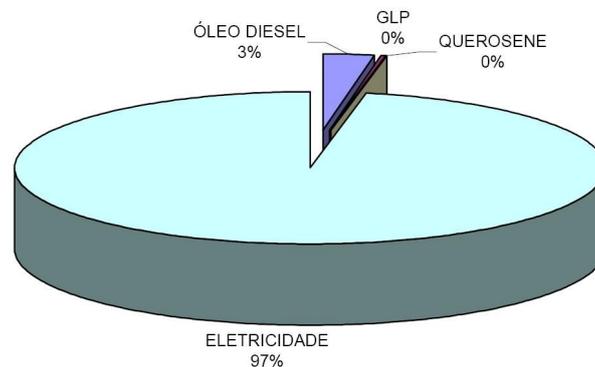


Figura 2.5 - Uso de energia para força motriz.

Fonte: Garcia (2003).

Em todos os setores industriais a força motriz é predominante, exceto aqueles que usam eletrotermia e eletrólise, como ferro-gusa e aço, ferro-ligas e alumínio. Assim, há um predomínio da força motriz sobre os diversos setores, logo, os motores elétricos correspondem a 60% da eletricidade consumida na indústria, comenta Garcia (2003).

Sendo assim, os motores são os responsáveis por grande parcela das perdas nas instalações industriais, conseqüentemente, o potencial de redução do consumo de energia é enorme. Muitas indústrias desperdiçam energia por causa de processos industriais ineficientes. Uma

boa parte dos motores usados no Brasil é do tipo “*standard*”, que possuem uma baixa eficiência energética, ou então, estão sobredimensionados para o trabalho que estão executando. Esse sobredimensionamento faz com que o motor trabalhe com um baixo fator de potência. Com o uso de motores eficientes e processos que consomem menos energia, uma indústria pode ter considerável redução no valor da conta de energia e contribuir para a redução de impactos ambientais, como já dito anteriormente.

Os sistemas motrizes podem ser divididos em algumas áreas, sendo elas: refrigeração, ar comprimido, compressão de processo, ventilação, bombeamento e equipamentos de processo. Para Correia (2007), a divisão em porcentagem da força motriz, para consumidores industriais de alta tensão, segundo essas áreas, é feita conforme mostra a figura 2.6. Com isso, o estudo particularizado dessas áreas, através de métodos e práticas, tem fundamental importância para o uso eficiente de energia e redução dos gastos com energia elétrica dentro da indústria.

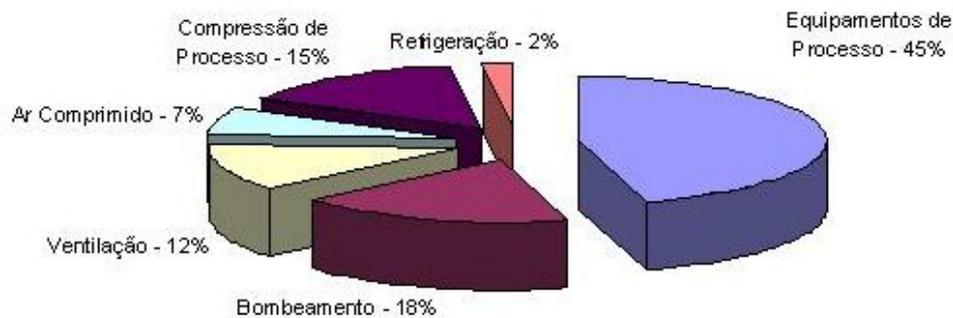


Figura 2.6 - Distribuição da força motriz por uso final.

Fonte: Correia (2007).

O motor de indução é o mais utilizado nos processos industriais. Suas principais vantagens são: eliminação do atrito de todos os contatos elétricos, facilidade de se encontrar no mercado e grande robustez. A sua construção, bastante simples, permite a redução do preço final do produto, e ainda, possui uma gama bastante variada de aplicações, desde alguns cv's até centenas de cv's. Além disso, proporciona vantagens econômicas quanto a sua manutenção, é o que diz Haddad et al. (2001).

O motor elétrico tornou-se um dos mais notórios inventos do homem ao longo de seu desenvolvimento tecnológico. Máquina de construção simples possui vantagens como: custo reduzido, versátil, não poluente, facilidade de transporte, limpeza fácil, simplicidade

de comando e pouca manutenção. Seus princípios de funcionamento, construção e seleção necessitam ser conhecidos para que ele desempenhe seu papel relevante no mundo de hoje.

O motor de indução é formado basicamente por duas partes principais: o rotor e o estator. O estator é a parte estacionária da máquina, enquanto que o rotor é a parte girante.

De todos os tipos de motores, o motor de indução de gaiola de esquilo é o mais simples e o mais usado no aspecto construtivo, segundo Kosow (2000), pois não tem comutador, nem anéis coletores, nem quaisquer contatos móveis entre o rotor e o estator. Esse tipo de construção leva a muitas vantagens, inclusive a uma operação com reduzida manutenção, indicando-se uma aplicação em localizações remotas, e sua operação em condições severas de trabalho, onde a poeira e outros materiais abrasivos sejam fatores a serem considerados.

A potência que o motor consome da rede é diferente da potência que ele entrega a carga. A potência entregue a carga é a potência que o motor consome de rede menos as perdas internas do motor.

Assim, a potência absorvida da rede é dada pela equação (2.1).

$$S_{3\Phi} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (2.1)$$

Onde:

U = tensão entre fases (V);

I = corrente da carga (A);

$S_{3\Phi}$ = potência aparente trifásica absorvida de rede (VA).

A potência aparente (S) corresponde a soma das potências ativa e reativa. A potência ativa (P) é a parcela da potência aparente (parte real) que realmente realiza trabalho, e a potência reativa (Q) é a parcela da potência aparente (parte imaginária) que não realiza trabalho, apenas é transferida aos elementos reativos (indutores e capacitores). Dessa forma, observa-se na equação (2.2) a composição da potência aparente.

$$S = P + jQ \quad (2.2)$$

Onde:

P = potência ativa (W);

Q = potência reativa (var).

O motor elétrico não consome apenas potência ativa que é convertida em trabalho mecânico, mas também reativa que não realiza trabalho, necessária para magnetização.

No triângulo de potências da figura 2.7 podem ser observados os vetores de potência ativa (P) e reativa (Q), que somados resultam na potência aparente (S), segundo um ângulo φ . É importante salientar que φ é o ângulo de defasagem da corrente em relação a tensão, e o $\cos(\varphi)$, chamado de fator de potência corresponde à relação entre S e P, observada na equação (2.3).

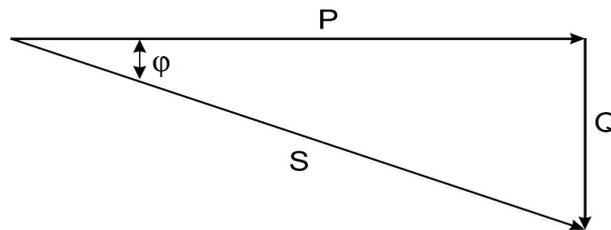


Figura 2.7 - Triângulo de potências para carga indutiva.

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

Carga resistiva: $\cos(\varphi) = 1$;

Carga indutiva: $\cos(\varphi)$ atrasado;

Carga capacitiva: $\cos(\varphi)$ adiantado.

Assim, nas equações (2.4) e (2.5) temos a potência ativa e reativa, respectivamente.

$$P = S \cos(\varphi) \text{ ou } P = \sqrt{3} \cdot U.I.\cos(\varphi) \quad [\text{W}] \quad (2.4)$$

$$Q = S \sin(\varphi) \text{ ou } Q = \sqrt{3} \cdot U.I.\sin(\varphi) \quad [\text{var}] \quad (2.5)$$

Visando otimizar o aproveitamento de energia elétrica, a legislação brasileira estabelece que o fator de potência a ser trabalhado seja 0,92. Isso porque o trânsito de energia reativa no sistema sobrecarrega-o de maneira ineficiente (além de acarretar outros problemas), ou seja, a energia ativa que poderia estar fluindo (gerando trabalho) está cedendo lugar à energia reativa, ressaltando que a energia reativa não realiza trabalho.

Nos motores, por serem cargas predominantemente indutivas, o aumento do fator de potência é feito através da ligação em paralelo de: capacitores ou motores síncronos super excitados, sendo que o uso de capacitores é o mais usual por motivos de custo, facilidade e

baixa manutenção. O uso de motores síncronos super excitados geralmente se dá quando ele já faz parte da linha de produção da fábrica, assim tem-se a vantagem da não necessidade do investimento inicial apenas para a correção do fator de potência.

Para Caderno Digital (2001), em motores maiores que 30 cv as perdas podem chegar a 10%. Caso a carga no eixo decresça, o rendimento também cai. Assim, o dimensionamento inadequado do motor pode resultar em desperdício de energia.

A potência de saída não é igual a de entrada devido as perdas internas do motor. As perdas de potência são divididas em:

- Perdas Joule: são as perdas que dependem da corrente. Perdas no enrolamento do estator e nas barras do rotor;
- Perdas no ferro: são as perdas que dependem da indução magnética, frequência e qualidade do material ferromagnético;
- Perdas Mecânicas: são as perdas que dependem da rotação, perdas pelo atrito e ventilação.

2.4. Eficiência em Motores Elétricos na Indústria

O motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo é largamente utilizado na indústria, correspondendo a 75% dos motores existentes no Brasil. Na indústria, devido à utilização de motores de maior porte este número é seguramente maior, isso porque os 25% restantes constituem-se de motores menores que 1 cv, monofásicos, com aplicações em equipamentos residenciais como geladeiras, ar-condicionado, máquina de lavar, entre outros, conforme Garcia (2003).

Alguns dos fatores que influenciam o desempenho do motor de indução são: dimensionamento incorreto, desequilíbrio entre fases e variação da tensão de alimentação em relação a nominal, comentam Campana et al. (1999). Para Garcia (2003), outros fatores que influenciam diretamente no rendimento de um motor são: motor rebobinado, instalação inadequada, alimentação elétrica e manutenção.

Para Almeida (2001), a manutenção do motor de indução como a lubrificação adequada (nem a mais, nem a menos), ambiente limpo, boas conexões, são fatores que ajudam a melhorar a operação desse equipamento, mas esse ambiente nem sempre é encontrado.

A maior ocorrência da falta do uso eficiente de um motor de indução é o seu superdimensionamento. O superdimensionamento ocorre, geralmente, pela falta de conhecimento sobre o ciclo de carga e os coeficientes de segurança, adverte Caderno Digital (2001). Um exemplo disso é um sistema de bombeamento onde o engenheiro mecânico aplica o coeficiente de segurança sobre a potência e o rendimento da bomba, o engenheiro de processo aplica outro coeficiente sobre o valor da vazão necessária, ainda assim o motor escolhido será aquele que possui potência imediatamente superior ao calculado; ou então na hora da compra, o vendedor sugere um motor de grande potência, pois assim, ele irá trabalhar com “folga”. Esses são apenas alguns exemplos de casos em que pode ocorrer superdimensionamento de um motor de indução.

Caso o motor trabalhe com baixos índices de carregamento haverá a diminuição do rendimento a valores insatisfatórios. Segundo WEG (2007), a faixa de operação para se obter um maior rendimento deve ser entre 75 e 100% da potência nominal.

Outro inconveniente do superdimensionamento é o baixo fator de potência. Quanto menor o fator de potência maior serão as correntes que circularão desnecessariamente pelo motor e pela rede. Além disso, segundo Campana et al. (1999), alguns outros prejuízos podem ser citados: aumento do nível de corrente do circuito e o conseqüente incremento de perdas, queima de motores causada pela flutuação de tensão, sobrecarga de equipamentos, desgaste dos equipamentos de proteção e manobra, impossibilidade de instalação de novas cargas em transformadores carregados (devido a utilização da capacidade instalada para a potência reativa), e aumento de investimentos em condutores e equipamentos.

Como se pode perceber, as conseqüências de um baixo fator de potência implicam em uma grande quantidade de problemas. Portanto é visto que a correção do mesmo para valores mais elevados é de fundamental importância.

Foi com esse intuito que, a partir de 1994, o Brasil passou a penalizar financeiramente empresas consumidoras que trabalhassem com fator de potência menor que 0,92. O total de economia com a melhoria do fator de potência até 1999, foi estimada em cerca de 2.258 GWh, valor próximo ao total de energia elétrica consumida pelo setor público em 1998 concluem ELETROBRÁS (1998), Galvão et al. (1998) e BEN (1999).

Na figura 2.8 em a) e b) observa-se as relações Rendimento (η) x carga e Fator de Potência ($\cos\phi$) x carga, respectivamente.

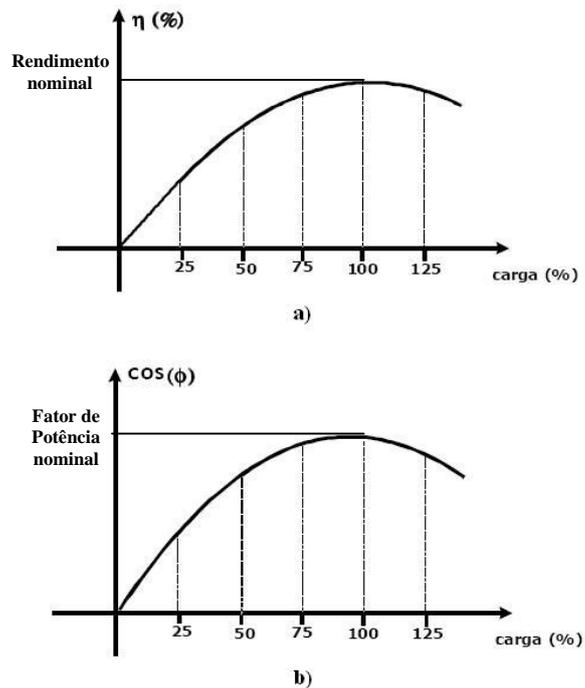


Figura 2.8 - Curvas típicas: a) η x carga; b) $\cos\phi$ x carga.

2.5. Motores de Alto Rendimento

Os motores de alto rendimento, devido ao seu projeto de construção, possuem características que fazem com que ele tenha uma performance melhor que os motores convencionais, ou seja, podem fornecer a mesma potência no eixo que um motor do tipo *standard*, porém consumindo menos energia da rede elétrica GUALBERTO (2007). Aumentar o rendimento de um motor de indução significa diminuir as perdas, é o que diz Schaeffer (2005). As perdas podem ser reduzidas de 20 a 50% com a otimização do projeto e uso de materiais de melhor qualidade. A fabricação de um motor de alto rendimento leva em consideração todas as perdas, procurando diminuí-las. Dentre as características construtivas dos motores de alto rendimento, destacam-se:

- Chapas metálicas de melhor qualidade (aço silício);
- Maior volume de cobre, o que reduz a temperatura de operação;
- Enrolamentos especiais;
- 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.

Com as modificações anteriormente citadas, os motores de alto rendimento apresentam vantagens com relação aos motores *standard* como: menor temperatura de trabalho (resultando em vida útil maior), menor necessidade de manutenção, menor nível de ruído e vibrações (devido ao melhor balanceamento e menores tolerâncias de fabricação), conforme Pereira (2007).

Ainda segundo Pereira (2007), devido a suas características construtivas, os motores de alto rendimento são motores que possuem perdas menores que os motores *standard*, resultando assim numa melhoria do rendimento. Este aumento do rendimento varia com a potência do motor e com o fabricante, portanto não sendo um valor constante.

Como o custo da energia vem se tornando cada vez maior, a utilização de motores de alto rendimento (mesmo que com um custo de investimento inicial maior que o custo de um motor padrão) torna-se justificável na maioria dos casos. Esses motores de alto rendimento reduzem os custos com o consumo de energia elétrica, além de proporcionar outros ganhos à sociedade. Com o uso desses motores tem-se uma utilização mais racional dos recursos naturais, conclui Gualberto (2007).

Para Lobosco e Dias (1988) nos estudos voltados à substituição de motores deve ser levado em consideração o critério do retorno do capital, que se dará pela redução do consumo de energia resultante da utilização do motor de melhor rendimento.

Em 17 de Outubro de 2001 foi promulgada a lei n° 10295, conhecida como Lei da Eficiência Energética. A lei estabelecia a decisão de criar “níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País”. Foi regulamentada pelo Decreto n° 4059 de 19 de Dezembro de 2001.

Um ano após a criação e regulamentação da Lei da Eficiência Energética foi aprovado o Decreto n° 4508/2002 que regulamentou os índices de eficiência energética para os “motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo”. O decreto estabelece, no

Art. 3º, que “o indicador de eficiência energética a ser utilizado é o rendimento nominal”. A adoção dos índices propostos representou um passo adiante no desenvolvimento do processo de substituição de motores padrão para os motores de alto rendimento.

Schaeffer (2005) fez o estudo a respeito dos índices propostos pelo Decreto nº 4.508/2002 para os motores de indução trifásicos de alto rendimento gaiola de esquilo e seus impactos, entre eles: comparação com práticas internacionais, impacto potencial para os fabricantes, impactos financeiros para os consumidores, consumo de matéria-prima, impacto sobre a importação de motores, extensão dos índices para motores até 500 cv e os benefícios trazidos à sociedade. Sua conclusão foi que a troca dos motores é altamente atrativa financeiramente, além dos benefícios sociais e ambientais que traz, porém, como os custos serão assumidos pelos consumidores finais, sugere-se a adoção de incentivos que possam transferir uma parte do investimento evitado para o setor. Assumir parte dos custos necessários para adaptação do setor fabril pode ser um exemplo de transferência de investimentos.

A CEMIG (1997) analisou três situações para o uso de motores de alto rendimento em uma indústria de cimento em Minas Gerais, são elas: 1º - queima do motor original e substituição por um motor novo; 2º - substituição do motor original em boas condições por um novo de alto rendimento e 3º - aquisição de motores de alto rendimento para uma nova instalação.

Os resultados desse estudo de caso mostram que o uso do motor de alto rendimento é uma ótima opção. Principalmente quando ocorre queima de um motor padrão e a substituição do mesmo por um de alto rendimento ou quando se adquire motores de alto rendimento para uma nova instalação. Quando se trata da substituição de motores padrão em boas condições de funcionamento pelos motores de alto rendimento a alternativa pode não ser tão atrativa, mas nesse estudo de caso, por exemplo, dos três motores analisados (7.5, 20 e 75 cv), o motor de 75 cv foi uma boa alternativa de troca. Portanto, vale a pena considerar a aplicação de motores de alto rendimento como forma de redução de custos para a empresa, é a conclusão que CEMIG (1997) obtém desse estudo de caso.

No estudo realizado por Neto (2004) em uma indústria de armazenamento de grãos a economia proveniente da substituição do motor *standard* por um motor de alto rendimento de 30 cv em um dos aeradores proporcionaria um tempo de retorno do investimento neste motor de 4,85 anos. É importante salientar, entretanto, que o tempo de retorno na maioria

das vezes é diferente para cada consumidor, haja vista que a economia depende do comportamento da curva de carga de cada um, da estrutura tarifária, entre outros fatores que devem ser considerados.

Os motores de alto rendimento custam em geral 30% mais caro que os motores do tipo *standard*, segundo Pereira (2007). Assim, uma análise econômica visa fornecer subsídios para que a decisão seja tomada, se a substituição de motores do tipo *standard* pelos de alto rendimento é viável ou não. Ressalta-se que a diferença de preço entre os motores foi diminuída a partir da isenção do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) para os modelos de alto rendimento.

A análise econômica deve levar em consideração fatores como:

- Rendimento dos motores sob análise – a confiabilidade da análise está diretamente relacionada com a confiabilidade dos dados de rendimento;
- Número de horas em operação – aplicações em que o motor opera poucas horas geralmente o investimento em motores de alto rendimento não compensa economicamente;
- Nível de carregamento – o rendimento do motor depende da carga que está sendo solicitada, quanto mais próximo do valor nominal maior será o rendimento;
- Custo da energia (R\$/kWh) – o custo da energia varia conforme o tipo de consumidor e da concessionária;
- Vida útil do motor – já que a economia do uso de motores de alto rendimento é possível, torna-se necessário estimar quanto ele irá economizar durante a sua vida útil;
- Taxa de juros – a comparação das taxas referenciais com as diversas alternativas é necessária para a aplicação do capital, que varia da perspectiva do usuário do motor, como da sua disponibilidade financeira.

Pereira (2007) conclui ainda que o uso de motores de alto rendimento é altamente atraente quando: em novas instalações; compra de pacotes incluindo motores; mudança nas instalações (ampliação); alternativa para rebobinagem (queima); troca de motores mal dimensionados; parte de um programa de efficientização; incentivo por parte de terceiros.

2.6. Acionamento Eletrônico

Com os grandes avanços conseguidos por estudos na área de eletrônica de potência, o acionamento eletrônico tornou-se uma alternativa atraente quanto ao seu potencial significativo de conservação de energia. O acionamento eletrônico pode ser usado tanto como método de partida (*soft-starters*) ou como métodos de controle de vazão (inversores) no caso de bombas centrífugas.

A energia elétrica distribuída no Brasil possui frequência de 60 Hz, uma vez que a velocidade do motor de indução trifásico é proporcional à frequência das tensões e da corrente de entrada e estes são alimentados diretamente pela rede, os motores de indução atendem suas cargas satisfatoriamente bem quando usados em aplicações à velocidade constante. Porém, em muitas aplicações, o controle de velocidade pode ser requerido e com isso, o acionamento eletrônico se apresenta com o intuito de satisfazer essa necessidade, a necessidade de um maior controle do motor, também garantindo com isso uma maior faixa de operação do mesmo.

Além de garantir uma maior versatilidade ao motor de indução quanto ao seu controle, os acionamentos eletrônicos também são utilizados como forma de conservar energia elétrica. Como exemplo, pode ser usado para o controle de vazão em processos de bombeamento, substituindo os controles tradicionais de forma muito mais eficiente, tais como válvula de controle, *by-pass*, sistema *on-off*. Esses processos, largamente utilizados em indústrias, possuem potencial de redução de energia elétrica na ordem de até 30% teoricamente, comenta PROCEL (2004b).

Diminuir a entrada de energia, com o uso dos acionadores eletrônicos faz com que haja uma redução do consumo de energia. Essa economia de energia além de trazer benefícios para a conservação dos recursos naturais faz com que o capital investido para a compra do equipamento tenha um retorno financeiro em curto período de tempo. Como exemplo, para um sistema de bombeamento de grande porte operando com velocidades variáveis, estima-se que o tempo de recuperação do capital investido seja da ordem de 3 a 5 anos, enquanto a vida útil do equipamento é de 20 anos. Ou seja, haverá operação lucrativa em um período de 15 a 17 anos apenas com a redução do consumo de energia elétrica, é o que diz PROCEL (2005).

Para Oliveira (2000), o avanço da eletrônica de potência dos últimos anos resultou no surgimento de novos equipamentos e de novas topologias, destinados a modernizar as técnicas convencionais de acionamentos elétricos para motores de indução. O *soft-starter*, por exemplo, vem como equipamento de substituição aos métodos tradicionais de partida (Y- Δ e compensadora) com muitas vantagens.

Um dos equipamentos muito utilizados para a alimentação de motores de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo são os inversores de frequência. Eles permitem um acionamento de velocidade variável, controlando a tensão e a frequência da rede.

Para Ottoboni (2002), a tecnologia dos inversores evoluiu proporcionando características de controle de velocidade e de torque em um motor de indução. O primeiro instante dessa evolução foram os conversores de frequência com controle escalar (controle da relação tensão/frequência – V/f) e chaveamento PWM (modulação por largura de pulso), e posteriormente, visando melhorar a performance dos conversores de frequência foi desenvolvido o modelo de controle vetorial.

O motor elétrico atende satisfatoriamente as exigências das aplicações à velocidade constante, segundo Brasil (1998). Entretanto, muitas vezes é necessária a variação da velocidade dos motores, como por exemplo, na utilização de um ventilador de velocidades variadas.

Os inversores ajustam seus parâmetros de modo a manter o rendimento de um motor na condição nominal de carga ou próximo dela, portanto. Assim, o inversor adapta-se conforme as solicitações da carga acionada pelo motor, comentam Hanson et al. (1996). Em suas análises (foram analisadas cinco situações) concluíram que para que fosse vantajosa economicamente o investimento na compra de um acionador eletrônico trabalhando de forma a reduzir o consumo de energia o motor deve operar entre 500 e 1000 horas por ano.

O princípio de funcionamento de um inversor de frequência com controle escalar é aplicar uma onda de tensão (V) de amplitude e frequência (f) variáveis mantendo a relação V/f sensivelmente constante. A onda de tensão aplicada ao motor é gerada por dispositivos eletrônicos de potência chaveados a altas frequências. Entretanto, cabe citar que outros tipos de inversores que estão no mercado trabalham com técnicas diferentes da “V/f constante”.

A técnica de modulação PWM consiste em aplicar uma sucessão de pulsos de tensão no motor de indução, com amplitude igual a tensão contínua fornecida pelo retificador, também, os pulsos são modulados com larguras diferentes, de forma a criar uma tensão alternada de amplitude variável.

No esquema PWM o inversor coloca harmônicas de alta frequência (acima da 17^a), de forma que, mesmo em baixas velocidades, devido a ausência de harmônicos de baixa frequência (5^a, 7^a, 11^a e 13^a) a máquina não terá torques pulsantes que produzem oscilações e nem perdas de aquecimento devido a presença destas.

A economia proporcionada pelo inversor de frequência é dada em função da redução da potência de entrada, do número de horas de funcionamento e do preço da energia elétrica, comenta Arruda (1988).

Quando há a necessidade apenas da variação de rotação e partidas suaves o inversor do tipo escalar (relação V/f) pode ser usado com grande satisfação. Mas, quando um controle mais eficaz é necessário o uso dos inversores tipo vetorial são os mais adequados, pois controlam a tensão (V) e a frequência (f) independentemente uma da outra, não mais seguindo apenas a relação V/f, explica Araújo (2003).

É importante salientar que um inversor vetorial pode substituir um escalar, mas nem sempre o escalar pode substituir um vetorial, contudo, nem toda aplicação é crítica o bastante para o uso do inversor vetorial. O aspecto construtivo desses dois tipos de inversores é semelhante, alguns fabricantes mudam apenas o *software* aplicativo para cada tipo de controle, outros utilizam uma placa extra que, quando presente, transforma o inversor escalar em vetorial. Como o preço do inversor vetorial é maior que o escalar, caso a utilização não seja crítica, a utilização de inversores escalares poderá representar uma economia razoável, analisa Araújo (2003).

O inversor escalar não oferece altos torques em baixas rotações, pois o torque é função direta da corrente de alimentação (depende da tensão – relação V/f). O inversor vetorial por ter o controle de “V” e de “f” independentes através do controle das correntes de magnetização e do rotor adapta suas variáveis de acordo com a solicitação de torque da máquina. O inversor vetorial é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável. Já o escalar é indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e operação com constantes reversões, concluem Rodrigues e Júnior (2002).

2.7. Sistemas de Bombeamento

Uma bomba é um instrumento capaz de transferir energia de uma fonte para um líquido, assim esse líquido pode realizar trabalho PROCEL (2005).

Objeto desse estudo, as bombas centrífugas são largamente encontradas em diversos ramos de sistemas de bombeamento devido a: facilidades de instalação, manutenção barata, flexibilidade de operação e investimento inicial baixo, comenta Sobrinho e Santos (1998). Alguns exemplos de aplicações: irrigação, sistemas de água gelada (ar condicionado), saneamento, indústrias químicas, petroquímicas, indústria açucareira, destilarias, circulação de óleos entre outras diversas aplicações.

2.8. Características das Bombas Centrífugas e do Sistema de Bombeamento

Uma bomba centrífuga pode operar a uma velocidade constante e produzir vazões que vão de zero até um valor máximo, dependendo do projeto da bomba. Diversas são as variáveis que dependem da sua capacidade, entre eles a carga total (H), a potência (P) e o rendimento (η).

A potência que a máquina entrega ao líquido é diferente da potência consumida por ela. Pode ser definida pela equação (2.6):

$$P_c = (\gamma \cdot Q \cdot H) / (75 \cdot \eta) \quad (2.6)$$

Onde:

P_c – potência cedida ao líquido (cv);

γ – peso específico do líquido (kgf/m^3);

Q – Vazão (m^3/s);

H – carga da bomba (m);

η – rendimento da bomba.

A potência consumida da rede de energia elétrica por uma bomba centrífuga tocada por um motor elétrico de indução trifásico é dada pela equação (2.7).

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \eta \cdot \cos\phi \quad (2.7)$$

Onde:

P_e – potência consumida da rede elétrica por motor de indução trifásico (W);

V – tensão entre fases (V);

I – corrente (A);

$\cos\phi$ – fator de potência;

η – rendimento da bomba.

2.9. Leis de similaridade dos sistemas de bombeamento

Dentre os fatores que influenciam na curva característica da bomba, cita-se a variação da viscosidade do líquido, mudança do diâmetro do impelidor, entre outros. No entanto, baseado no enfoque do presente trabalho cita-se a variação da rotação da bomba como fator mais importante.

Para a variação da rotação tem-se a variação da vazão (Q), dada pela equação (2.8), da carga (H), dada pela equação (2.9) e da potência absorvida, dada pela equação (2.10).

$$Q = Q_1 \left(\frac{N}{N_1} \right) \quad (2.8)$$

$$H = H_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^2 \quad (2.9)$$

$$P = P_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^3 \quad (2.10)$$

Onde:

Q e Q_1 – vazão obtida com a nova rotação e vazão antiga, respectivamente (m^3/s);

N e N_1 – nova rotação e rotação antiga, respectivamente (rpm);

H e H_1 – nova carga e carga antiga (m);

P – potência absorvida com a nova condição (W);

P_1 – potência absorvida nas condições iniciais (Q_1 , H_1 e N_1) (W).

2.10. Conservação de Energia em Sistemas de Bombeamento

A preocupação com a redução do consumo de energia em sistemas de bombeamento remete às recentes e às prováveis futuras crises energéticas no Brasil. É motivada também, em escala mundial, seja pela necessidade da contenção de despesas operacionais e/ou pela tão difundida necessidade de redução dos impactos ambientais.

Segundo James et al. (2002) é possível se obter uma redução de no mínimo 25% do consumo de energia em sistemas hidráulicos no mundo. Para isso, é necessária a implantação de ações de eficiência energética que possibilitem o aumento do desempenho desses sistemas.

A utilização de variadores eletrônicos de velocidade para o acionamento de certos tipos de cargas industriais, dentre elas as bombas centrífugas, pode contribuir para uma redução de aproximadamente 47 TWh/ano até 2015 na indústria europeia, segundo estimativas de Almeida et al. (2005).

Para Tsutiya (2001), no Brasil, as empresas de saneamento têm na energia elétrica o seu mais alto custo operacional. Essa afirmação pode ser facilmente compreendida devido ao fato de que muitas plantas de distribuição de água apresentam perdas por vazamentos, bombas mal dimensionadas, além de enquadramento em estruturas tarifárias menos vantajosas economicamente.

Para se ter uma idéia do alto consumo de energia elétrica em sistemas de bombeamento, cita-se que o maior consumidor desse insumo no estado de São Paulo, um dos mais desenvolvidos do país, é exatamente uma empresa de saneamento que abastece grande parte dessa unidade federativa.

Segundo dados da ELETROBRÁS (2007), mais de 2% do consumo total de energia elétrica do Brasil (aproximadamente 8,3 bilhões de kWh por ano) são consumidos por empresas prestadoras de serviços de abastecimento de água. É importante ressaltar também

que o aumento dos custos com energia elétrica dessas empresas geralmente é repassado ao consumidor através da inclusão no reajuste de tarifas de água, ou seja, as empresas certamente não absorvem todo o prejuízo vindo do desperdício de energia.

Dentre as possibilidades de redução do consumo de energia em sistemas de bombeamento hidráulico, a efficientização do uso do elemento acionador (no caso o motor elétrico de indução) pode trazer excelentes resultados.

No estudo de Machado (2007) as soluções apontadas como determinantes para a economia de energia nos sistemas de bombeamento foram: substituição do motor *standard* por motor de alto rendimento, adequação da potência do motor à carga, e utilização de inversores de frequência para controle de vazão.

Para sistemas em que há a necessidade de controle de vazão de um fluido, PROCEL (2004b) destaca os seguintes processos:

- Liga-desliga – o motor liga quando a vazão atinge um limite inferior e desliga quando atinge um limite superior. Devido ao fato de acontecer diversas partidas em curtos espaços de tempos as partes elétricas e mecânicas são comprometidas. Um sistema altamente ineficiente e gera muita manutenção, por isso muito pouco usado;
- *By-Pass* – uma válvula de controle é utilizada para retornar o líquido da tubulação de recalque para o reservatório de sucção. É o método menos eficiente e menos usado para o controle de vazão em plantas industriais;
- Válvula de estrangulamento – controla a vazão através da abertura ou do fechamento parcial de uma válvula instalada em série com a bomba. É um método comumente utilizado em processos industriais e possui um rendimento um pouco maior que o controle *by-pass*;
- Acionamento eletrônico – permite maior precisão do controle da vazão aliada a uma significativa economia de energia.

Percebe-se que os controles “usuais” não possuem um rendimento satisfatório, ou seja, não visam a eficiência no consumo de energia elétrica, portanto, o controle da vazão através do acionamento eletrônico é uma alternativa altamente atraente quanto a economia de energia elétrica.

Segundo os ensaios realizados por Schmdlin (2006) observou-se uma redução da potência demandada por um conjunto moto-bomba de aproximadamente 50% quando utilizado o inversor de frequência ajustado para 45 Hz. Contudo, essa característica de funcionamento (velocidade constante) não se aplica a todos os casos encontrados em sistemas de bombeamento. Em certas aplicações há a necessidade de que a vazão varie ao longo do regime de funcionamento, e como exemplo, podem ser citados sistemas de irrigação que recebem leitura de sensores de umidade estrategicamente instalados na terra de modo que a informação repassada ao conjunto de bombeamento permita que este envie a quantidade suficiente de água.

Segundo Silva Jr. (2004) a variação da velocidade dos motores em sistemas de bombeamento e ventiladores, para controle de vazão e pressão, representa excelente oportunidade para redução do consumo de energia. Em seu trabalho foi observada uma economia de até 74,63% utilizando inversor de frequência em aeradores de silos, sem prejudicar a qualidade da conservação dos grãos.

Através de ensaios realizados em laboratório, Silva et al. (2007) destacam a redução de consumo de energia elétrica da ordem de 16% em um sistema de bombeamento quando substituído o motor *standard* por motor de alto rendimento. Entretanto, em sistemas presentes em plantas industriais, deve-se tomar o cuidado de que uma possível substituição de motores não seja feita indiscriminadamente, mas que antes haja uma avaliação da viabilidade econômica do investimento a ser feito. Ou seja, deverá ser avaliada não apenas a redução em kWh mas também a redução em Reais (R\$) sendo que esta dependerá de fatores particulares de cada consumidor, como o enquadramento tarifário, por exemplo.

Bardales et al. (2007) cita a importância do desenvolvimento de ferramentas computacionais para facilitar a análise conjunta de eficiência do ponto de vista hidráulico e energético em sistemas adutores de água. Da mesma forma Walski (1993) já destacava o uso de sistemas computadorizados otimizados como uma das importantes formas de se obter um melhor nível de conservação de energia em sistemas de bombeamento.

Abrahamsem et al. (1998) através do desenvolvimento de técnicas de controle alternativas ao controle pela relação tensão / frequência (V/f constante) observaram uma redução no consumo de energia em torno de 10% em um sistema de bombeamento operando com carga variável.

Vieira Jr. et al. (2006), em estudo de eficiência energética voltado para uma estação elevatória de água bruta em Belém, PA, adotaram técnicas de simulação através de modelos matemáticos que mostraram uma redução de 22,7 % no consumo de energia com a instalação de inversores de frequência.

Em um estudo realizado em sistemas de bombeamento para fins de irrigação de arroz no Rio Grande do Sul, Ocácia et al. (2002) observaram grandes parcelas de desperdício de energia provenientes de superdimensionamento de bombas, baixo fator de potência, utilização de bombas de baixa eficiência, entre outros.

Rooks e Wallace (2004) após avaliarem o potencial de conservação de energia advindo da utilização variadores de velocidade em sistemas motrizes com carga variável, entre elas as bombas centrífugas, destacam que a economia obtida é mais significativa do que o simples fato de se substituir o motor em funcionamento por outro de melhor rendimento. Todavia, não deve ser desprezada esta última possibilidade já que uma não depende da outra, ou seja, em um sistema de bombeamento acionado por um motor *standard* e sem controle eletrônico de velocidade o maior potencial de economia de energia provavelmente virá da alteração do conjunto para motor de alto rendimento com inversor de frequência.

Conforme Araújo (2003), a utilização de inversores de frequência em sistemas de bombeamento é viável quando o sistema apresenta condições de operação que necessite de variação de vazão e pressão nas tubulações. Também quando há a necessidade do controle sobre a rotação, partida e desligamento do motor, com a finalidade de conservar e racionalizar o uso de energia elétrica.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

3.1. Automação Industrial

Segundo Pupo (2002), em automação industrial busca-se essencialmente a eliminação da intervenção humana em um processo de produção, quer seja na operação de máquinas na linha de produção ou no controle de processos que envolvam variáveis mensuráveis e a partir das quais uma eventual atuação seja necessária para obtenção do produto ou resultado final.

Ainda que acarrete na substituição de mão-de-obra ou mesmo da extinção de uma função dentro da fábrica, a automação de uma indústria é indicada sempre quando se detecta a necessidade de torná-la mais produtiva, além de promover a reciclagem do funcionário que trabalhava na operação do processo antes de sua automatização (PUPO, 2002).

Conforme Warnock (1997), no mundo competitivo de hoje uma companhia deve ser eficiente, manter boa relação custo-benefício e ser flexível, se deseja sobreviver. Nas indústrias de manufatura e processos isto tem gerado grande aumento na demanda de sistemas de controle industriais no sentido de otimizar as operações que envolvem velocidade, confiabilidade, versatilidade e o fluxo da produção.

3.1.1. Analogia entre Automatismo e Corpo Humano

Segundo Schneider (2007), é possível fazer uma analogia de uma automação com os cinco sentidos do corpo humano que correspondem aos sensores periféricos. Da mesma forma, as mensagens provenientes de nossos órgãos correspondem às ordens de execução que a automação deve seguir para assegurar o desenvolvimento de diferentes operações. Quando um de nossos sentidos é ativado, as células nervosas (ou neurônios) reagem e transmitem os estímulos para todo o organismo através das fibras nervosas.

Em uma automação, todos os fios e conexões que transmitem as informações geradas pelos sensores são assimiláveis às fibras nervosas do corpo humano. Transmítidos por meio das

fibras nervosas e agrupadas em "condutores" comuns - os nervos - os estímulos ou as mensagens atingem os centros nervosos - a medula ou o encéfalo.

Todas as mensagens são centralizadas e interpretadas pelo cérebro que nos fornece instantaneamente uma representação consciente do nosso corpo e do mundo que o circunda. O cérebro, que memoriza as ações a executar com o aparecimento de uma determinada mensagem, gera então um comando que, através dos nervos, ordena aos músculos um movimento específico ou coordena um conjunto de movimentos.

Ainda conforme Schneider (2007), em um controlador, da mesma forma, o programa que contém todas as operações a executar é armazenado em uma memória. As informações geradas pelos sensores são transmitidas ao processador, que as compara com o programa memorizado, interpretando-as; sempre que há uma concordância entre o estado dos sensores e o programa, o controlador envia comandos aos acionadores predispostos para a execução das operações.

3.1.2. Histórico e Vantagens da Automação Industrial

A automação industrial se iniciou com o controle pneumático de medidas analógicas tratadas com estratégias de controle clássico através de relés e solenóides. Grandes painéis com instrumentos de medição analógicos ocupavam enormes espaços, inicialmente junto às máquinas da linha de produção e posteriormente centralizada em imensas salas de supervisão (MOORE, 1986).

A evolução da eletrônica a partir do surgimento de transistor e dos circuitos integrados fez reduzir o tamanho e o custo dos painéis de supervisão, mas ainda atuando analogicamente sobre o controle dos processos. O advento dos microprocessadores foi o grande avanço que permitiu a digitalização dos processos com grande vantagem sobre o método analógico. As vantagens proporcionadas identificadas por Moore (1986) foram:

- **Flexibilidade proporcionada pela programação**

Flexibilidade na aplicação do equipamento digital: as modificações em um processo analógico exigem mudanças físicas, enquanto os equipamentos digitais só necessitam de uma atualização no *software*.

Flexibilidade na medição dos parâmetros do processo: grandezas medidas podem ser modificadas para representar condições reais de um processo que não podem ser medidas diretamente, evitando-se assim inferências na malha de controle.

Flexibilidade no desempenho do controle: ajustes podem ser programados com a finalidade de se otimizar um processo em situações impossíveis para um operador numa planta analógica.

- **Melhora na Interface Homem-Máquina**

Segundo Moraes e Castrucci (2001), Interface Homem-Máquina (ou simplesmente IHM) é parte de um sistema supervisor que surgiu da necessidade de uma interface amigável, eficiente e ergonômica entre sistemas de automação complexos e a equipe encarregada de sua operação. Devem portanto ser construídas tendo o operador como usuário final e representar o processo real.

Conforme Haaland (1996), o desenho de uma IHM é crítico para a operação da planta, pois é a janela do operador para com o seu estado e controle. As informações mostradas e sua aparência na tela são dirigidas ao operador e devem ser organizadas tendo isso em mente. Os programas para construção de IHM's atuais são de fácil configuração para o engenheiro, ou mesmo para o operador podendo dispensar o programador.

Segundo Mintchel (2001), os IHM's atuais devem oferecer a interface com o operador, controle supervisionado e aquisição de dados, além de fornecer alarmes e informações para os sistemas de planejamento corporativo.

- **Aumento da controlabilidade**

Apesar de não operarem em tempo real como os medidores analógicos, os medidores digitais não são afetados por mudanças no ambiente e não necessitam de ajustes mecânicos, medem sinais com baixo nível e com maior precisão.

- **Capacidade de armazenamento de dados**

Beneficia processos que requerem variações de um mesmo procedimento de manufatura, os *batch processes*, e que são largamente empregados em automação.

- **Incremento na detecção de defeitos e técnicas de manutenção**

Como podem ser programados, circuitos digitais podem alertar quando determinado valor está abaixo ou ultrapassa níveis aceitáveis. Na manutenção, o defeito pode ser rapidamente consertado substituindo-se o módulo de circuito correspondente.

- **Baixo custo por unidade**

A compactação dos circuitos digitais proporciona sua produção em larga escala e com baixo custo. A dissipação reduzida de potência aumenta a vida dos componentes e reduz o consumo de energia.

- **Baixo custo de instalação**

A alta integração dos circuitos digitais dispensa o emprego das grandes instalações exigidas pelos circuitos analógicos.

Todo o fluxo de informações em um sistema de controle digital pode ser observado na figura 3.1. Os sensores captam sinais analógicos em determinado momento do processo e convertem para sinal digital, possibilitando assim sua leitura pelo processador e pela memória.

A partir da memória, os dados são enviados ao *display* onde será visualizada pelo operador. E do processador os sinais digitais sofrem a conversão contrária, se transformando em sinais analógicos, onde através dos atuadores serão inseridas no processo, reiniciando assim o ciclo completo.

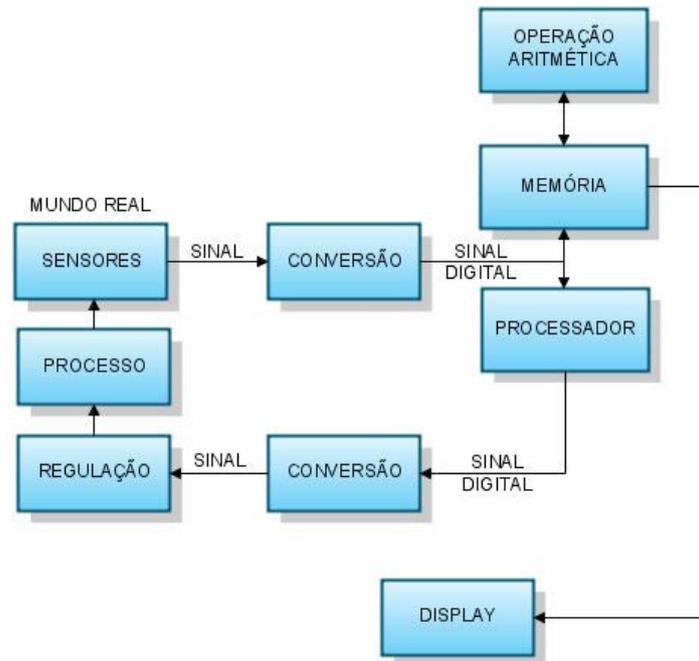


Figura 3. 1- Fluxo de Informações em um Sistema de Controle Digital

Fonte: Moore (1986).

3.2. Controlador Lógico Programável (CLP)

Os CLP's são controladores microprocessados especiais que tem funções programadas pelo usuário, que substituem relés e dispositivos de passo eletromecânicos. Segundo Natale (2000) o CLP é “um computador com as mesmas características de um computador pessoal, porém, é uma aplicação dedicada”.

Foram inicialmente projetados para esta função e aplicados em 1969 à linha de produção da General Motors nos Estados Unidos como seqüenciadores de estado das máquinas. Durante a década de 70, adquiriram instruções de temporização, contadores, operações aritméticas, controle de impressão, movimentação de dados, operações matriciais, terminais de programação TRC e controle analógico PID.

Segundo Simpson (1994), os CLPs foram inicialmente concebidos por um grupo de engenheiros da divisão de hidramática da General Motors em 1968, levando-se em conta os seguintes critérios:

- A máquina deve ser facilmente programada. Ela deve ter seqüências de operação prontamente modificadas.
- Deve ser de fácil manutenção e reparação em módulos conectáveis.

- A unidade deve ser capaz de operar na planta com maior confiabilidade do que um painel de relés.
- Deve ser fisicamente menor que um painel de controle de relés e assim reduzir ao mínimo a necessidade de espaço no chão da fábrica.
- A unidade deve ser capaz de produzir dados para uma estação central e coleta de dados.
- A unidade deve ter preço competitivo face aos relés e painéis de estado sólido utilizados atualmente.

Conforme Coretti (1998), no final da década de 70 foram incorporados recursos de comunicação aos CLP's que, embora limitados, proporcionaram a integração entre controladores distantes, tornando-os parte de um sistema integrado de fabricação e operação de uma planta individual.

Na década de 80 houve a redução do tamanho físico e a introdução de módulos inteligentes de E/S proporcionando alta velocidade e controle preciso em aplicações de posicionamento. Foi introduzida a programação por *software* em microcomputadores e a primeira tentativa de padronização de comunicação através do MAP (*Manufacturing Automation Protocol*), também da General Motors (PUPO, 2002).

Na década de 90 houve a introdução de IHM, *softwares* supervisórios e de gerenciamento, as interfaces para barramento de campo e os blocos de funções.

Devido a ampla gama de equipamentos e sistemas disponíveis para controle industrial, aliada à crescente capacidade de recursos que o CLP vem agregando, existe a possibilidade de se confundir outros equipamentos com ele. Para evitar tal equívoco, devem-se observar as duas características básicas, que servem de referência para identificar um equipamento de controle industrial como sendo um controlador lógico programável (JESUS, 2002):

- o equipamento deve executar uma rotina cíclica de operação enquanto em funcionamento;
 - a forma básica de programação deve ser realizada a partir de uma linguagem oriunda dos diagramas elétricos de relés.
-

3.2.1. Arquitetura Básica de um CLP

A figura 3.2 representa a arquitetura básica de um CLP.

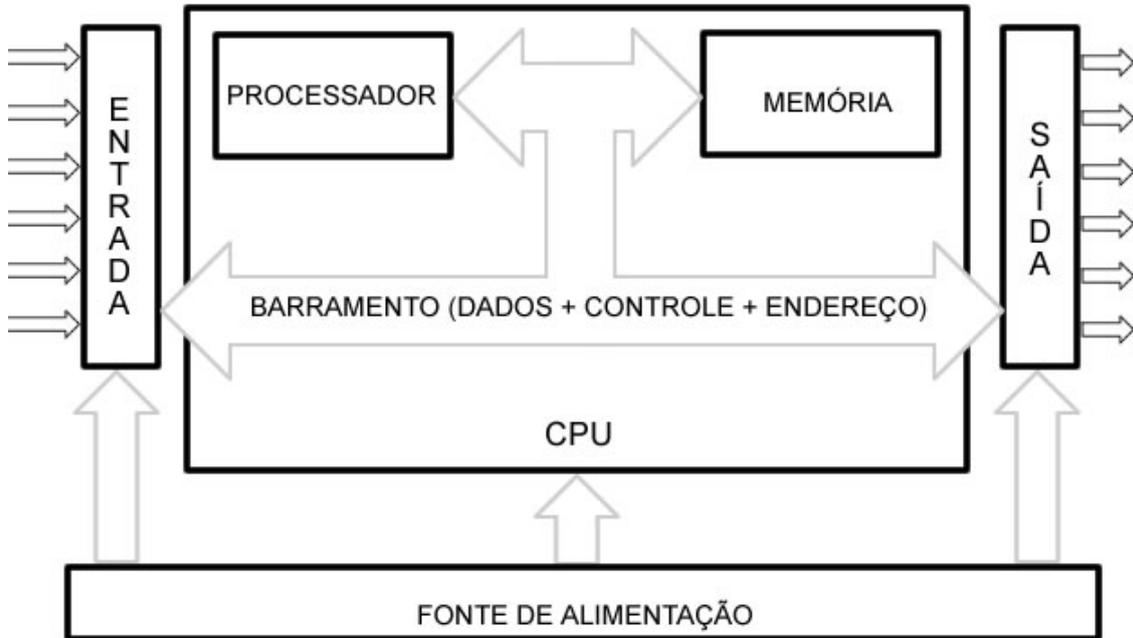


Figura 3. 2 – Arquitetura básica de um CLP

Fonte: Souza (2006).

- **CPU (Unidade Central de Processamento)**

A estrutura básica da CPU é composta pelo processador, sistema de memória e barramento de dados, controle e endereço.

- **Processador**

Segundo Souza (2006), o processador é responsável pelo gerenciamento total do sistema, controlando os barramentos de endereços, de dados e de controle, interpreta e executa as instruções do programa de aplicação, controla a comunicação com dispositivos externos e verifica a integridade de todo o sistema realizando relatórios ou diagnósticos do sistema operacional.

- **Sistema de Memória**

Conforme Souza (2006), o sistema de memória da CPU é composto por: (i) memória do sistema de operação, onde é armazenado o programa de execução desenvolvido pelo fabricante, e que determina como o sistema deve operar, incluindo a execução dos programas do usuário, controle de serviços periféricos, atualização dos módulos de entrada/saída etc. (ii) memória de aplicação ou memória de usuário, onde o programa desenvolvido pelo usuário, chamado de aplicação, é armazenado.

Ainda segundo Souza (2006), juntamente com o programa de aplicação, são armazenados os dados do sistema em uma tabela para realização dos controles dos módulos de entrada/saída utilizados. Cada ponto de entrada/saída conectado aos módulos tem um endereço específico na tabela de dados, o qual é acessado pelo programa de aplicação.

- **Módulos de Entrada e Saída**

Estes módulos realizam a comunicação entre a CPU e os dispositivos externos por meio das entradas e saídas dos módulos, garantindo isolamento e proteção à CPU. Os módulos de entrada recebem os sinais dos dispositivos tais como sensores, chaves e transdutores e convertem esses sinais em níveis adequados para serem processados pela CPU. Os módulos de saída enviam os sinais de controle aos dispositivos externos tais como motores atuadores e sinalizadores. Esses sinais são resultantes da lógica de controle, pela execução do programa de aplicação, ou podem ser forçados pelo usuário, independente da lógica de controle (SOUZA, 2006).

- **Fonte de Alimentação**

Dispositivo responsável pela alimentação fornecida à CPU e aos módulos (circuitos) de entrada/saída. Em alguns casos proporciona saída auxiliar de baixa corrente.

3.3. Sistemas SCADA

Segundo Melendez et. al. (2001), os sistemas de supervisão de processos industriais são também conhecidos como sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Os primeiros sistemas SCADA, basicamente telemétricos, permitiam mostrar o estado corrente de processos industriais monitorando apenas sinais representativos de medidas e estados de dispositivos através de um painel de lâmpadas e indicadores, sem que houvesse qualquer interface de operação com o utilizador.

Atualmente os sistemas de automação industrial utilizam tecnologia de computação e comunicação para automatizar a monitoração e controle dos processos industriais, efetuando a coleta e análise de dados em ambiente complexo, e a respectiva apresentação de modo amigável para os operadores, com recursos gráficos elaborados como animações e conteúdo multimídia.

Para permitir isso, os sistemas SCADA identificam os tags, que são todas as variáveis numéricas ou alfanuméricas envolvidas na aplicação, podendo executar funções computacionais (operações matemáticas, lógicas, com vetores ou strings, etc) ou representar pontos de entrada/saída de dados do processo que está sendo controlado. Neste caso corresponde às variáveis do processo real (ex: temperatura, pressão, nível de água, etc), se comportando como a ligação entre o controlador e o sistema. É com base nos valores das tags que os dados são apresentados ao usuário (SILVA; SALVADOR, 2004).

Os sistemas supervisórios têm se mostrado de fundamental importância na estrutura de gestão das empresas, fato pelo qual deixaram de ser vistos como meras ferramentas operacionais, ou de engenharia, e passaram a ser vistos como uma relevante fonte de informação. Segundo Uddin et. al. (2000), os sistemas de supervisão de processos industriais desempenham três atividades básicas:

- Supervisão;
- Operação;
- Controle.

Na supervisão, incluem-se todas as funções de monitoramento do sistema, tais como gráficos de tendências das variáveis analógicas ou digitais, relatórios em vídeo e impressos, entre outros (CAMPBELL, 1988). A operação nos atuais sistemas SCADA tem a vantagem de substituir as funções da mesa de controle, otimizando as opções de

ligar e desligar equipamentos ou seqüência de equipamentos, ou ainda mudar o modo de operação dos equipamentos de controle. No controle supervísório os algoritmos de controle são executados numa unidade de processamento autônomo (CLP). Assim o supervísório é responsável por ajustar o set-point do mecanismo de controle dinamicamente, de acordo com o comportamento global do processo.

3.3.1. Componentes Físicos

Os componentes físicos de um sistema SCADA podem ser resumidos basicamente em: sensores e atuadores, rede de comunicação, estações remotas e as estações de monitoração central (microcomputadores).

Segundo Werneck (1996), os sensores podem ser analogamente comparados aos olhos, pois capturam as informações relativas ao estado do processo físico industrial e as transmitem ao controlador do processo, assim como os olhos capturam as imagens e as transmitem ao cérebro. Os instrumentos de medição nas indústrias tem os sensores como elemento primário e podem ser classificados de acordo com o tipo de sinal transmitido, podendo ser analógico ou digital.

O processo de controle e aquisição de dados se inicia nas estações remotas, CLP's, com a leitura dos valores atuais dos dispositivos que a ele estão associados e seu respectivo controle. Os CLP's são unidades computacionais específicas, utilizadas comumente nas indústrias para ler entradas, realizar cálculos ou comandos e atualizar saídas.

A rede de comunicação é o modo como as informações fluem do CLP para os microcomputadores, pode ser implementada através de redes Ethernet, fibras óticas, linhas dial-up, rádio, etc. Assim, é possível conseguir uma intercomunicabilidade entre todos os elementos da estrutura de automação através de um meio físico adequado definido para a transmissão de dados, criando um sistema de comunicação em rede em que os elementos podem trocar dados e compartilhar recursos entre si (TAIT, 1998).

As estações de monitoração são responsáveis por recolher as informações geradas pelas estações remotas e agir em conformidade com os eventos detectados, sendo também responsáveis pela interação com os operadores. Podem ser centralizadas num único computador ou distribuídas por uma rede de computadores, de modo a permitir o compartilhamento das informações obtidas (SILVA; SALVADOR, 2004).

A figura 3.3 ilustra o diagrama de um sistema SCADA.

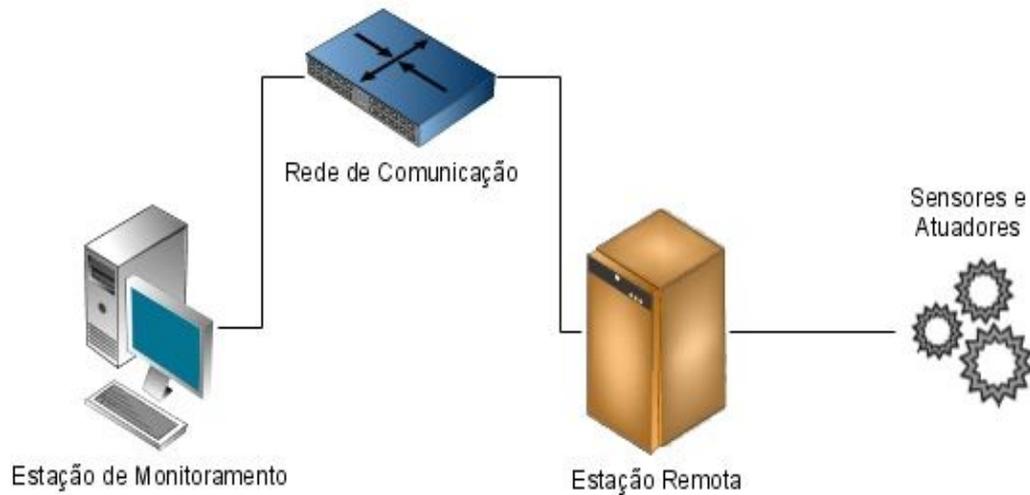


Figura 3.3 - Diagrama de um Sistema SCADA

3.3.2. Componentes Lógicos de um Sistema SCADA

Internamente, os sistemas SCADA se dividem em blocos ou módulos, que vão permitir maior ou menor flexibilidade e robustez, dependendo da aplicação desejada.

Basicamente, pode-se dividir um supervisor nos seguintes módulos:

- Núcleo de Processamento;
- Módulo de Comunicação com o CLP;
- Interface Gráfica;
- Históricos e Banco de Dados;
- Lógica de Programação Interna (*Scripts*);
- Comunicação com outros Sistemas SCADA.

A regra geral para o funcionamento de sistemas SCADA parte dos processos de comunicação com os equipamentos de campo, cujas informações são enviadas para o núcleo de processamento. O núcleo é responsável por coordenar e distribuir o fluxo de informações para os demais módulos, até chegarem na forma esperada para o operador do sistema, através da interface gráfica, possivelmente acompanhada de gráficos e animações.

3.4. *Software* Supervisório

Segundo Ogata (2003), o *software* supervisório é visto como o conjunto de programas gerados e configurado no *software* básico de supervisão, implementando as estratégias de controle e supervisão com telas gráficas de interfaceamento homem-máquina que facilitam a visualização do contexto atual, a aquisição e tratamento de dados do processo e a gerência de relatórios e alarmes. Este *software* deve ter entrada de dados manual, através de teclado. Os dados serão requisitados através de telas com campos pré-formatados que o operador deverá preencher. Estes dados deverão ser auto-explicativos e possuírem limites para as faixas válidas. A entrada dos dados deve ser realizada por telas individuais, seqüencialmente, com seleção automática da próxima entrada. Após todos os dados de um grupo serem inseridos, esses poderão ser alterados ou adicionados pelo operador, que será o responsável pela validação das alterações.

3.5. Linguagem de Programação

Uma linguagem de programação é um método padronizado para expressar instruções para um computador. É um conjunto de regras sintáticas e semânticas usadas para definir um programa de computador. Uma linguagem permite que um programador especifique precisamente sobre quais dados um computador vai atuar, como estes dados serão armazenados ou transmitidos e quais ações devem ser tomadas sob várias circunstâncias.

Uma das principais metas das linguagens de programação é permitir que programadores tenham uma maior produtividade, permitindo expressar suas intenções mais facilmente do que quando comparado com a linguagem que um computador entende nativamente (código de máquina). Assim, linguagens de programação são projetadas para adotar uma sintaxe de nível mais alto, que pode ser mais facilmente entendida por programadores humanos. Linguagens de programação são ferramentas importantes para que programadores e engenheiros de *software* escrevam programas mais organizados e com maior rapidez.

Linguagens de programação também tornam os programas menos dependentes de computadores ou ambientes computacionais específicos. Isto acontece porque programas escritos em linguagens de programação são traduzidos para o código de máquina do computador no qual será executado em vez de ser diretamente executado.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. O Convênio ECV 024/2004 – UFMS / ELETROBRÁS

Através do convênio ECV 024/2004 firmado entre as Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS e a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, objetivou-se desenvolver ações de conservação de energia elétrica no estado de Mato Grosso do Sul. O citado convênio refere-se a uma cooperação técnico-financeira para a implementação de um Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes, com fins didáticos, compreendendo atividades de ensino, pesquisa e extensão, onde possam ser avaliados aspectos relacionados à Eficiência Energética em Consumidores Industriais. O convênio visa também que os resultados obtidos em estudos na área de eficiência energética em sistemas motrizes sejam disseminados entre as empresas de Mato Grosso do Sul que também poderão utilizar a infra-estrutura do laboratório para estudos de casos específicos.

4.2. Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ

Os procedimentos práticos foram realizados no Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes – LAMOTRIZ, onde é possível simular diversas condições operativas de cargas comumente utilizadas pela indústria.

No LAMOTRIZ consegue-se demonstrar em linhas práticas os fenômenos eletromecânicos envolvidos durante a operação de sistemas motrizes e suas influências no consumo de energia elétrica.

Todos os equipamentos e instrumentos utilizados nas diversas estações do LAMOTRIZ são industriais, ou seja, não são equipamentos com fins exclusivamente didáticos o que poderia comprometer a realidade e aplicabilidade dos estudos.

Cada uma das cargas é instalada em bancadas de ensaio, que são independentes umas das outras. O sistema de acionamento completo é composto por: quadro de medição; sistemas de automação e medição integrados, capazes de controlar automaticamente a execução, a coleta de dados e a emissão de relatórios.

Para acionar cada uma das cargas existe a opção pela utilização de um dos dois tipos de motores e um dos três diferentes métodos de partida que, acoplados à carga, possibilitam a visualização de várias formas de controle e operação de equipamentos industriais, sejam eles similares ou de maior porte.

O LAMOTRIZ é composto por quatro “Estações de Simulação” correspondentes à:

- Bomba Centrífuga + Dinamômetro;
- Ventilador Centrífugo;
- Compressor de Ar;
- Correia Transportadora.

Cada estação de simulação possui uma bancada que inclui: Motores (de alto rendimento e *standard*), Inversor de Frequência, Chave *Soft-Starter*, Módulo de Carga, Controlador Lógico Programável (CLP), visto na figura 4.1, e os equipamentos de acionamento e proteção tais como contadores, disjuntores, chaves, botoeiras e sinaleiros. Todos os parâmetros elétricos da entrada dos motores são medidos através desta bancada que ainda armazena o sistema de aquisição dos dados mecânicos.



Figura 4. 1 – CLP *Schneider Electric- Telemecanique* instalado no painel de comando e proteção

O equipamento responsável pela medição dos parâmetros elétricos de entrada dos motores é um medidor de energia multifunção que faz registros dos valores de tensão entre fases,

entre fase e neutro, frequência, correntes, potências ativas, reativas, aparentes e fator de potência trifásico e monofásico.

O Controlador Lógico Programável (CLP) se comunica com o medidor multifunção via interface serial com protocolo *ModBus* e todos os parâmetros medidos podem ser visualizados e monitorados no computador na janela própria do *software* supervisor.

Através do sistema supervisor é possível variar de 0 a 120% a carga nominal do motor elétrico sendo que este último pode ser o *standard* ou de alto rendimento, dependendo do acoplamento à carga.

Ainda no sistema supervisor, pode ser escolhido o tipo de acionamento desejado:

- Sistema de partida direta através de contadores;
- Sistema de partida suave (*soft-start*);
- Sistema de partida eletrônica via inversor de frequência.

Depois de selecionado um método de partida, o CLP enviará um sinal aos respectivos contadores ficando os outros dois sistemas desconectados e intertravados.

Os dois sistemas de partida eletrônicos, *soft-start* e inversor de frequência, têm seus parâmetros definidos através do supervisor. Tempo de rampa de subida e descida, velocidade e todos os outros parâmetros concernentes à operação da bancada são visualizados e acessíveis pela tela do supervisor de cada estação.

Além de comandar a partida dos motores, o CLP também realiza a leitura dos parâmetros de transmissores e sensores através de entradas e saídas digitais, entradas e saídas analógicas e comunicação *ModBus*, sendo que a comunicação com o computador é feita via porta de comunicação *Ethernet*.

Para que sejam devidamente monitorados e analisados, os motores possuem sensores tipo PT-100 de temperatura. Esses sensores estão alocados na carcaça e em cada um dos enrolamentos do estator.

Nos circuitos elétricos de acionamento, existem resistores shunt nas entradas e saídas de modo a permitir a verificação de sinais de tensão e corrente.

A atualização dos dados observados na tela do supervisor é feita em um intervalo máximo de 500 ms.

Nos sensores, transmissores e transdutores existem janelas que contêm o valor numérico e sua respectiva unidade de medida.

Os motores possuem um sistema de conexão elétrica e mecânica que permitem agilidade e rapidez na troca de posições além de oferecer proteção contra eventuais trocas de polaridades.

Os quatro CLP's são interligados via *switch* formando uma rede de comunicação em padrão *Ethernet*, conforme o diagrama unifilar simplificado observado na figura 4.2. Na figura 4.3 pode ser observada a rede de comunicação da bancada da bomba centrífuga.

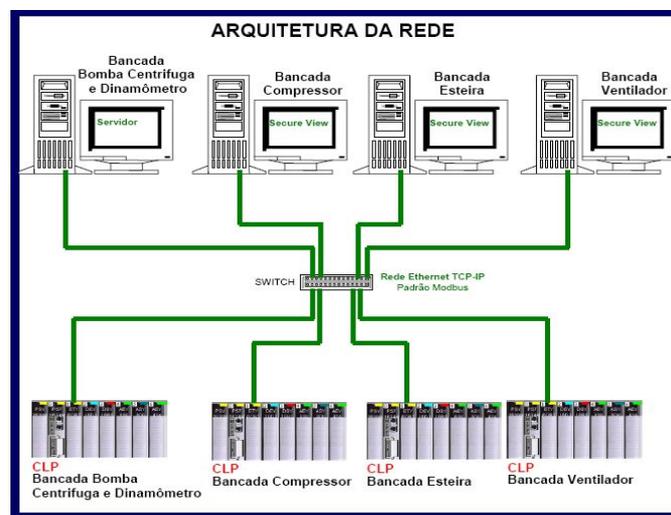


Figura 4. 2 – Arquitetura da rede do LAMOTRIZ

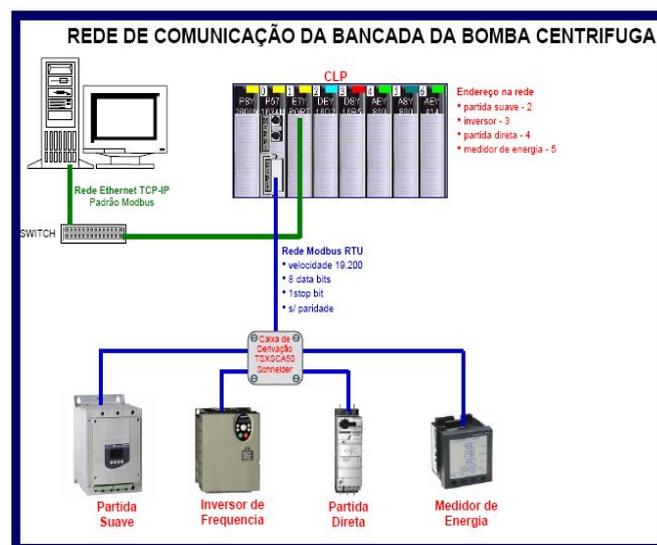


Figura 4. 3 – Rede de comunicação da bancada da bomba centrífuga

4.3. Estação de Simulação da Bomba Centrífuga

A estação de simulação do LAMOTRIZ utilizada neste trabalho foi a da Bomba Centrífuga. O sistema é composto de uma bomba centrífuga marca *Schneider*, modelo BC92-HSB, com tubulação de sucção e de recalque de 1 ½” e 1 ¼” (BSP) respectivamente. A capacidade de vazão para o sistema do LAMOTRIZ é de até 2,6 m³/h sendo a bomba acionada por motor de indução de 1,5 cv. Como pode ser visto na figura 4.4, a instalação da bomba se faz de forma mancalizada permitindo que seja trocado o motor acoplado (alto rendimento ou *standard*).

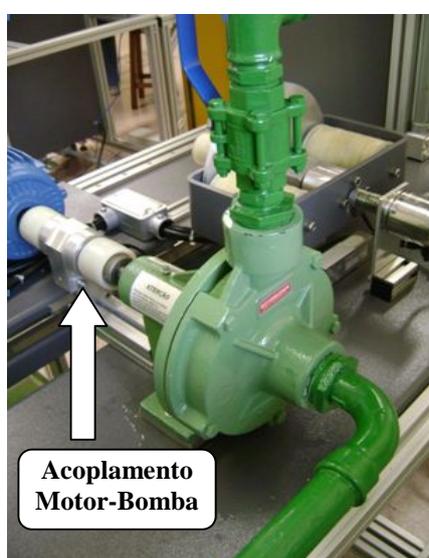


Figura 4. 4 – Bomba centrífuga Schneider BC92-HSB

Os motores utilizados no sistema de bombeamento possuem os dados de placa apresentados no quadro 4.1.

Característica	Motores	
	<i>Standard</i>	Alto rendimento
Tensão (V)	220 / 380	220 / 380
Corrente nominal (A)	4,42 / 2,56	4,0 / 2,32
n° de pólos	2	2
Potência (cv / kW)	1,5 / 1,1	1,5 / 1,1
Rendimento (%)	78,6	83,0
Frequência (Hz)	60	60
cos φ	0,83	0,87

Quadro 4.1 – Características dos motores utilizados.

A bomba movimenta a água entre dois tanques de acrílico transparente de 100 litros cada um. A altura geométrica da instalação é de 2 m.

Para o escoamento entre os tanques, existe um duto com válvula de retenção e duas válvulas em paralelo, uma manual e outra do tipo solenóide controlada pelo CLP dessa bancada. Para o devido monitoramento, os seguintes instrumentos estão instalados na saída da bomba centrífuga:

- Uma válvula de retenção;
- Uma válvula proporcional de estrangulamento comandada pneumaticamente através de posicionadores;
- Transmissor de pressão diferencial com indicação local de pressão em Kgf/cm;
- Transmissor de pressão diferencial para a indicação de vazão em m³/h através de placa de orifício;
- Manômetro tipo petroquímico com escala em Kgf/cm;
- Transmissor de pressão diferencial com indicação local em litros para a medição do nível no reservatório superior;
- Sensores de nível digitais para proteção contra transbordamento ou baixo nível de trabalho da bomba.

A figura 4.5 apresenta o fluxograma do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ.

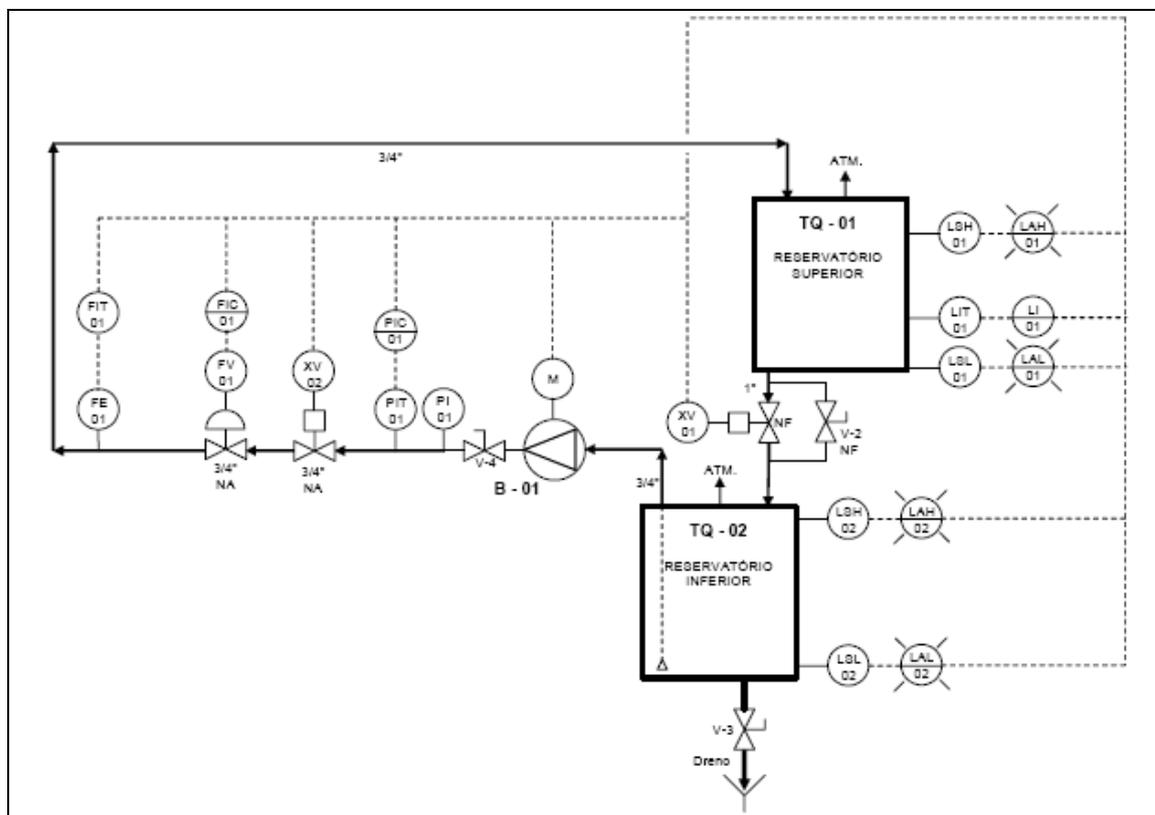


Figura 4.5 – Fluxograma simplificado do sistema da bomba

Na figura 4.6 pode-se ter uma visualização detalhada da bancada da bomba e todos os seus elementos constituintes.

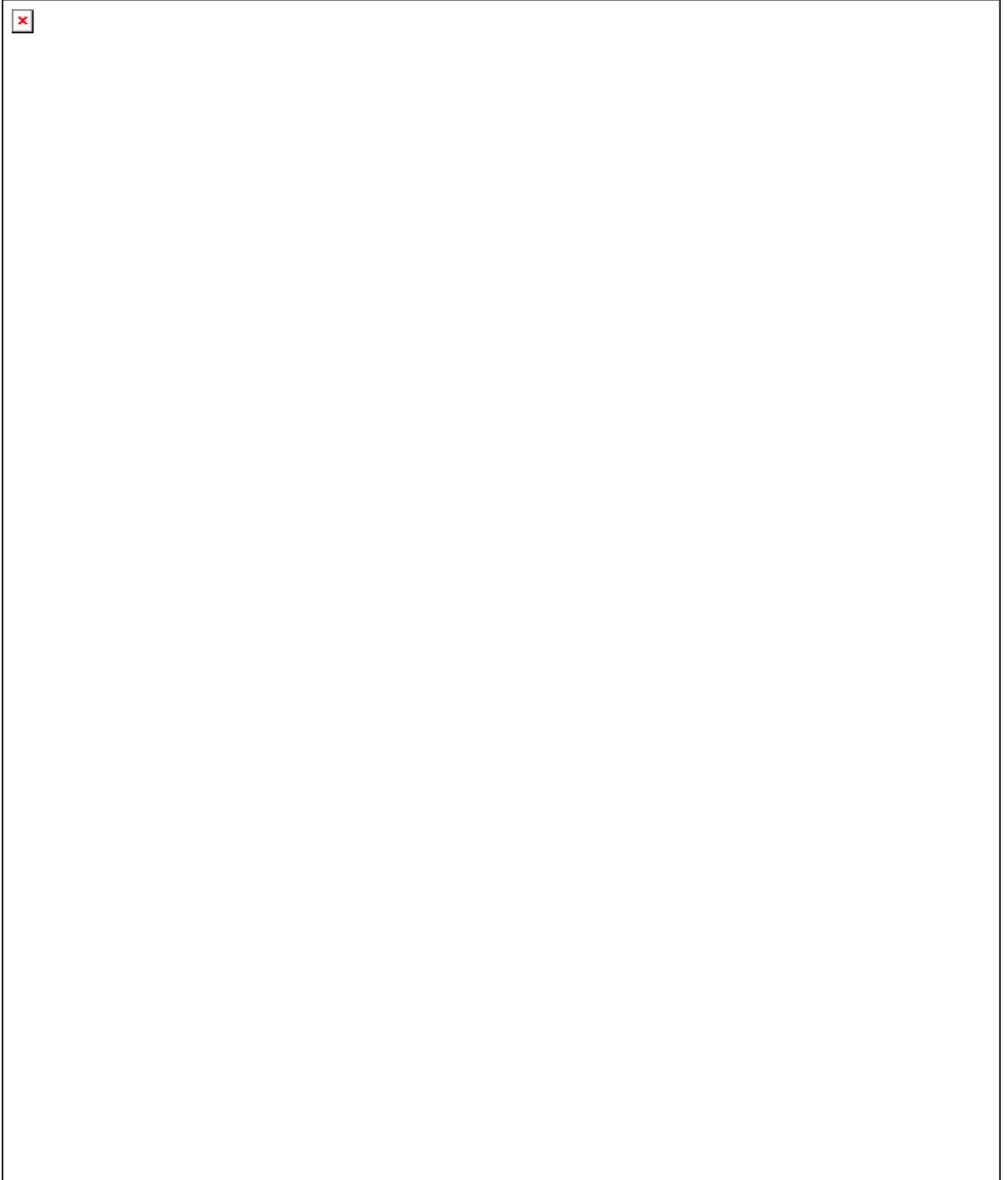


Figura 4. 6 – Diagrama esquemático da estação da bomba centrífuga do LAMOTRIZ

As figuras 4.7 e 4.8 apresentam as visualizações reais da bancada da bomba centrífuga e do painel de comando e proteção, respectivamente.



Figura 4.7 – Estação de simulação da bomba centrífuga do LAMOTRIZ



Figura 4.8 – Painel de comando e proteção

4.4. Sistema supervisorio - Indusoft Web Studio 6.1

O LAMOTRIZ foi fornecido com todas as configurações do sistema supervisorio, a elaboração de telas gráficas, e os comandos a serem executados por ele, incluindo todos os parâmetros elétricos e mecânicos de cada estação, com telas específicas para cada elemento constituinte do sistema de medição, acionamento e carga, apresentado em tempo real todas as informações advindas dos sensores de sinais elétricos e mecânicos.

Para cada uma das estações existe uma tela principal no *software* supervisorio, com o desenho esquemático do processo onde cada elemento (válvula, medidores, acionamento, etc.) possui um *link* para abertura das telas de monitoração e configuração correspondentes. Além disso, os principais componentes possuem “animação” representando o funcionamento dos mesmos.

Na figura 4.9 pode ser observada a tela principal da estação de simulação da bomba centrífuga.



Figura 4.9 – Tela principal do sistema supervisorio do LAMOTRIZ

Cada bancada possui basicamente seis telas de monitoração: Controle, PID, Banco de Dados, Gráfico, Medidor e Relatório.

A tela “Controle” possui todos os comandos básicos necessários à operação da carga, como: botão de liga/desliga, escolha do tipo de acionamento, função de religamento, operação por tempo, controle de válvulas.

A tela “PID” possui os comandos complementares à tela “Controle”, como: controle de *set-point* e valores de PID.

A tela do Banco de Dados armazena todos os valores elétricos e mecânicos obtidos durante a realização dos testes. Os dados ficam armazenados em um arquivo do tipo *comma-separated values* (csv) e podem ser obtidos em intervalos de até 0,3 segundos.

A tela “Gráfico” mostra, em tempo real, gráficos dos valores elétricos e/ou mecânicos a serem escolhidos pelo usuário.

A tela “Medidor” mostra todas as medidas elétricas importantes, como: tensão, corrente, demanda, fator de potência, as taxas de distorção harmônicas de tensão e corrente, potência ativa, reativa e aparente e o consumo de energia ativa, reativa e aparente, além da frequência.

A opção “Relatório”, que foi implementada posteriormente ao fornecimento do laboratório, mostra os dados referentes a cada teste, como: motor, tipo de acionamento, duração do teste, quem o realizou, o consumo de energia ativa, reativa e aparente, além dos valores médio, máximo e mínimo de tensão, corrente, fator de potência e potência ativa, reativa e aparente.

A figura 4.10 ilustra a tela de comando do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ.

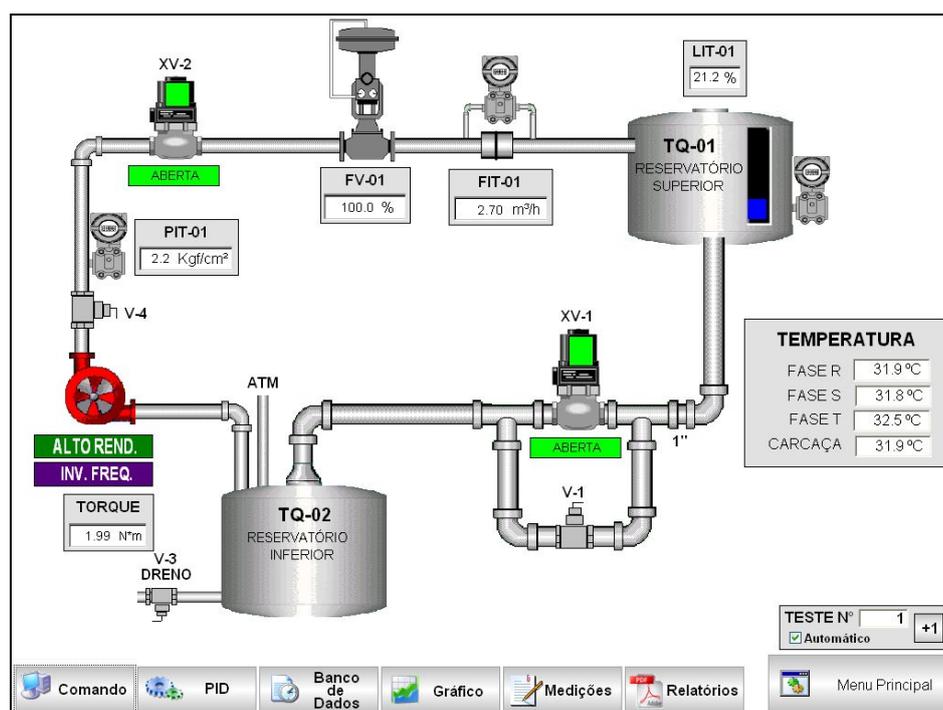


Figura 4. 10 – Tela de comando do sistema da bomba

O supervisório foi criado através do *software Indusoft Web Studio* versão 6.1 SP2 (IWS) e posteriormente atualizado para a versão 6.1 SP3. O *software* IWS consiste de:

- Modo de desenvolvimento: módulo de criação de supervisórios.
- Modo *Run-time*: módulo de operação de sistemas de supervisão.

O *software* IWS possui os seguintes recursos:

- Integração com o sistema operacional *Windows*[®] através de menus, caixas de dialogo e barra de tarefas.
- Configuração e manutenção de estações remotas on-line.
- Possibilidade de criação de scripts em *VB Script*.
- Compilação de arquitetura *Microsoft DNA*, com total suporte de OPC e XML.
- Suporte a aplicações em modo *Web*.
- Biblioteca de símbolos com mais de 100 objetos entre: motores, tubulações, botões, alarmes, sinais luminosos, etc.
- Banco de *Tags* (inteiro, real, *string* e *boolean*).
- Cliente e servidor com comunicação em TCP/IP.
- Função de tradução.
- Ferramentas de depuração.
- Arquitetura aberta com intercâmbios entre tags e programas externos.
- Mais de 200 drivers para diversos produtos.

4.5. Implementações no supervisório

A partir do recebimento das bancadas do laboratório e do sistema supervisório os testes com as mesmas foram iniciados. Dessa forma foram observadas algumas possibilidades de alteração no supervisório para que os ensaios fossem melhorados.

A intenção de implementar novas funções no sistema supervisório se mostrou relevante para que as análises possam parecer as mais fiéis possíveis a regimes de funcionamento de sistemas de bombeamento reais encontrados nas indústrias. Ou seja, as condições de

variação de carga do sistema de bombeamento durante um ensaio experimental devem ser semelhantes à operação de um conjunto motor-bomba em uma empresa para que os resultados observados quanto à eficiência energética sejam os mais confiáveis possíveis. Na concepção inicial do projeto do sistema supervisorio do LAMOTRIZ algumas limitações foram observadas para que esse aspecto fosse atendido.

Contudo, de posse da licença do *software* é possível que o supervisorio seja modificado de acordo com a necessidade de cada bancada. Especificamente para a bancada do sistema de bombeamento, objeto de estudo do presente trabalho, identificou-se a necessidade do desenvolvimento de certas funções adicionais logo nos primeiros ensaios. A atuação dessas funções e suas metodologias de desenvolvimento são descritas a seguir.

4.5.1. Criação de funções no IWS

O *Indusoft Web Studio* (IWS) possui uma linguagem própria, porém esta linguagem se mostrou muito limitada quanto a funções e métodos, por esse motivo as novas sub-rotinas foram escritas em *Visual Basic Script* (*VB Script*), a segunda linguagem do IWS.

As funções do IWS podem ser escritas em dois modos diferentes: por planilhas *Math* e por *Scripts*. As planilhas *Math* utilizam apenas *tags* enquanto os *Scripts* são todos escritos em *VB Script* e podem usar tanto *tags* quanto variáveis próprias.

Uma planilha *Math* é organizada da seguinte maneira: no topo, uma linha de comando indica quando esse deve ser executado (*Execution*). Na parte inferior existem várias linhas divididas em duas colunas, *Tag* e *Expression*, a primeira contém a variável para a qual será atribuída o valor da *Expression*.

Os *Scripts* são organizados de modo semelhante: no topo, uma linha de comando indica quando esse deve ser executado (*Execution*) e na parte de baixo ficam os *scripts* em *VBScript*.

Existem dois tipos básicos de variáveis no supervisorio: as *tags*, que são utilizadas tanto pelo IWS como por scripts em *VB Script*, e as variáveis exclusivas do *VB Script*. Quando se utiliza *tags* em algum *script* em *VB Script* necessita-se que seja colocado o símbolo “\$” antes do nome da variável.

As *tags* estão organizadas em três classes: “bc”, “geral” e “sp”, que correspondem respectivamente à: variáveis da bomba, variáveis de controle das bancadas, e variáveis que

são utilizadas na função do *set-point* automático, sendo que está ultima constitui-se de um *array* de 20 posições.

4.5.2. Função de acionamento por tempo

A primeira função implementada no supervisório foi a criação de um sistema para controlar o tempo de funcionamento das bancadas, criando assim um método para padronização dos testes a serem realizados.

Esta função foi criada de modo misto, ou seja, uma parte dela foi escrita em *VB Script* e a outra na linguagem do *Indusoft*.

O *script* em *VB Script* foi inserido no botão “Ligar”, na tela “Comando”, *script* este que verifica se a função de acionamento por tempo está selecionada e com base no valor do tempo calcula quando que o motor deve ser desligado.

A partir de então o *script* criado no *Indusoft* atua, comparando o tempo atual com a variável “bc.tempofin”, se a variável “bc.tempofin” for menor que o tempo atual o motor é desligado. O *Execution* igual a 1 indica que o *Math* será executado a todo instante. O quadro 4.2 apresenta as *tags* da função.

Execution: 1	
Tag	Expression
bc.tesys	if(bc.indica_driver=3 AND GetClock())=bc.tempofin,0)
bc.atv31	if(bc.indica_driver=2 AND GetClock())=bc.tempofin,0)
bc.ats48	if(bc.indica_driver=1 AND GetClock())=bc.tempofin,0)

Quadro 4.2 – Função de acionamento por tempo

A função “GetClock()” retorna a quantidade de segundos decorridos desde 01/01/1970 GMT à 00:00 hora.

- bc.tesys – Indica o estado atual do acionamento por Partida Direta.
- bc.atv31 – Indica o estado atual do acionamento por Inversos de Frequência.
- bc.ats48 – Indica o estado atual do acionamento por *Soft-Starter*.
- bc.indica_driver – Indica o modo de acionamento atual. 1-*Soft-starter*; 2-Inversor de Frequência; 3-Partida Direta.
- bc.tempofin – Indica o momento do desligamento da bomba.

4.5.3. Função de *set-point* automático

Também foi desenvolvida uma função capaz de variar a vazão automaticamente em intervalos de tempo pré-determinados. Pode ser uma variação contínua ou descontínua. O usuário do supervisor poderá colocar qual a variação do *set-point* de vazão em m³/h e qual o tempo para que ela ocorra. São possíveis até 20 variações.

Para esta função foi necessária a criação de novas janelas *pop-up*, ilustradas na figura 4.11, onde podem ser inseridos os valores de tempo e acréscimo, em modo contínuo ou descontínuo.



a)



b)

Figura 4. 11 – Janelas *pop-up* (a e b) usadas na função de *set-point* automático em modo contínuo e descontínuo

No momento em que o usuário liga o motor, um *script* no botão “Ligar” identifica se o *set-point* irá variar e define quando a alteração será executada. O *script* no botão “Ligar” pode ser observado no Apêndice B deste trabalho.

O restante do processo está presente no *script* principal. Inicialmente existe uma função “If” verificando se o *set-point* irá variar continuamente ou descontinuamente. Caso seja

continuamente, outro “If” identificará se já está no momento de alterar o *set-point*, só então que um terceiro “If” verificará se o *set-point* ainda não alcançou o máximo já estipulado, se não, o poderá ser acrescido (ou decrescido) e o tempo até a próxima alteração será calculado.

Por outro lado, se o *set-point* for variar de modo descontínuo, cada uma das alterações já estará com a hora da troca, que foi calculado no *script* do botão ligar. Há um “If” verificando se está no momento certo de efetuar o acréscimo (ou decréscimo), e dentro deste “If” o *set-point* recebe a quantidade a ser aumentada, que está armazenada em um *array* que contém todos os valores a serem acrescidos. Este *array* é controlado por uma variável nomeada “Contador” e a cada vez que este *script* é executado o “Contador” é aumentado em uma unidade. A Figura 4.12 representa o fluxograma do *script* de *set-point* automático.

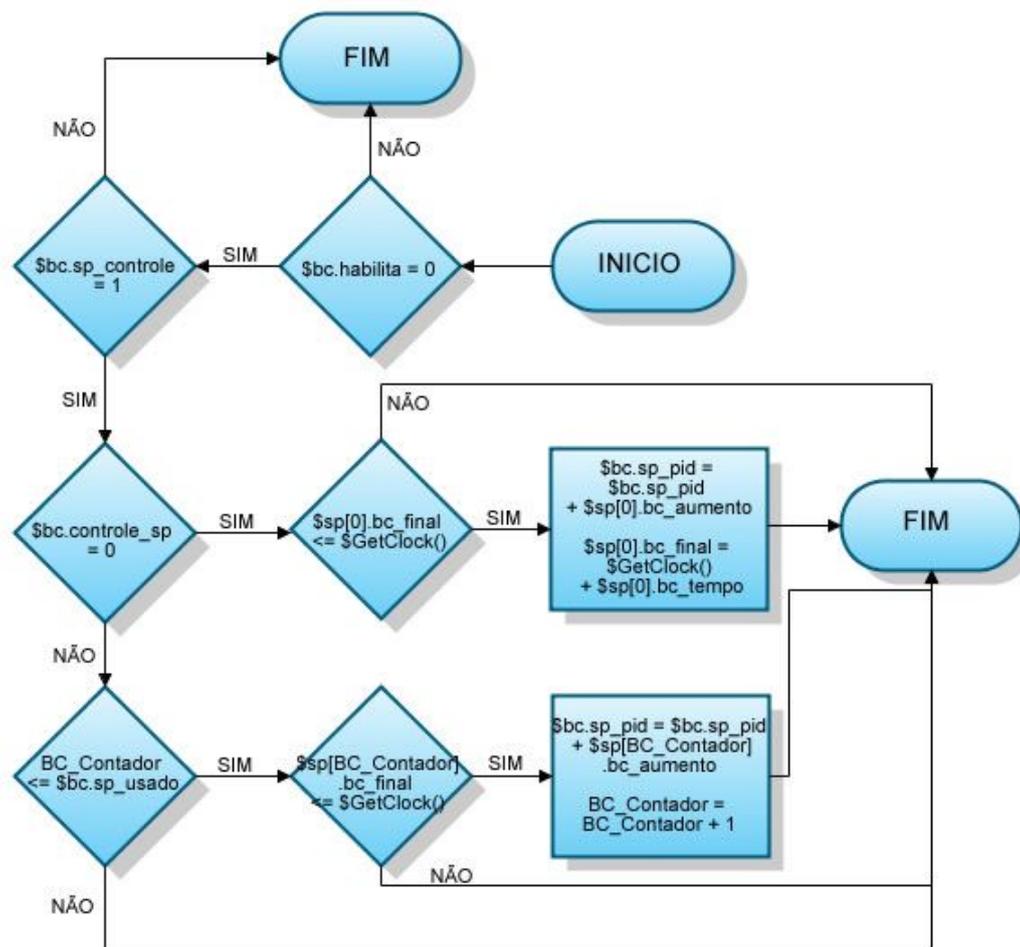


Figura 4. 12 – Fluxograma do *script* do *set-point* automático

As variáveis presentes nessa função têm as seguintes definições:

- \$bc.habilita – Variável que identifica o funcionamento da bomba, 0 indica ligado.
- \$bc.sp_controle – Indica se a função de set-point automático está ligada.
- \$bc.controle_sp – Indica se a função de SP automático está em modo contínuo ou descontínuo, 0 e 1 indicam contínuo e descontínuo, respectivamente.
- \$sp[X].bc_final – Indica o momento da alteração X no set-point.
- \$sp[Y].bc_aumento – Indica o acréscimo (ou decréscimo) na alteração Y.
- \$sp[Z].bc_tempo – Indica o tempo até a alteração Z.
- \$bc.sp_pid – Indica o Set-Point de vazão atual da bomba.
- \$bc.sp_usado – Indica o número total de alterações.
- BC_Contador – Variável de controle, indica qual alteração está sendo realizada (presente apenas em modo descontínuo).

4.5.4. Função de religamento automático por nível do reservatório

A seguinte função foi criada para programar a bomba centrífuga para ser ligada quando o reservatório superior atingir determinado volume e ser desligada quando atingir outro volume, superior ao primeiro. Esta foi a única função escrita inteiramente em uma planilha *Math* por não necessitar de funções muito complexas e trabalhosas.

Constitui-se de duas funções “If” para cada modo de acionamento. Um “If” verificando se o volume do reservatório superior está acima do nível máximo, se estiver, a bomba será desligada. E, em seguida, um segundo “If” verificando se o volume do reservatório superior está abaixo do nível mínimo, se estiver, a bomba será ligada. O quadro 4.3 apresenta as *tags* desta função.

Execution: 1	
Tag	Expression
bc.tesys	If (bc.lit01 > bc.volume_max AND bc.indica_driver = 3 AND bc.dinabomba = 2,0)
bc.tesys	If (bc.lit01 < bc.volume_min AND bc.indica_driver = 3 AND bc.dinabomba = 2,1)
bc.ats48	If (bc.lit01 > bc.volume_max AND bc.indica_driver = 1 AND bc.dinabomba = 2,0)
bc.ats48	If (bc.lit01 < bc.volume_min AND bc.indica_driver = 1 AND bc.dinabomba = 2,1)
bc.atv31	If (bc.lit01 > bc.volume_max AND bc.indica_driver = 2 AND bc.dinabomba = 2,0)
bc.atv31	If (bc.lit01 < bc.volume_min AND bc.indica_driver = 2 AND bc.dinabomba = 2,1)

Quadro 4.3 – Função de religamento automático por nível

Onde:

- bc.lit01 – Indica o volume atual no reservatório superior.
- bc.volume_max – Indica em qual volume a bomba deve ser desligada.
- bc.volume_min – Indica em qual volume a bomba deve ser religada.
- bc.dinabomba – Indica se o motor está conectado na bomba centrífuga ou no dinamômetro. 1-Dinamômetro; 2-Bomba.

4.6. Metodologia dos ensaios

A metodologia dos testes práticos foi baseada na realização de ensaios e medições dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos do sistema de bombeamento.

Para efeito de comparação foram utilizadas características de consumo de água do sistema (vazão de recalque) que foram repetidas para cada conjunto de “método de acionamento + acionador”, sendo eles:

- Motor *Standard* + partida direta;
- Motor *Standard* + inversor de frequência;
- Motor de Alto Rendimento + partida direta;
- Motor de Alto Rendimento + inversor de frequência.

Quando é citada a utilização de partida direta como método de acionamento, deverá ser entendido que o controle de vazão é executado pela válvula pneumática. Quando é citado o uso do inversor de frequência este mesmo será o responsável tanto pelo acionamento quanto pelo controle de vazão (através da variação da frequência de operação).

Foram efetuadas as seguintes simulações com o sistema de bombeamento:

- Análise do sistema para faixa de vazão entre 0,1 e 2,6 m³/h;
 - Consumo de energia elétrica para sistema de bombeamento com curva de vazão variável;
 - Consumo de energia elétrica para sistema de bombeamento funcionando por nível do reservatório.
-

Para a primeira e segunda simulação, a válvula de controle ou o inversor de frequência se ajustavam automaticamente para manter os valores de vazão (*set-point*) constantes. Para a terceira simulação foi utilizado o inversor de frequência no modo manual.

Esses ajustes foram feitos na tela “PID” onde constam as seguintes variáveis:

- P – controle proporcional (utilizou-se valor pré-definido de fábrica);
- I – controle integral (utilizou-se valor pré-definido de fábrica);
- D – controle derivativo (utilizou-se valor pré-definido de fábrica);
- 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 %).

A figura 4.13 apresenta a janela do supervisor para o controle da bancada da bomba centrífuga.



Figura 4. 13 – Janela de controle PID da bancada da bomba com indicação do SP de vazão.

A válvula elétrica de retorno tem seu controle de forma automática de acordo com o nível do reservatório inferior, ou seja, ela fica sempre aberta desde que o nível alto no reservatório de sucção não seja atingido.

Os dados das simulações foram armazenados em arquivos do tipo “csv” sendo abertos posteriormente no *software Microsoft Excel 2007*, onde foram elaborados os gráficos e quadros comparativos. A taxa de amostragem dos dados foi de 250 ms.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

A partir da implementação das novas funções no supervisor foram iniciadas as simulações propostas com o objetivo de serem avaliados os potenciais de eficiência energética em sistemas de bombeamento.

5.1 Análise do sistema para faixa de vazão entre 0,1 e 2,6 m³/h

A presente análise tem o objetivo de obter uma visão geral do desempenho energético do sistema de bombeamento em toda a sua faixa de funcionamento, ou seja, desde 0,1 até 2,6 m³/h. Isso permite que sejam visualizados os potenciais máximos e mínimos de economia de energia através das técnicas utilizadas.

Foram utilizadas as funções desenvolvidas de acionamento por tempo e variação automática da vazão (no modo *set-point* contínuo) do supervisor para que o sistema operasse igualmente para todas as vazões analisadas. A figura 5.1 ilustra a janela *pop-up* da função de *set-point* automático no modo contínuo.



Figura 5.1 – Função de *set-point* automático no modo contínuo

A seguir são apresentados os resultados obtidos na comparação entre utilização de válvula de estrangulamento e de inversor de frequência. Também são apresentadas análises quanto à substituição de motores e o comportamento do fator de potência.

5.1.1. Comparação entre o uso de válvula e de inversor de frequência para controle de vazão

A partir dos ensaios realizados no LAMOTRIZ, observou-se a relação entre a potência elétrica demandada no motor e a vazão requerida pelo sistema, relação esta que pode ser verificada pelas equações (2.6) e (2.7).

Os testes foram feitos variando a vazão em uma faixa de 0,1 m³/h a 2,6 m³/h, utilizando o controle automático tanto para a válvula quanto para o inversor de frequência, ou seja, de acordo com o *set point* de vazão desejado a válvula regulava automaticamente sua abertura e o inversor variava automaticamente a frequência de alimentação do motor.

A figura 5.2 ilustra a comparação entre os conjuntos testados para diferentes vazões.

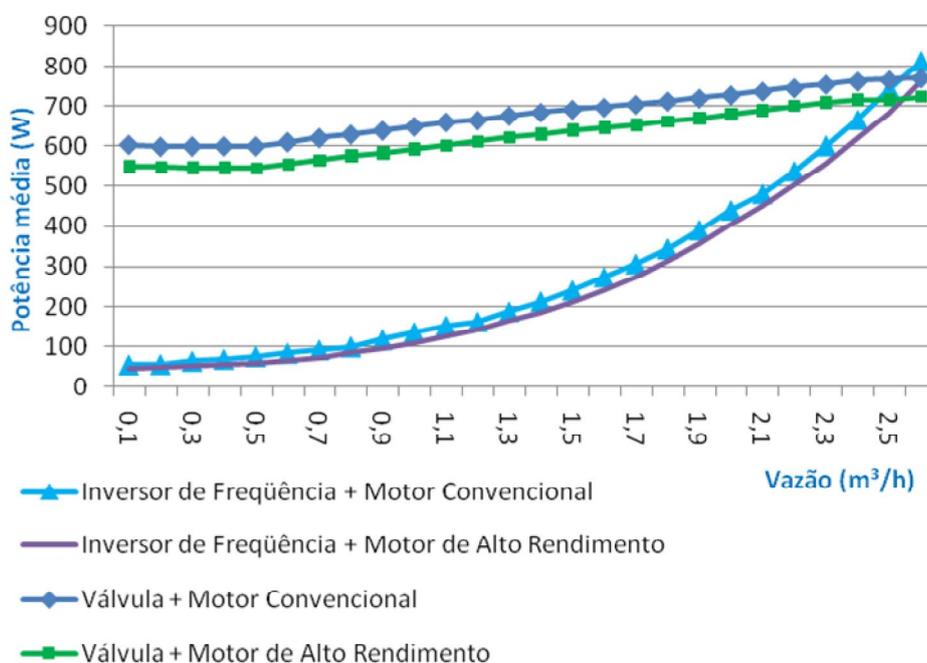


Figura 5. 2 – Comparação entre uso de válvula e inversor de frequência

Como pode ser observado na figura 5.2, o uso do inversor de frequência reduz significativamente a potência elétrica utilizada dependendo da vazão de trabalho do sistema de bombeamento.

A maior diferença observada foi de 549,62 W e foi registrada para a menor vazão (0,1 m³/h). Entretanto, quando a vazão se aproxima do valor máximo possível para o sistema de

bombeamento do LAMOTRIZ, verifica-se que a potência com a utilização do inversor foi maior do que a potência com o uso da válvula.

Para a vazão de 2,6 m³/h a potência média com o uso do inversor foi de 814,05 W e com o uso da válvula foi de 757,64 W. Isso pode ser explicado pelo fato do inversor trabalhar com alta frequência de chaveamento e por isso a taxa de distorção harmônica torna-se mais elevada, o que contribui para o aumento da potência.

A figura 5.3 mostra a economia percentual proporcionada pelo uso do inversor em substituição à válvula para as vazões consideradas.

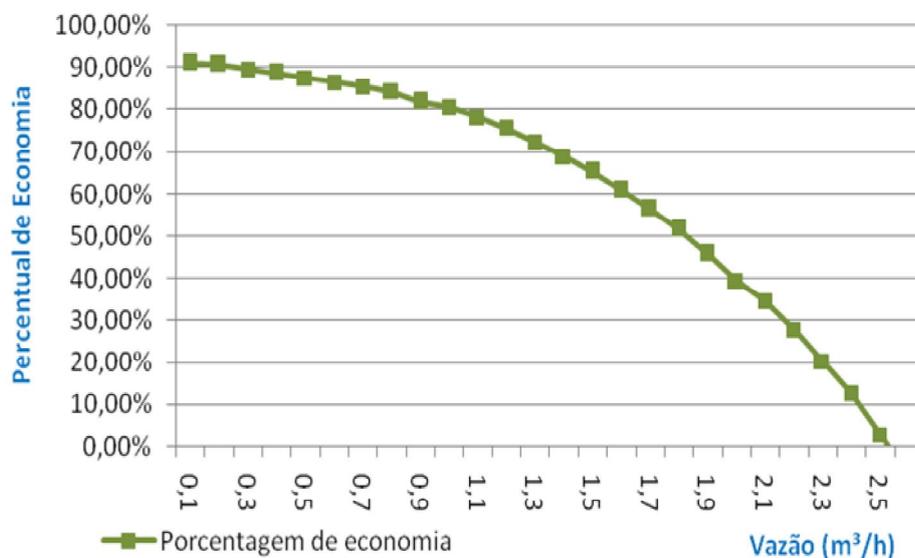


Figura 5.3 – Economia percentual obtida pela utilização do inversor de frequência para controle de vazão (associado ao uso do motor *standard*).

O comportamento decrescente da curva do percentual de economia pode ser entendido pelo fato de que para vazões menores as perdas inseridas no sistema de bombeamento são maiores quando utilizado o método de estrangulamento da tubulação através de válvulas. Por outro lado quando é utilizado o inversor de frequência não ocorre esse problema pois o motor é ajustado automaticamente para trabalhar em uma rotação suficiente para que aquela vazão seja atendida.

A economia percentual poderá ser levada em consideração em cálculos de viabilidade econômica de estudos direcionados ao investimento em variadores eletrônicos de velocidade, no caso o inversor de frequência, já que os resultados poderão ser adaptados para motores de maior potência.

A tabela 5.1 apresenta os valores médios de rotação, frequência, potência medida e calculada, além da diferença entre essas duas potências.

Vazão (m ³ /h)	Rotação média (rpm)	Frequência (Hz)	Potência média (W) MEDIDA	Potência média (W) CALCULADA
0,1	843	14,05	45,09	10,57
0,2	882	14,7	47,75	12,11
0,3	946	15,76	50,47	14,93
0,4	991	16,52	53,64	17,18
0,5	1055	17,58	59,97	20,73
0,6	1145	19,08	65,71	26,48
0,7	1219	20,32	72,9	32,01
0,8	1338	22,3	83,92	42,31
0,9	1428	23,81	94,01	51,46
1	1543	25,71	108,67	64,80
1,1	1652	27,54	124,13	79,66
1,2	1771	29,51	141,15	98,03
1,3	1891	31,52	164,36	119,38
1,4	2017	33,62	184,9	144,90
1,5	2125	35,41	212,62	169,30
1,6	2247	37,44	240,77	200,15
1,7	2353	39,22	275,96	229,98
1,8	2512	41,87	315,03	279,98
1,9	2624	43,74	356,06	319,00
2	2761	46,01	404,53	371,38
2,1	2879	47,98	451,29	421,27
2,2	3015	50,25	505,13	483,76
2,3	3116	51,94	556,38	534,33
2,4	3243	54,04	620,64	601,88
2,5	3372	56,21	684,34	677,08
2,6	3510	58,5	763,45	763,45

Tabela 5.1 – Valores médios de rotação, frequência e potências ativas medida e calculada.

A potência calculada na tabela 5.1 foi obtida através do uso da equação (2.10) e utilizando como potência e rotação iniciais os valores medidos para a maior vazão, ou seja, 763,45 W e 58,5 Hz para a vazão de 2,6 m³/h.

De forma simples, intencionou-se verificar se a variação dos valores medidos de potência tem característica semelhante aos valores calculados através das equações conhecidas da teoria.

Através da figura 5.4 pode ser observado um comparativo gráfico entre as potências ativas medidas e calculadas.

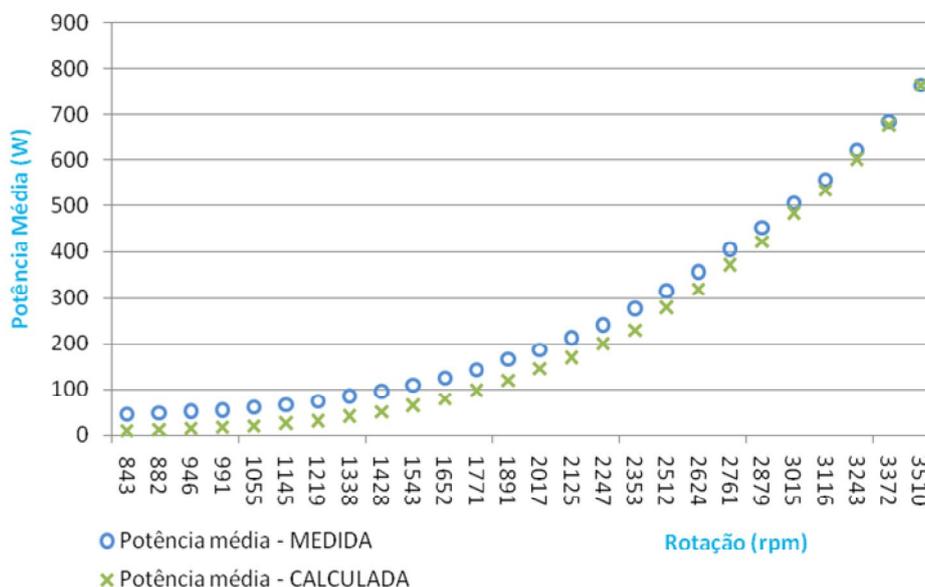


Figura 5. 4 – Variação da potência com variação da rotação do motor.

Apesar das diferenças entre as potências medidas e calculadas, observadas principalmente para as menores vazões, o gráfico permite verificar a característica cúbica da curva de variação de potência com a variação da rotação da bomba, confirmando o exposto pela equação (2.10).

A situação observada em que as diferenças percentuais entre os valores medidos e calculados são maiores na faixa das rotações mais baixas se deve ao fato de que como nessa faixa a potência é muito pequena, qualquer fator externo que influencie na medição terá uma representatividade muito maior do que na faixa de valores de rotação mais elevados. Acima de 2 m³/h a diferença entre os valores medidos e calculados foi inferior a 9 %. Ressalta-se que os equipamentos de medição possuem faixas de imprecisão o que justifica a diferença dos valores teóricos e medidos.

Com a utilização do inversor como método de acionamento e controle de vazão no sistema de bombeamento, também pôde ser observada a variação da frequência de acordo com a variação da vazão.

A figura 5.5 ilustra a variação da frequência para os ensaios realizados com as diferentes vazões.

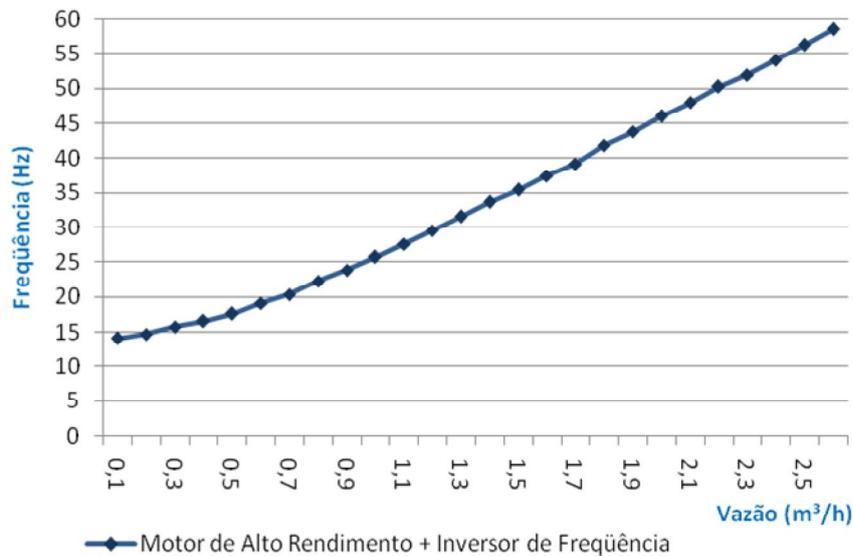


Figura 5.5 – Variação da frequência com variação da vazão (uso do inversor de frequência).

Analisando o gráfico das figuras 5.5 percebe-se a característica linear da variação da potência em relação à variação da frequência e rotação da bomba. Essa característica linear é definida pela equação (2.8).

5.1.2. Comparação entre a utilização de motor *standard* e de alto rendimento

Além da comparação entre os métodos de controle de vazão do sistema, efetuou-se um comparativo entre a utilização de motor de linha padrão (*standard*) e motor de alto rendimento.

Como citado anteriormente, os motores *standard* e de alto rendimento têm rendimentos de 78,6 % e 83 %, respectivamente.

A comparação foi feita associando os motores à partida direta (controle de vazão pela válvula) e os resultados podem ser vistos na tabela 5.2.

Vazão (m ³ /h)	Potência média (W) Motor padrão	Potência média (W) Motor de alto rendimento	Economia utilizando motor de alto rendimento
0,1	603,92	551,08	8,75%
0,2	599,01	550,73	8,06%
0,3	599,82	548,72	8,52%
0,4	600,24	547,79	8,74%
0,5	599,98	547,15	8,81%
0,6	610,5	555,97	8,93%
0,7	620,75	565,92	8,83%
0,8	629,44	577,73	8,22%
0,9	639,16	584,42	8,56%
1	649,12	594,41	8,43%
1,1	660,18	603,24	8,62%
1,2	664,73	613,1	7,77%
1,3	676,28	622,26	7,99%
1,4	684,79	630,06	7,99%
1,5	692,06	639,69	7,57%
1,6	697,39	646,84	7,25%
1,7	704,6	653,94	7,19%
1,8	713	662,15	7,13%
1,9	720,64	670,04	7,02%
2	728,76	680,63	6,60%
2,1	738,15	689,43	6,60%
2,2	746,73	700,57	6,18%
2,3	755,73	708,94	6,19%
2,4	763,55	715,87	6,24%
2,5	766,57	715,59	6,65%
2,6	777,43	723,49	6,94%

Tabela 5.2 – Valores médios de potências para os motores *standard* e alto rendimento.

Analisando os dados da tabela, percebe-se que a economia percentual se situou em uma faixa de 6,18 a 8,93% para todas as vazões analisadas (de 0,1 a 2,6 m³/h), resultando numa economia média de 7,68%.

A potência média com o uso do motor *standard* foi de 603,92 W para a menor vazão (0,1 m³/h) e de 777,43 W para a maior vazão (2,6 m³/h). Com o uso do motor de alto rendimento verificou-se valores de potência média de 551,08 W e 723,49 W para a menor e para a maior vazão respectivamente.

O gráfico da figura 5.6 ilustra a variação da potência média durante os ensaios realizados para diferentes vazões.

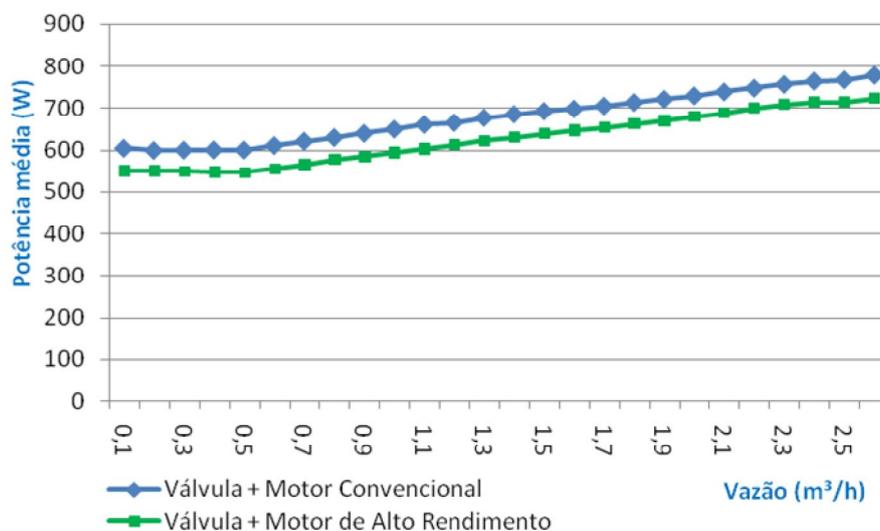


Figura 5. 6 – Comparação entre utilização de motor *standard* com motor de alto rendimento (associados ao uso de partida direta).

Observa-se através do gráfico que a diferença de potência se manteve praticamente constante para todas as vazões analisadas.

A variação do percentual de economia pode ser verificada no gráfico da figura 5.7.

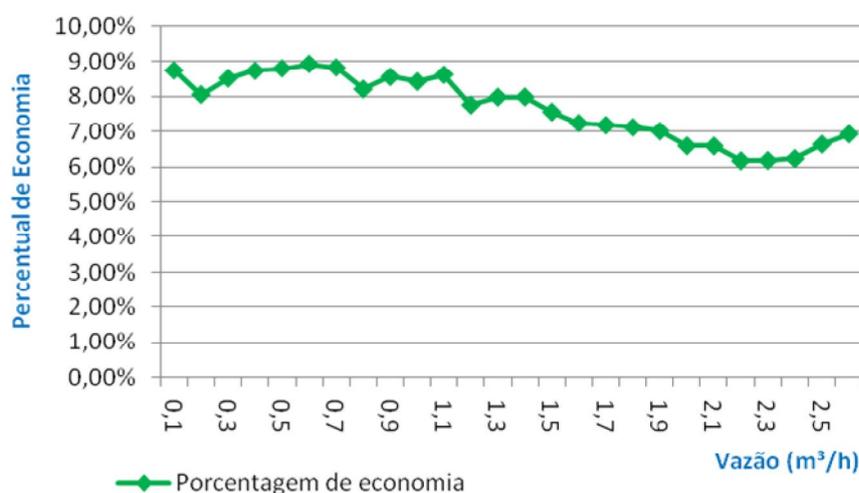


Figura 5. 7 – Economia percentual obtida pela substituição do motor *standard* pelo motor de alto rendimento (associados ao uso de partida direta).

A economia média observada foi abaixo da verificada em outros trabalhos, como o de Silva et al. (2007), por exemplo, onde a redução foi da ordem de 16%. Entretanto, no estudo referido não foram mencionados os rendimentos nominais dos motores utilizados

(dados de placa) e conforme citado por Pereira (2007) o aumento do rendimento varia com a potência do motor e com o fabricante, não sendo, portanto, um valor constante.

É importante destacar também que a portaria interministerial MME/MCT/MDIC n° 553 de 08/12/2005, estabelece o ano de 2009 como prazo para que os motores elétricos de indução de rotor gaiola de esquilo fabricados no país tenham seus rendimentos adequados aos valores mínimos de eficiência energética estabelecidos pelo decreto n° 4508 de 11/12/2002, a Lei da Eficiência Energética. Portanto, com a provável não distinção de motores convencionais e de alto rendimento, espera-se que haja uma redução dos custos dos motores em relação aos valores atuais e assim que os investimentos na substituição de motores sejam ainda mais atrativos do que a condição que ora se observa.

De forma similar ao citado anteriormente, referente à economia advinda do uso do inversor de frequência, os percentuais de economia observados na comparação entre os motores *standard* e de alto rendimento poderão ser utilizados em estudos de viabilidade econômica para verificação do tempo de retorno do investimento. Outro fator importante é contabilizar a economia em Reais (R\$) a longo prazo já que os motores têm vida útil em torno de 20 anos.

5.1.3. Comportamento do fator de potência

O fator de potência certas vezes pode representar um percentual significativo da fatura de energia em indústrias pois a utilização majoritária de motores de indução contribui para que o consumo de energia reativa seja maior do que o previsto na Resolução n° 456 da ANEEL. Valores abaixo de 0,92 passam a ser tarifados pelas empresas concessionárias e se não corrigidos além de elevar bastante os custos com energia elétrica, limitam a possibilidade de ampliação do sistema elétrico de uma empresa devido à sobrecarga dos transformadores.

Dessa forma avaliou-se o desempenho do fator de potência para os quatro conjuntos do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ. A figura 5.8 ilustra o comportamento do fator de potência para os quatro conjuntos analisados.

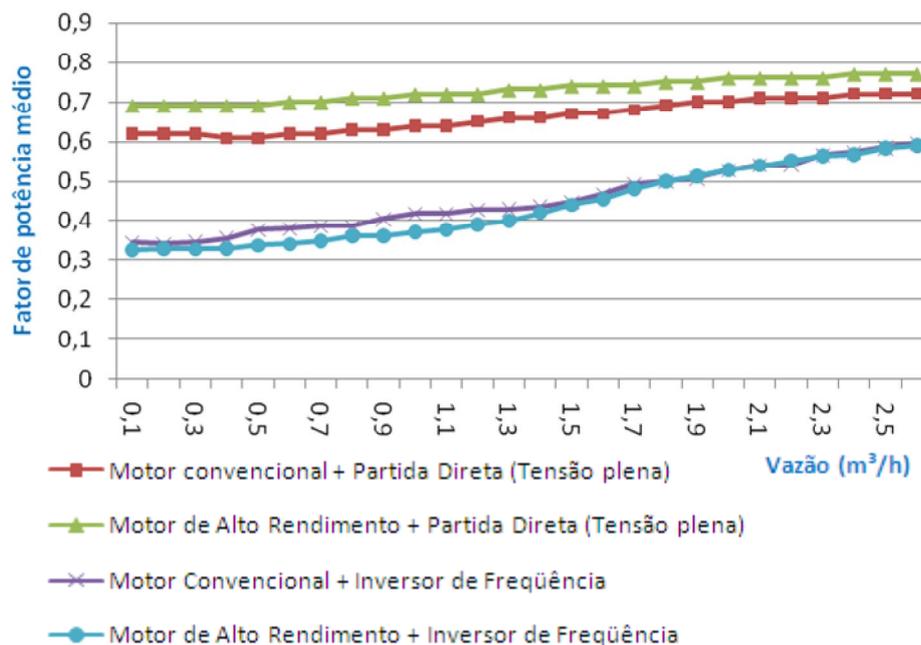


Figura 5. 8 – Comportamento do fator de potência com a variação da vazão.

Analisando a figura 5.8 pode ser observado que os valores de fator de potência médio se situaram entre 0,3 e 0,8 para os quatro conjuntos durante todos os valores de vazão analisados.

Conforme o esperado, para cargas menores o fator de potência se manteve em níveis mais baixos. Com o aumento de carga o fator de potência também se elevou.

Com relação à comparação entre os quatro conjuntos utilizados nesse trabalho, os resultados permitem algumas observações.

Primeiramente, que os melhores desempenhos foram observados quando da utilização da partida direta, seja com motor de alto rendimento ou motor *standard*. Enquanto os dois conjuntos que utilizaram o inversor de freqüência tiveram seus valores de fator de potência situados entre 0,3 e 0,6 durante toda a análise, os conjuntos que utilizaram a partida direta apresentaram valores entre 0,6 e 0,8 na maioria das vazões consideradas. A alta freqüência de chaveamento do inversor contribui para que o fator de potência global do sistema diminua. A avaliação da qualidade de energia não é o enfoque do presente trabalho, entretanto para se constatar a verdadeira relação entre as taxas de distorção harmônicas e o fator de potência sugere-se para trabalhos futuros que seja feita uma análise minuciosa dos valores observados dessas duas grandezas, conforme estudo de Brito e Leão (2006), utilizando o sistema de bombeamento do LAMOTRIZ.

O baixo nível de fator de potência quando da utilização do inversor de frequência deve ser levado em consideração nos estudos de viabilidade econômica para instalação desse tipo de equipamento, pois, conforme os prejuízos citados por Campana et al. (1999), como queima de motores causada pela flutuação de tensão, sobrecarga de equipamentos, entre outros, alguns custos adicionais serão necessários para correção do fator de potência e que conseqüentemente esses malefícios sejam minimizados.

Uma segunda observação refere-se ao fato de que principalmente para o uso da partida direta o motor de alto rendimento apresentou melhor desempenho, quanto ao fator de potência, do que o motor *standard*. Essa condição confirma as características apresentadas nas placas dos motores. Os motores utilizados possuem fator de potência indicado em placa de 0,83 para o motor *standard* e 0,87 para o de alto rendimento.

Nota-se também uma tendência de aumento do fator de potência conforme a vazão também aumenta. Esse comportamento evidencia a importância do correto dimensionamento dos motores, pois quanto mais os sistemas trabalharem a vazio maior será o consumo de energia reativa e conseqüentemente maiores serão os custos com energia elétrica.

Portanto, dentre os quatro conjuntos analisados observou-se que o conjunto formado pela associação do motor de alto rendimento com a partida direta é o mais econômico em termos de energia reativa. Como em plantas industriais existem grandes números de motores de indução o fator de potência pode representar um custo alto na composição do valor final da fatura de energia elétrica de uma indústria. Dessa forma, caso seja possível a utilização de motores de alto rendimento em substituição aos motores *standard*, além da economia do consumo de energia elétrica ativa (contabilizado pelo kWh) também poderá ser eliminada parte de um possível gasto com instalação de banco de capacitores para futura correção do fator de potência.

5.2 Simulação de um sistema de bombeamento com curva de vazão variável

A existência de um sistema totalmente automatizado e monitorado via supervisor permite que sejam reproduzidas e simuladas situações semelhantes às encontradas nas indústrias, caracterizando-se como uma das vantagens da estrutura do LAMOTRIZ.

Com base nessa idéia foram desenvolvidas algumas funções adicionais no sistema supervisor, como descritas anteriormente, para que este possibilitasse a construção de uma curva de consumo de água de um sistema de bombeamento.

A função de variação automática de vazão foi utilizada para que fossem comparados os desempenhos, do ponto de vista da eficiência energética, dos quatro conjuntos analisados nesse trabalho.

A figura 5.9 apresenta a janela *pop up* da função desenvolvida com os dados de variação de vazão e o intervalo de tempo de cada variação.



	Tempo (s)	Valor (m³/h)		Tempo (s)	Valor (m³/h)
✓ 1°	1	0.400	✓ 11°	800	0.100
✓ 2°	3000	0.700	✓ 12°	800	-0.900
✓ 3°	2000	0.300	✓ 13°	1900	-0.300
✓ 4°	1700	-0.500	✓ 14°	2000	-0.200
✓ 5°	3000	0.900	✓ 15°	2400	0.500
✓ 6°	1200	0.500	✓ 16°	1000	0.700
✓ 7°	600	-0.700	✓ 17°	900	0.100
✓ 8°	1000	-0.300	✓ 18°	600	-0.500
✓ 9°	1100	0.400	✓ 19°	1300	-0.200
✓ 10°	900	0.200	✓ 20°	1300	0.600

Número de Alterações: 20 SP Final: 1.800 m³/h

Figura 5.9 – Janela *pop up* da função de variação automática de vazão

Nos ensaios realizados para a curva de vazão simulada de acordo com os dados observados na figura 5.9, foi adotado no supervisor um intervalo de aquisição de dados de 1 em 1 segundo. Posteriormente, esses dados foram integrados em intervalos de 30 segundos. Ressalta-se que originalmente os dados são adquiridos a cada 250 ms no LAMOTRIZ, porém, para evitar uma sobrecarga no banco de dados optou-se pelo aumento desse tempo.

As 20 variações representam uma curva de vazão em um intervalo de 8 horas. O propósito baseia-se na consideração desta curva como uma curva característica de um sistema de bombeamento de um eventual consumidor. A figura 5.10 apresenta a curva de vazão simulada.

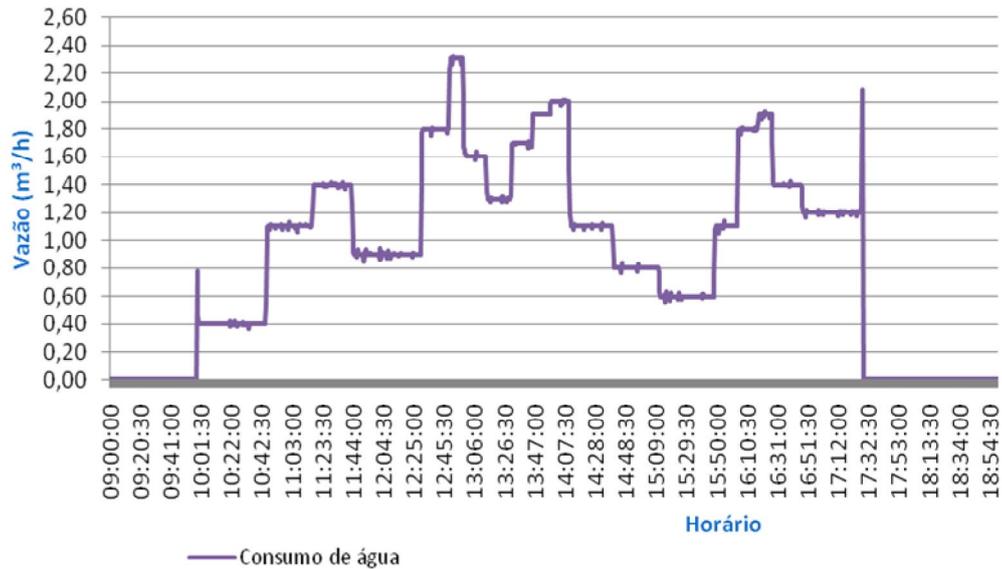


Figura 5. 10 – Curva simulada de consumo de água de um sistema de bombeamento.

Como exemplos de curvas com característica de vazão variável de forma descontínua como a observada na figura 5.10 podem ser citados sistemas de bombeamento que tenham sua vazão regulada conforme o nível de reservatório, ou seja, quanto mais baixo o nível maior a quantidade de água a ser recalçada. Outro caso que pode ser citado são de sistemas que recebam sinais de medição de sensores de umidade e que através da interpretação da leitura destes o sistema supervisor possa enviar o sinal de controle para o inversor ou válvula e então a frequência ou abertura é ajustada automaticamente.

No estudo de Araújo (2003), o inversor de frequência foi parametrizado em relação aos tempos de resposta do controle integral derivativo (PID) , operando em malha fechada, sendo que o ajuste foi feito de acordo com a leitura de sensores de pressão instalados no sistema de irrigação. A comparação foi feita com um sistema convencional utilizando válvulas solenóides para abertura de linhas do sistema de irrigação, diferentemente da comparação proposta na presente simulação deste trabalho que efetua a comparação do inversor de frequência com uma válvula pneumática automaticamente controlada.

Na figura 5.11 pode ser observada a curva de carga dos quatro conjuntos analisados para a curva de vazão da figura 5.10.

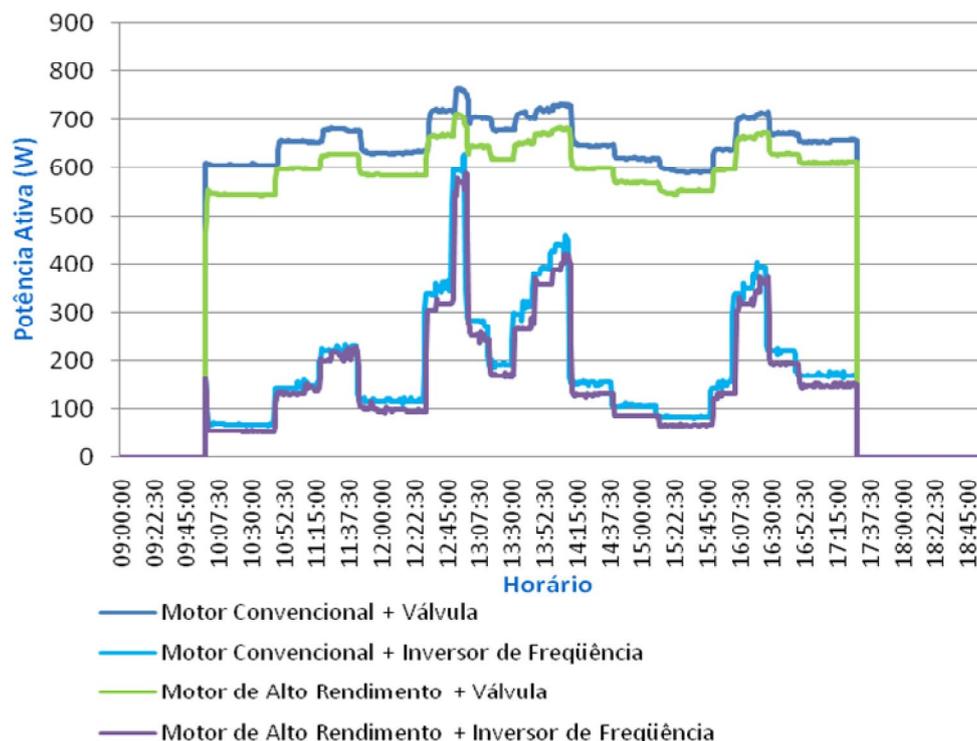


Figura 5.11 – Curva de carga para os quatro conjuntos.

Esse tipo de funcionamento do sistema de bombeamento requer que exista um processo com alto nível de automação pois a válvula ou o inversor tem seus parâmetros ajustados automaticamente conforme a necessidade de suprimento de uma determinada vazão.

Na figura 5.11 pode ser verificada que a curva de carga para os quatro conjuntos acompanha o comportamento da curva de vazão do sistema.

A característica da curva de carga influi diretamente e tem grande representatividade na análise da viabilidade econômica de investimentos em métodos para a obtenção de um melhor nível de eficiência energética. Para consumidores horosazonais, por exemplo, a economia financeira obtida com a redução do consumo de energia pode ser muito maior em relação a um consumidor enquadrado nas tarifas convencionais no caso da curva de carga ser elevada no horário de ponta.

Como não foi o objetivo do presente trabalho, sugere-se que no futuro sejam realizadas análises comparativas do investimento em métodos de eficiência energética em sistemas de bombeamento para diferentes curvas de vazão (diferentes curvas de carga) e seu impacto em clientes enquadrados nas estruturas tarifárias convencionais e horosazonais no Mato Grosso do Sul, utilizando o sistema de bombeamento do LAMOTRIZ.

5.2.1. Comparação entre o uso da válvula e do inversor de frequência

A partir de uma análise das curvas de carga apresentadas na figura 5.11 verifica-se que os dois conjuntos que utilizaram inversor de frequência como forma de controlar a vazão do sistema de bombeamento apresentaram valores significativamente menores de potência do que os conjuntos que utilizaram a válvula pneumática.

Essa diferença entre as curvas de carga pode ser observada também na curva de consumo para cada conjunto, apresentada na figura 5.12.

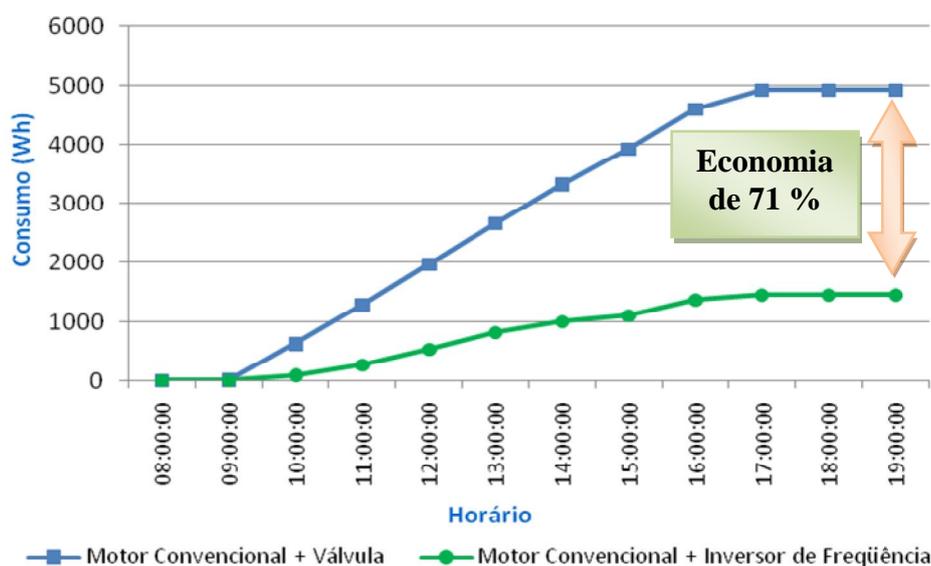


Figura 5. 12 – Consumo de energia elétrica (comparativo entre uso de válvula e inversor).

Enquanto o consumo total para a curva de vazão simulada foi de 4921 Wh para o conjunto formado pelo motor *standard* com uso da válvula, o consumo total do conjunto motor *standard* com inversor de frequência foi de 1449 Wh. Portanto, a economia verificada foi de 71% com a substituição da válvula pelo controle de vazão através de inversor de frequência.

Ressalta-se, porém, que a economia percentual dependerá da característica da curva de consumo de água. Curvas nas quais a vazão média estiver mais próxima da capacidade nominal da bomba apresentarão menor economia na troca da válvula pelo inversor. A vazão média para a curva simulada foi de aproximadamente 1,6 m³/h e de acordo com a análise da figura 5.3 a economia referente a esse patamar de vazão foi em torno de 65 %, valor próximo ao obtido nessa simulação (71%).

5.2.2. Comparação entre o uso de motor *standard* e de alto rendimento

Da mesma forma como foi comparada o uso da válvula com o uso do inversor de frequência, também foi avaliada a economia proveniente da troca do motor *standard* por motor de alto rendimento para a curva de vazão variável analisada.

As características de consumo de energia elétrica para os dois tipos de motores podem ser observadas na figura 5.13.

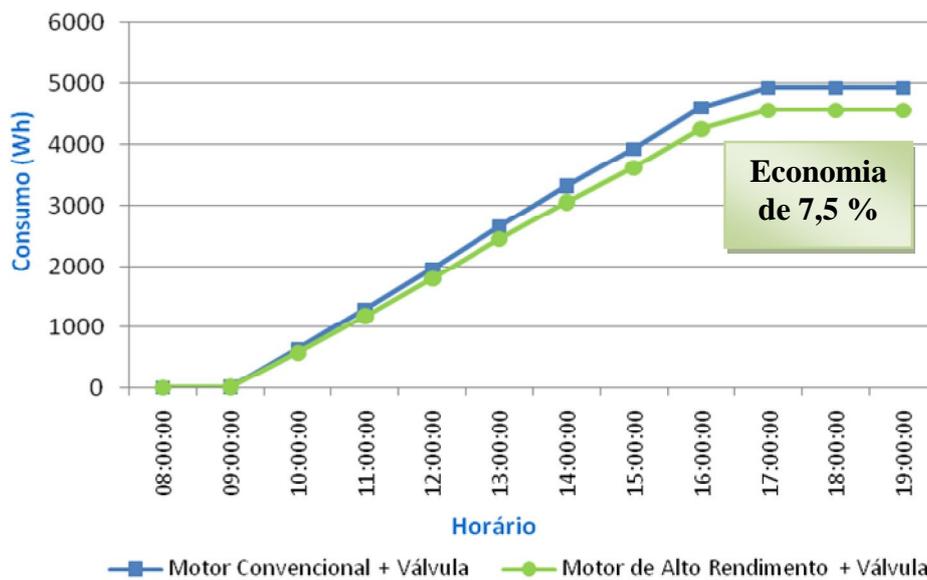


Figura 5. 13 – Consumo de energia elétrica (comparativo entre uso de motor *standard* e de alto rendimento).

O consumo de energia durante a simulação para o conjunto que utilizou o motor *standard* foi de 4921 Wh. Por outro lado, o consumo verificado para o conjunto que utilizou o motor de alto rendimento foi de 4553 Wh. Essa diferença de consumo observada (368 Wh) corresponde a uma economia de 7,5 % quando se faz a opção pelo uso do modelo mais eficiente de motor.

Conforme verificado anteriormente (item 5.1.2), quando variou-se a vazão de 0,1 a 2,6 m³/h, a economia advinda da troca do motor *standard* pelo de alto rendimento esteve entre 6,18 % a 8,93 %, correspondendo a uma economia média de 7,68 %. Portanto, a economia observada para a presente situação de carga simulada situou-se bem próxima da economia média observada anteriormente.

5.3 Sistema funcionado com religamento automático por nível (liga e desliga)

Atualmente, existem ainda um grande número de sistemas de bombeamento que trabalham de acordo com o nível do reservatório de recalque. Ou seja, ao atingir um nível mínimo pré-estabelecido o conjunto motor-bomba é acionado e só é desligado ao atingir um nível máximo também pré-definido.

Nesse tipo de funcionamento, na maioria dos casos, o motor trabalha sob a frequência nominal e com diversas partidas em curtos espaços de tempos. O excesso de partidas prejudica as partes elétricas e mecânicas do motor fazendo com que haja um gasto maior com a manutenção desse equipamento.

Com a utilização do inversor de frequência, pode-se ajustar a velocidade mínima na qual o motor funcionará para que o nível do reservatório esteja sempre acima do limite mínimo.

Nesta simulação foi utilizada a função de religamento automático por nível, desenvolvida no supervisório. A figura 5.14 apresenta a janela de comando do supervisório onde foi inserida a nova função.

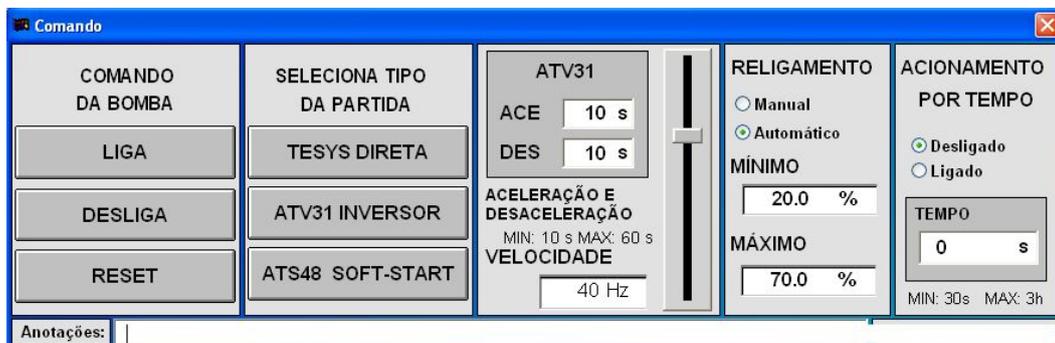


Figura 5. 14 – Janela de Comando do supervisório com função de religamento automático por nível

Assim como na simulação para a curva de vazão variável (item 5.2), a taxa de amostragem dos dados utilizada foi de 1 segundo. Essa taxa é suficiente para a análise energética do sistema e evita que o banco de dados e posteriormente a elaboração de planilhas e gráficos fique sobrecarregada.

5.3.1. Freqüência mínima de operação do conjunto motor-bomba

Foram utilizados nos ensaios, valores pré-definidos para o nível do reservatório superior, sendo 20 % para o mínimo e 70% para o máximo. Considerou-se o funcionamento durante uma hora para cada um dos ensaios e o motor utilizado para todos os casos foi o de alto rendimento.

Inicialmente, optou-se por trabalhar com sete valores de freqüência, sendo eles: 30 Hz ; 35 Hz ; 40 Hz ; 45 Hz ; 50 Hz ; 55 Hz e 60 Hz.

Entretanto para que a condição de nível mínimo do reservatório fosse atendida a freqüência de 30 Hz não foi suficiente, conforme pode ser observado na figura 5.15.

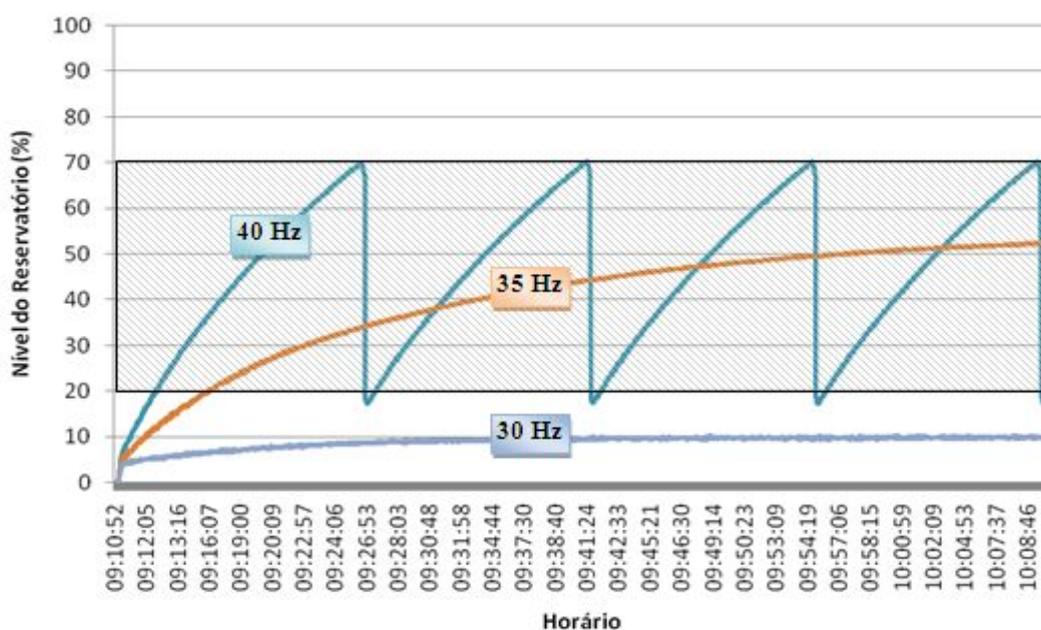


Figura 5.15 – Variação do nível do reservatório para diferentes freqüências

No gráfico da figura 5.15 podem ser visualizadas as variações do nível do reservatório para os três menores valores de freqüência considerados. Verifica-se que o valor mínimo a ser trabalhado nesse caso é de 35 Hz pois para esse valor o nível do reservatório tendeu-se a estabilizar em torno de 54 %, suficiente para os limites estabelecidos.

Salienta-se também que conforme a freqüência aumenta, maior a quantidade de acionamentos aos quais o motor será submetido. Para 40 Hz, por exemplo, como observado na figura 5.15, no intervalo de uma hora ocorreram três religamentos, enquanto que para 35 Hz o funcionamento do conjunto motor-bomba passou a ser ininterrupto.

5.3.2. Comparação do consumo de energia para frequência nominal (60 Hz) e demais frequências

Definidos, então, os valores de frequência a serem utilizados, foram realizados ensaios de uma hora para cada um deles. O consumo em Wh foi quantificado e os resultados podem ser visualizados na figura 5.16.

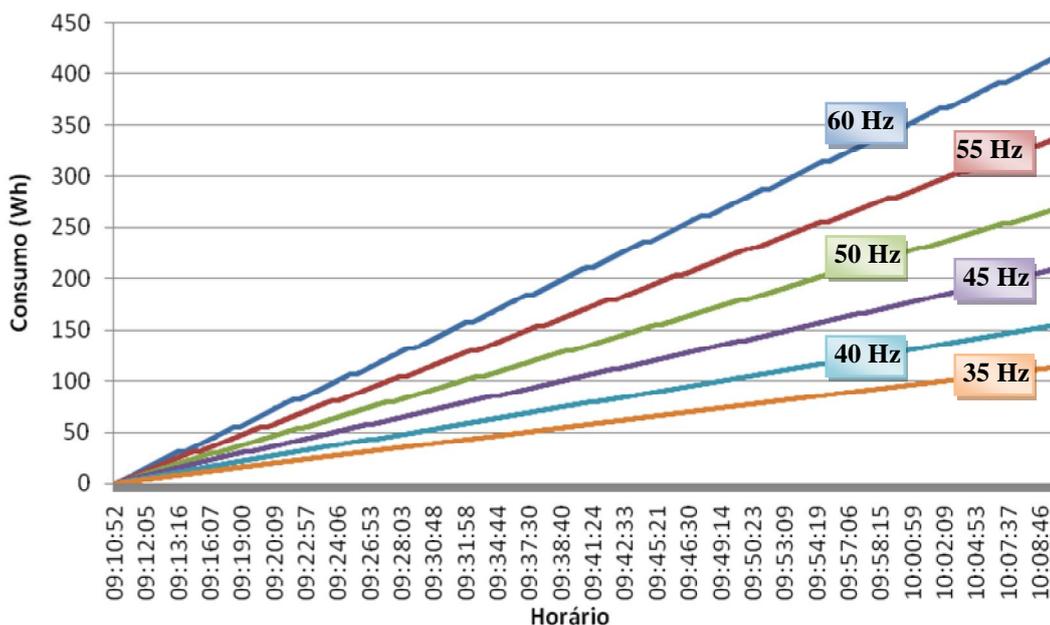


Figura 5. 16 – Consumo de energia do sistema de bombeamento funcionando com diferentes frequências.

Como pode ser observado, para o funcionamento na frequência nominal (60 Hz) o consumo de energia para atender as condições estabelecidas foi significativamente maior do que para os demais valores de frequência. A tabela 5.3 apresenta o consumo em Wh e a economia percentual de obtida para cada uma das frequências analisadas.

Variáveis	Frequências					
	60 Hz	55 Hz	50 Hz	45 Hz	40 Hz	35 Hz
Consumo (Wh)	417,49	340,06	270,03	210,32	154,99	113,54
Economia (%)	-	18,55	35,32	49,62	62,88	72,80

Tabela 5.3 – Consumo de energia e economia percentual com relação à frequência nominal (60 Hz)

Conforme os resultados visualizados na tabela 5.3, a economia percentual variou entre 18,55 % e 72,80 %, sendo que o maior valor foi observado para o funcionamento do motor a 35 Hz. A economia observada foi semelhante a observada em outros estudos, como por exemplo em Schmidlin (2006) onde foi observada uma redução de aproximadamente 85% da potência média para o sistema trabalhando em 30 Hz e de 50 % para a frequência de 45 Hz. Entretanto, no trabalho citado não foi estabelecida uma certa condição de carga a ser atendida pelo sistema de bombeamento, conforme a proposta desta simulação (manter nível do reservatório entre 20 e 70%) que visa representar um sistema funcionando no modo de religamento automático por nível.

É importante ressaltar que essa economia se aplica à situação simulada, onde os níveis mínimos e máximos foram de 20 e 70 %, respectivamente. Outras condições, onde os níveis analisados sejam diferentes, poderão apresentar percentuais de economia distintos, e principalmente uma frequência mínima diferente deste caso.

Os resultados apresentados para uma hora poderão ser expandidos para um período diário desde que o comportamento do consumo de água seja o mesmo durante todo o tempo. A partir de então, considerando as particularidades de cada consumidor, poderão ser realizados cálculos de viabilidade econômica para analisar se é vantajoso ou não o investimento na instalação de um inversor de frequência.

Quanto à funcionalidade do supervisor para esse tipo de simulação, observou-se que o desempenho foi conforme o esperado ao ser criada a nova função de religamento automático por nível. A resposta do sistema aos comandos estabelecidos foi completamente satisfatória para a proposta da simulação.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Com relação às novas funções concluiu-se que para a primeira implementação (criação de um sistema para controlar o tempo de funcionamento da bancada da bomba centrífuga) o desempenho foi conforme o esperado inicialmente e nenhum problema foi observado durante os testes em que a função estava habilitada.

Verificou-se também que a atuação da função para variação automática da vazão em intervalos de tempo pré-determinados, denominada como função de *set-point* automático, correspondeu às expectativas iniciais durante os ensaios em que foi utilizada, uma vez que a resposta do sistema aos parâmetros pré-estabelecidos foi extremamente satisfatória.

De maneira similar, para a função de religamento automático por nível, que objetiva representar sistemas de bombeamento que funcionem como “liga-desliga” conforme os níveis mínimos e máximos do reservatório, também não foram observados problemas durante sua utilização.

Com relação ao desempenho do sistema de bombeamento, foram realizadas três simulações.

A proposta da primeira simulação foi obter uma visão geral do desempenho energético do sistema de bombeamento do LAMOTRIZ em toda a sua faixa de funcionamento, ou seja, desde 0,1 até 2,6 m³/h. Para as análises efetuadas observou-se que a economia proporcionada pelo uso do inversor de frequência foi de até 90% (valor obtido para a menor vazão) em relação ao uso da válvula pneumática. No comparativo entre os motores, verificou-se uma economia média de 7,68 % com a substituição do motor *standard* pelo modelo de alto rendimento. Concluiu-se também que a utilização do inversor de frequência, apesar da economia de energia ativa proporcionada, reduziu o fator de potência do sistema. Enquanto os dois conjuntos (motor + método de acionamento) que utilizaram o inversor de frequência tiveram seus valores de fator de potência situados entre 0,3 e 0,6

durante toda a análise, os conjuntos que utilizaram a partida direta apresentaram valores entre 0,6 e 0,8 na maioria das vazões consideradas.

O objetivo da segunda simulação foi representar um sistema de bombeamento com uma curva variável de vazão ao longo do dia. Enquanto o consumo total para a curva de vazão simulada foi de 4921 Wh para o conjunto formado pelo motor *standard* com uso da válvula, o consumo total do conjunto motor *standard* com inversor de frequência foi de 1449 Wh. Portanto, a economia verificada foi de 71% com a substituição da válvula pelo controle de vazão através de inversor de frequência. Com relação aos motores, foi observada uma redução de 7,5 % no consumo de energia para essa curva simulada quando se faz a opção pelo uso do motor de alto rendimento em substituição ao motor *standard*.

A terceira simulação foi para um sistema de bombeamento funcionando através do nível do reservatório de recalque. Foram considerados como níveis mínimo e máximo os percentuais de 20 e 70 %, respectivamente. Utilizando o inversor de frequência, comparou-se o funcionamento na frequência nominal 60 Hz com outras frequências. Verificou-se economia de aproximadamente 73% do consumo de energia para o conjunto motor-bomba funcionando a 35 Hz. Os valores abaixo de 35 Hz foram insuficientes para manter o nível do reservatório acima do limite mínimo.

Portanto, para as simulações realizadas foi claramente vantajosa a utilização de inversor de frequência em substituição aos métodos tradicionais para controle de vazão. Entretanto, o percentual de economia obtido varia conforme a característica da carga e por isso cada situação deve ser analisada criteriosamente para definir se a instalação desse tipo de equipamento é economicamente viável. Deve-se tomar o cuidado também de adotar medidas que compensem a diminuição do fator de potência proveniente da utilização de inversores de frequência pois em uma planta industrial com vários motores os custos gerados com consumo excessivo de energia reativa podem ser altamente significativos.

O uso do motor de alto rendimento também se mostrou vantajoso nas situações analisadas apesar da economia obtida ter sido abaixo da observada em outros trabalhos. Ressalta-se que é importante contabilizar a economia em Reais (R\$) a longo prazo já que os motores têm vida útil superior a 20 anos.

Salienta-se também que as metodologias adotadas para a elaboração das funções no sistema supervisorio poderão contribuir para o desenvolvimento de novas funções, sejam em sistemas laboratoriais ou sistemas encontrados na prática, já que muitas empresas

utilizam sistemas de controle e supervisão e o *software* utilizado neste trabalho é bastante difundido em níveis industriais.

Destaca-se finalmente que o desenvolvimento das novas funções contribuiu de maneira determinante para o êxito do trabalho uma vez que o objetivo inicial de representar o comportamento de sistemas de bombeamento reais em laboratório foi alcançado. Dessa maneira cria-se mais segurança para os investimentos na utilização de controladores eletrônicos de velocidade e na troca de motores *standard* por modelos de alto rendimento, atentando-se sempre para os prazos de retorno do capital investido para cada situação.

De forma complementar aos objetivos do trabalho, evidencia-se o grande valor técnico-científico do convênio ECV 024/2004 entre a UFMS e a ELETROBRÁS, pelo qual foi possível a implantação do LAMOTRIZ fomentando as atividades de pesquisas voltadas à eficiência energética em sistemas motrizes que contribuem para a diminuição do desperdício de energia elétrica e conseqüentemente cooperam com a minimização dos impactos ao meio ambiente.

6.2 Recomendações para trabalhos futuros

Durante a realização da presente dissertação, algumas observações foram feitas e se aplicam como sugestões para a realização de novos trabalhos. Destaca-se:

- Reproduzir a curva de um sistema de bombeamento real através de simulações no LAMOTRIZ e comparar os resultados obtidos em laboratório com os resultados observados na prática;
 - A partir da utilização de inversores de frequência, confrontar os benefícios obtidos pela redução do consumo de energia com os prejuízos causados à instalação elétrica devido ao aumento da taxa de distorção harmônica;
 - Realização de estudo de viabilidade econômica da instalação de inversores de frequência e substituição de motores convencionais por alto rendimento para um consumidor do Mato Grosso do Sul.
-

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMSEM, F.; BLAABJERG, F.; PEDERSEN, J. K.; GRABOWSKI, P. Z.; THOGERSEN, P. On the Energy Optimized Control of Standard and High-Efficiency Induction Motors in CT and HVAC Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 34, n. 4, p. 822-831, jul/ago, 1998.

ALMEIDA, A. T.; FERREIRA, F. J. T. E.; BOTH, D., Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives with Electric Motor Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 41, p. 188-199, 2005.

ALMEIDA, M. A. **O Potencial de Redução do Consumo de Energia Elétrica em Sistemas Eletromecânicos: Análise de Alternativas para seu Melhor Aproveitamento**. 2001. 447 p. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2001.

ARAÚJO, J. A. B. **Aplicação de Inversor de Frequência Para Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Irrigação por Aspersão**. 2003. 142 p. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista - UNESP. Botucatu, 2003.

ARRUDA, M. A. **Análise de Viabilidade da Irrigação e Participação da Energia na Composição de Custos**. Seminário Nacional de Energia Para Irrigação. Belo Horizonte, 1988.

BARDALES, K. N.; CHEUNG, P. B.; SILVA JR., A. R.; IDE, C. N. **Eficiência Energética na Operação de um Sistema Adutor de Água utilizando Otimização Multiobjetivo**. II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Vitória, 2007.

BEN **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia, ano base 1999.

BEN **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia, ano base 2001.

BEN **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia, ano base 2006.

BRASIL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Conservação de Energia Elétrica na Indústria**. Elaborado pelo CODI - Comitê de distribuição, sob a supervisão técnica da ELETROBRÁS, 1998.

BRASIL. **Decreto nº 4.508, de 11 de Dezembro de 2002**. Regulamentação específica que define os níveis mínimos de eficiência energética de motores elétricos trifásicos de indução rotor de gaiola de esquilo, de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=108&download>> Acesso em: 03. mai. 2007.

BRITO, C. M. C.; LEÃO, R. P. S. **Desempenho de um motor de indução trifásico submetido a distorções harmônicas na tensão de alimentação.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, 2006.

CADERNO DIGITAL DE INFORMAÇÃO SOBRE ENERGIA, AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Economia de Energia na Indústria.** Florianópolis, 2001. Disponível em: <<http://www.guiafloripa.com.br/energia/trivia>> Acesso em: 26. abr. 2007.

CAMPANA, S.; OLIVEIRA FILHO, D.; SOARES, A. A.; OLIVEIRA, R. A. Estudo comparativo de métodos para estimativa do carregamento e rendimento de motores elétricos para auditoria energética. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 1999.

CAMPBELL, D. L. **How customer need focused the development of a new remote terminal unit line.** IEEE Computers Applications in Power, 1988.

CEMIG Clientes Industriais. **Motor Trifásico de Alto Rendimento - Rendimento Extra (R\$) para a sua Empresa.** 1997. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/consumidores_industriais/>. Acesso em: 07. mai. 2007.

CORETTI, J. A. **Manual de Treinamento Básico de Controlador Programável.** Sertãozinho, Centro de Treinamento SMAR, 1998.

CORREIA, P. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Industrial AT.** Apresentação realizada no Workshop “Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil”. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>> Acesso em: 18. abr. 2007.

DIAS, R. A. **Impactos da substituição de equipamentos na conservação de energia.** 1999. 94 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 1999.

DIAS, R. A.; MATTOS, C. R.; BALESTIERI, J. A. P. **Conservação de Energia: Conceitos e Sociedade.** Disponível em: <<http://www.nepet.ufsc.br/Artigos/Texto/Conservacao.htm>> Acesso em: 03. abr. 2007.

ELETROBRÁS. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento.** 1998, 76p.

ELETROBRÁS **Programa PROCEL.** Disponível em: <<http://www.eletronbras.gov.br>> Acesso em: 02. abr. 2007.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Estatística e Análise do Mercado de Energia Elétrica.** Ministério de Minas e Energia. Boletim mensal, mês base janeiro de 2007, mar/2007.

GALVÃO, L. C. R.; REIS, L. B.; UDAETA, M. E. M.; GIMENES, A. L. V. GLD - O estado da arte no Brasil e suas perspectivas para o futuro. **Eletricidade Moderna**, São Paulo, v. 3, n. 286, p.143-158, 1998.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria.** 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento.** São Paulo: EDUSP – Editora da Universidade de São Paulo, 1998. 234 p.

GUALBERTO, L. **Motores Elétricos de Alto Rendimento.** Programa Municipal de Gestão Energética. GEPEA/EPUSP Grupo de Energia do Departamento de Energia e Automação Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Disponível em: <www.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/gestaopublica/pmge> Acesso em: 02. mai. 2007.

HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; SANTOS A. H. M. S. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos.** 2. ed. Itajubá: Efei, 2001. 597p.

HAALAND, O. E. **Man Machine Interfaces and the Engineer.** Proceedings of the Industrial Computing Conference. v. 6, Chicago, 1996.

HANSON, B.; WEIGAND, C.; ORLOFF, S. **Performance of Electric Irrigation Pumping Plants Using Variable Frequency Drives.** New York, 1996.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Contas Nacionais Trimestrais – Indicadores de Volume** – ano base 2003.

JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. **Água e Energia: Aproveitando as oportunidades de eficientização da água e energia não exploradas nos sistemas municipais.** Washington D.C.: Alliance to Save Energy, 2002.

JANNUZZI, G. M. **Aumentando A Eficiência Nos Usos Finais De Energia No Brasil.** Artigo. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas, 2001.

JESUS, C. E. **Amperes Automation.** Cubatão, 2002. Disponível em <<http://www.amperesautomation.hpg.ig.com.br/index0.html>> Acesso: 05. jun. 2007.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores.** 14 ed. São Paulo: Globo Editora, 2000. 667p.

LA ROVERE, E. L. **Conservação de Energia em sua Concepção mais Ampla: Estilos de Desenvolvimento a Baixo Perfil de Consumo de Energia.** Marco Zero editora/FINEP, p. 474-489, 1985.

LOBOSCO, O. S.; DIAS, J. L. P. C. **Seleção e Aplicação de Motores Elétricos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 511 p.

MACHADO, F. V. P. **Eficiência Energética de Conjuntos Moto-Bomba.** II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Vitória, 2007.

MELLENDEZ, J.; COLOMER, J.; DE LA ROSA, J. **Expert supervision based on cases.** 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2001.

MINTCHEL, G.. **Plan Ahead to Build the Perfect HMI System**. Control Engineering, 2001.

MOORE, J. A. **Digital Control Devices, Equipment and Applications**. ISA Press, 1986.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 2001. 358 p.

NATALE, F. **Automação Industrial**. 1. Ed. São Paulo: Editora Érica, 2000. 256 p.

NETO, F. A. **Diagnóstico Informatizado de Eficiência Energética: Uma Proposta às Agroindústrias**. 2004. 149 p. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista – UNESP. Botucatu, 2004.

OCÁCIA, G. C.; DUART, H. A.; MARTINS, F. M.; HERMANN, L. C.; BIANCHI, A. L. **Uso racional de energia em estação de bombeamento de água para irrigação de arroz**. AGRENER 2002 - 4^o Encontro de Energia no Meio Rural. Universidade Luterana do Brasil. Canoas, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora Prentice - Hall do Brasil, 2003. 800 p.

OLIVEIRA, N. J. Guia Nacional do Comprador de Soft-Starters. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, p. 44-50, 2000.

OTTOBONI, A. A. Evolução do Controle de Velocidade. **Revista Saber Eletrônica**. São Paulo, p. 19, set, 2002.

PEREIRA, L. A. **Tecnologias de Uso Final I – Equipamentos Elétricos**. Disponível em: <www.ee.pucrs.br/~lpereira/TUF> Acesso em: 03. mai. 2007.

PROCEL / ELETROBRÁS. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro, p. 36-63, 2005.

PROCEL INDÚSTRIA / ELETROBRÁS. **Acionamento Eletrônico – Guia Avançado**. Rio de Janeiro, dez, 2004b.

PROCEL INDÚSTRIA / ELETROBRÁS. **Bombas – Guia Avançado**. Rio de Janeiro, 2004a, 18p.

PROCEL - **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/procel>> Acesso em: 04. abr. 2007.

PUPO, M. S. **Intervenção homem-máquina para supervisão em um CLP em controle de processos através da WWW**. 2002. 113p. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo - USP. São Carlos, 2002.

RODRIGUES, W.; JÚNIOR, E. L. **Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento**. UNICAMP. Campinas, 2002. 11p.

ROOKS, J. A.; WALLACE, A. K. Energy Efficiency of VSDs. **IEEE Industry Applications Magazine**, p. 57-61, mai/jun, 2004.

SCHAEFFER, R. **Avaliação dos Índices de Eficiência Energética para Motores Trifásicos de Indução**. Relatório final entregue a UN/DESA/CLASP. Rio de Janeiro, 2005.

SCHMDLIN JR., C. R. **Operação do Conjunto Bomba Centrífuga, Motor de Indução Trifásico e Conversor de Frequência visando a Eficiência no Uso da Energia Elétrica**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2006

SCHNEIDER Electric Brasil. **Introdução à automação. Treinamento on-line**. Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com.br/>> Acesso em: 15. dez. 2007.

SILVA, A. P. G.; SALVADOR, M. **O que são sistemas supervisórios**, 2004. Disponível em: <<http://www.elipse.com.br/download/download/artigos/rt025.04.pdf>>. Acesso em 18. jul. 2007.

SILVA JR., A. N. **Eficiência Energética em Sistemas de Aeração de Silos de Armazenagem de Grãos, utilizando Inversores de Frequência**. 2004.132p. Tese (Doutorado) Universidade Estadual Paulista - UNESP. Botucatu, 2004.

SILVA, S. F. P.; DELAIBA, A. C.; BISPO, D.; PEREIRA, R. A.; GUIMARÃES, R.; ZAPPELINI, A. B.; FERREIRA, C. A. **Especificação para um Laboratório de Eficiência Industrial**. II Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, Vitória, 2007.

SIMPSON, C. D. **Programmable Logic Controllers**. NJ. Regents / Prentice Hall, 1994. 294 p.

SOBRINHO, M. A. M.; SANTOS, V. A. **Equipamentos para Deslocamento de Fluidos – Bombas**. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Química, Recife, 1998. 5 p.

SOUZA, F. C. **Desenvolvimento de metodologia de aplicação de redes de Petri para automação de sistemas industriais com controladores lógicos programáveis**. 2006. 146p. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2006.

TAIT, A. **Internets and intranets for industrial applications**. Hypermedia in Manufacturing Seminar, 1998.

TOLMASQUIM, M. T. **Fim do racionamento, mas não da crise de energia**. Democracia Viva, Rio de Janeiro, 2002.

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

UDDIN, S.; NOR, K. M.; SALAM, S. **Integration technique for an expert system on to a real-time system**. Proceedings of the TENCON'2000, 2000.

VIEIRA JR., P.; MESQUITA, A. L. A.; SILVA, P. R. N.; ROCHA, C. M. G.; SOUZA, V. H. P. **Verificação da Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento Utilizando Simulação de Modelo Matemático.** INDUSCON, 2006

WALSKI, T. M. Tips for Saving Energy in Pumping Operations. **Journal AWWA**, v. 85. p. 49-53, 1993.

WARNOCK, I.G. **Programmable Controllers – Operation and Application.** Ed. Prentice Hall Europe, 1997. 447 p.

WEG Equipamentos Elétricos S/A – Motores. **Motores elétricos: Linhas de Produtos, Características, Especificações, Instalações e Manutenções.** Disponível em: <www.weg.com.br> Acesso em: 24. abr. 2007.

WERNECK, M. M. **Transdutores e Interfaces.** 1 Ed. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos, 1996. 226 p.

YOUNG, C. E. F.; LUSTOSA, M. C. J. **Meio Ambiente e Competitividade na Indústria Brasileira.** Grupo de Pesquisa em Economia do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2007.

APÊNDICES

Apêndice A - Função para acionamento por tempo

Apêndice B - Função para *set-point* automático

Apêndice C - Função para religamento automático por nível do reservatório

Apêndice D - Lista de materiais da bancada da bomba centrífuga

- Apêndice A -

Função para acionamento por tempo

Escrita de parte da função em VBS:

```
If $bc.actempo = 1 Then                // Verifica o acionamento por tempo está ligado
    $bc.tempofin = $GetClock() + $bc.tempo // Calcula o momento de parada (hora atual + tempo
ligado)
End If
```

Escrita de parte da função em IWS:

Tag	Expression
bc.tesys	if(bc.indica_driver=3 AND GetClock())=bc.tempofin,0)
bc.atv31	if(bc.indica_driver=2 AND GetClock())=bc.tempofin,0)
bc.ats48	if(bc.indica_driver=1 AND GetClock())=bc.tempofin,0)

Variáveis:

- bc.tesys - ligar ou desligar a bomba com acionamento Direto (1-ligado, 0-desligado)
- bc.ats48 - ligar ou desligar a bomba com acionamento a partir do *Soft-Start* (1-ligado, 0-desligado)
- bc.atv31 - ligar ou desligar a bomba com acionamento a partir do Inversor (1-ligado, 0-desligado)
- bc.indica_driver - indica qual partida está sendo utilizada (1-*soft-start*,2-inversor,3-direta)

Estrutura IF

if (condição , ações caso a condição seja verdadeira , ações caso a condição seja falsa)

- Apêndice B -

Função para *set-point* automático

Escrita da função:

```
If $bc.habilita = 0 Then
  If $bc.sp_controle = 1 Then // Verifica se a função de set-point está ligada
    Call Sub Sp_auto ()
  End If
End If
```

```
If ($bc.sp_controle = 1) And ($bc.controle_sp = 1) Then // Verifica se o script descontínuo esta
ligado
  For contador = 0 To $bc.sp_usado // Faz contador variar até o numero de alterações
    $sp[contador].bc_final = $GetClock()
    For count = 0 To contador // Faz count variar até contador
      $sp[contador].bc_final = $sp[contador].bc_final + $sp[count].bc_tempo
      // Indica o tempo final de cada alteração
    Next
  Next
ElseIf ($bc.sp_controle = 1) And ($bc.controle_sp = 0) Then // Verifica se o script contínuo está
ligado
  $sp[0].bc_final = $GetClock() + $sp[0].bc_tempo // Calcula o tempo final
End If
```

```
Sub Sp_auto (Bancada)
  If $bc.controle_sp = 0 And Then // Verifica se o set-point está definido para variar
continuamente
    If $sp[0].bc_final <= $GetClock() Then // Verifica se está no momento certo para mudar.
      bc.sp_pid = $bc.sp_pid + $sp[0].bc_aumento
      $sp[0].bc_final = $GetClock() + $sp[0].bc_tempo
    End If
  ElseIf $bc.controle_sp = 1 Then // Verifica se o SP está definido para variar
descontinuamente
    If BC_Contador <= $bc.sp_usado Then
      If $sp[BC_Contador].bc_final <= $GetClock() Then
        $bc.sp_pid = $bc.sp_pid + $sp[BC_Contador].bc_aumento
        BC_Contador = BC_Contador + 1
      End If
    End If
  End If
End Sub
```

- Apêndice C -

Função para religamento automático por nível do reservatório

Escrita no IWS

Tag	Expression
bc.tesys	If (bc.lit01 > bc.volume_max AND bc.indica_driver = 3 AND bc.dinabomba = 2,0)
bc.tesys	If (bc.lit01 < bc.volume_min AND bc.indica_driver = 3 AND bc.dinabomba = 2,1)
bc.ats48	If (bc.lit01 > bc.volume_max AND bc.indica_driver = 1 AND bc.dinabomba = 2,0)
bc.ats48	If (bc.lit01 < bc.volume_min AND bc.indica_driver = 1 AND bc.dinabomba = 2,1)
bc.atv31	If (bc.lit01 > bc.volume_max AND bc.indica_driver = 2 AND bc.dinabomba = 2,0)
bc.atv31	If (bc.lit01 < bc.volume_min AND bc.indica_driver = 2 AND bc.dinabomba = 2,1)

Variáveis:

- bc.tesys - ligar ou desligar a bomba com acionamento Direto (1-ligado, 0-desligado)
- bc.ats48 - ligar ou desligar a bomba com acionamento a partir do *Soft-Start* (1-ligado, 0-desligado)
- bc.atv31 - ligar ou desligar a bomba com acionamento a partir do Inversor (1-ligado, 0-desligado)
- bc.lit01 - indica o volume no reservatório superior
- bc.seg_manauto - indica se será usado o religamento ou não (1-sim, 2-não)
- bc.volume_min - volume mínimo no reservatório
- bc.volume_max - volume máximo no reservatório
- bc.indica_driver - indica qual partida está sendo utilizada (1-*soft-start*, 2-inversor, 3-direta)
- bc.dinabomba - indica se está sendo usada a bomba ou o dinamômetro (1-dina, 2-bomba)

- Apêndice D -

LISTA DE MATERIAIS - BANCADA DA BOMBA CENTRÍFUGA			
Item	Descrição	Fabricante / Modelo	Quant.
1	Bomba centrífuga: compatível com motor de 1,5 cv, vazão mínima de 1 m ³ /h, dutos de entrada e saída de 1" BSP. A bomba é de mancal, permitindo o acoplamento de diferentes motores.	Schneider Motobombas MODELO: BC-92S HA	1
2	Transdutor de torque e rotação: 0-10 Nm; saída -10 a 10 V; classe de precisão 0,2; para medição de torque em máquinas rotativas; compatível com o Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado; sobrecarga 200%; torque de quebra 280%.	HBM T20WN/10NM	1
3	Reservatórios de água: construídos em acrílico transparente com parede de no mínimo 10 mm, em formato cilíndrico ou quadrado; capacidade para 100 litros. As entradas e saídas destes tanques são flangeadas e com rosca de ¾" BSP, com flange usinada em alumínio e anéis o'ring para a vedação. Todos os dutos de chegada e saída dos tanques são flexíveis de modo a preservar o acrílico contra esforços mecânicos e evitar rachaduras.	Acriresinas / sob encomenda / 100 litros	2
4	Válvula solenóide, duas vias, tipo diafragma, conexão rosca BSP, diâmetro 1", normalmente fechada, alimentação 24 Vcc, bobina classe F, TAG XV-02	AICAS / 521	1
5	Válvula solenóide, duas vias, tipo diafragma, conexão rosca BSP, diâmetro 3/4", normalmente aberta, alimentação 24 Vcc, bobina classe F, TAG XV-03	AICAS / 521	1
6	Válvula de controle, 2 vias, tipo globo, linear, diâmetro 3/4", conexão rosca BSP, normalmente aberta, atuador eletropneumático, alimentação 24 Vcc, sinal de controle 4 a 20 Ma, TAG FV-01	Foxwall / RC-WCB	1
7	Transmissor de Pressão diferencial, tipo capacitivo, com corpo de aço inox, Faixa de pressão: 0 – 750 mm H ₂ O, Alimentação: 24 VDC, Precisão: 0,5%, Proteção: IP 65, compatível com a tubulação, pressão e potência; com cabo de saída 2 metros; sinal de saída 4 a 20 mA, com indicação local digital, TAG LIT-01	Siemens	1
8	Transmissor de Pressão manométrico tipo capacitivo, com corpo de aço inox, Faixa de pressão: 0 – 10 bar, Alimentação: 24 VDC, Precisão: 0,5%, Proteção: IP 65, compatível com a tubulação, pressão e potência; com cabo de saída 2 metros; sinal de saída 4 a 20 mA, com indicação local digital, TAG PIT-01	Siemens	1
9	Transmissor de Pressão diferencial, tipo capacitivo, com corpo de aço inox, Faixa de pressão: 0 – 5000 mm H ₂ O, Alimentação: 24 VDC, Precisão: 0,5%, Proteção: IP 65, compatível com a tubulação, pressão e potência; com cabo de saída 2 metros; sinal de saída 4 a 20 mA, com indicação local digital TAG FIT-01	Siemens	1

10	Chave de nível tipo bóia magnética, instalação lateral, conexão rosca 1/2" NPT(M), corpo em polipropileno, diâmetro da bóia 18 mm, 1 contato SPST 10 Watts.	CONTEC / RFS	4
11	Fonte de alimentação: 24 V DC, chaveada com proteções, compatível com o sistema de controle, sensores e transdutores.	MCE Microtécnica / chaveada/ CH-24	1
12	Dinamômetro	Schooltech / DLB FF 1301	1
13	Placa de orifício, para tubulação de 3/4", material aço inox 316, vazão máxima de 0 a 5 m ³ /h, montada entre flanges com trecho reto e conexão rosca	Digitrol / TAG FE-01	1
14	Manifold para transmissor de pressão diferencial	Digitrol	1
15	Motor elétrico 1,5 cv indução, trifásico; 220/380 V; 4 pólos; 60 Hz; IP 55; convencional (<i>standard</i>) com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.	WEG	1
16	Motor elétrico 1,5 cv; indução, trifásico. 220/380 V; 4 pólos; 60 Hz; IP 55; alto rendimento, com sensores do tipo PT 100 instalados nas bobinas do estator e na carcaça.	WEG	1
17	CLP - CPU premium UNITY N1 ETH 96KB	Schneider / TSXP571634M	1
18	CLP - Módulo fonte alimentação TSX57 10	Schneider / TSXPSY2600M	1
19	CLP - <i>Rack standard</i>	Schneider / TSXRKY12	1
20	CLP - Placa 16 entrada digital 24Vcc com borneira	Schneider / TSXDEY16D2	1
21	CLP - Placa 16 saída digital a rele com borneira	Schneider / TSXDSY16R5	1
22	CLP - Placa 8 entrada analógica 0-10V/4-20MA	Schneider / TSXAEY800	1
23	CLP - Placa 8 saída analógica 0-10V/4-20MA	Schneider / TSXASY800	1
24	CLP - Placa entrada analógica multigama 16BI	Schneider / TSXAEY414	1
25	Inversor de Frequência: trifásico; para motor de 1,5 cv; 220 V; 60 Hz; comunicação via rede ModBus, entrada para <i>encoder</i> ; controle PID; entrada 0-10V analógica para controle de velocidade.	Schneider / Altivar 31 / ATV31HU11M3X A	1
26	Dispositivo de partida suave (<i>Soft- Starter</i>) trifásico; 220 V para motor de 1,5 cv comunicação via rede ModBus.	Schneider / Altistart / ATS48D17Q	1
27	Medidores de energia multifunção: Transdutor digital multifunção (V,I, W,VA, Var, Hz, cos fi, THD) trifásico; tensão; corrente; frequência; potências ativas, reativas e aparentes; fator de potência; THD% de tensão e corrente; demanda; energia ativa; energia reativa indutiva e capacitiva; medição True RMS; exatidão básica 0,5 %; comunicação RS232; protocolo MODBUS RTU.	Schneider / Power Meter Series 800 / PM850U	1
28	Dispositivo de partida direta para motores	Tesys / modelo U	1