



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO E AUTOMAÇÃO**

CASSANDRA NAIFF DO AMARAL

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

**MOSSORÓ – RN
2013**

CASSANDRA NAIFF DO AMARAL

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de
Comunicação e Automação, como requisito para
a obtenção do título de Mestre em Sistemas de
Comunicação e Automação.

Orientadora: Profa. Dra. Fabiana Karla de
Oliveira Martins Varella – UFERSA

Co-orientadora: Profa. Dra. Danielle Simone S.
Casillo - UFERSA

**MOSSORÓ – RN
2013**

O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência

A485a Amaral, Cassandra Naiff do

Análise de eficiência energética de um sistema de abastecimento de água de uma indústria cimenteira. / Cassandra Naiff do Amaral -- Mossoró, 2014.

154f.: il.

Orientadora: Prof^a. Dra. Fabiana Karla de O. M. Varella

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Ensino e Pós-Graduação.

1. Abastecimento de água. 2. Eficiência Energética. 3. Automação. 4. Indústria Cimenteira. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /497-14

CDD: 628.1

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba
CRB-15/452

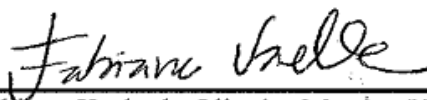
CASSANDRA NAIFF DO AMARAL

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de
Comunicação e Automação, como requisito para
a obtenção do título de Mestre em Sistemas de
Comunicação e Automação.

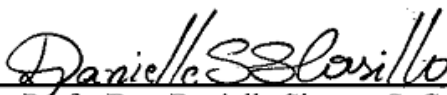
APROVADA EM: 20 / 11 / 13.

BANCA EXAMINADORA



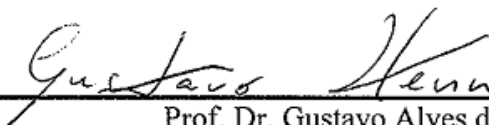
Profa. Dra. Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella – UFERSA

Presidente



Profa. Dra. Danielle Simone S. Casillo

Primeiro Membro



Prof. Dr. Gustavo Alves de Lima Henn

Segundo Membro



Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo

Terceiro Membro

Mossoró, 28 de novembro de 2013.

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, meus colegas de trabalho e a todos que combatem o desperdício da energia elétrica.

Agradecimentos

A DEUS, o Criador de tudo e de todos, que em sua infinita bondade permite-nos, humildemente, o estudo, o aprendizado e o descobrimento da ciência que rege as Leis do Universo.

Aquele que é o Caminho, a Verdade e a Vida, por todos os seus ensinamentos e exemplos, que são as bases da minha vida, me dão forças, motivação e a alegria de viver.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido, pela oportunidade de cursar o mestrado e todos os professores que fazem parte do programa, em especial ao Prof. Dr. Elmer R. L. Vilarreal, por todo o apoio durante o curso e as aulas ofertadas no turno da noite.

A Profa. Dra. Fabiana Karla de O. M. Varella, pela orientação e todo o exemplo de responsabilidade, comprometimento e amor ao que faz e a profissão que escolheu. Por todos os momentos que me motivou, ensinou, compreendeu e ajudou do início ao fim, não permitindo jamais que o cansaço e as dificuldades atrapalhassem os nossos objetivos.

A Profa. Dra. Danielle Simone S. Casillo, pela co-orientação, apoio, motivação, segurança e todas as experiências trocadas durante o desenvolvimento da dissertação.

A fábrica de cimento, meu ambiente de trabalho, minha segunda casa, por todo o aprendizado e realização profissional que me proporciona e a permissão para utilizar suas instalações como laboratório, fornecendo todo o material necessário para a pesquisa.

Ao Gerente Geral da fábrica, Dr. Aluizio Felix, pelo apoio e confiança que depositou em mim e no trabalho que propus desenvolver.

Ao Gestor da Manutenção, Dr. Adalberto Cesar, ao apoio e liberação para a realização da pesquisa, permitindo que uma parte do meu tempo de trabalho fosse direcionada a ela.

Ao Gestor de RH, Dr. Caldas Neto, pela confiança e apoio em todas as minhas solicitações voltadas para os estudos e desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao corporativo, pelo consentimento para que eu pudesse frequentar as aulas do mestrado e realizar o curso durante o horário do expediente. Em destaque ao Dr. Afonso Celso, pelo apoio e colaboração para a realização do trabalho.

A toda equipe de manutenção, qualidade, produção e áreas administrativas, nas pessoas dos engenheiros Dr. Sanderson, Dr. Isaías, Dr. André, Dr. Luiz Grillo e Dr. Carlos Mateus, por todo o apoio, respeito e atenção nas solicitações realizadas. Em especial ao Gestor Administrativo, Dr. Augusto Regis, que permitiu meu acesso à portaria da fábrica e toda sua equipe de vigilantes que foram meus companheiros dos finais de semana e das

madrugadas, por toda a atenção e os cuidados a mim dispensados e que foram fundamentais para a realização das medições necessárias.

Aos representantes das empresas *Rockwell Automation* e IFM, Sr. Leonardo Freitas e Sr. Eduardo Saboia, respectivamente, pelas orientações quanto ao material adequado para as aplicações do sistema.

A grande equipe de manutenção elétrica na qual tenho orgulho e satisfação de fazer parte; por todos os dias que podemos trocar experiências e aprendermos juntos. Em destaque, aos eletricitas Emerson, José Alberto, Jeferson, Ozeas, Albeci, Arimatérias, Eurico, Geovani, Ítalo, Fábio, Everton, Jean e Natan, pela participação que tiveram na instalação da parte física do trabalho e principalmente ao encarregado da elétrica, Josafa Moura, por ter disponibilizado a equipe quando necessário e por todo o apoio e ajuda na execução do projeto.

Em especial, ao eletricista Hallison Themis pelo imensurável apoio durante todo o trabalho, pelas ideias e sugestões inteligentes, pela paciência, pela excelência no trabalho, segurança, responsabilidade e por toda a supervisão e acompanhamento da montagem do sistema.

A equipe da instrumentação nas pessoas de Paulo e Laercio e em especial, ao encarregado da instrumentação, Rafael Moreira, por todo o ensinamento da parte lógica e automação, por estar sempre disponível para ajudar e conseguir resolver os problemas que apareceram, pelo aprendizado oferecido e por todas as ideias e sugestões realizadas.

Aos projetistas/desenhista Ewerton Filgueira e Talyane Cristina, pelo dom artístico e criativo na criação dos desenhos elétricos e *layouts* do sistema.

As minhas amigas, as Dras. Valesca Góis, Jussara Heronildes, Glauce Costa, Cacilda Alves, Maiara Ane e Luana Fernandes, pelo apoio de todas as horas, orientações, correções, sugestões e torcida para que tudo desse certo.

Aos meus amados pais, Odimara Naiff e Osmar Amaral, pela essência da vida, pelos valores éticos e morais, pela educação e amor que sempre me dedicaram, lembrando que foi devido as suas orientações e ensinamentos que conseguir alcançar o momento presente.

A minha amada irmã, Cacyane Naiff, e sua bela família, que mesmo na distância estão sempre presentes em minha vida, me apoiando, me protegendo e cuidando de mim.

Por fim, ao meu companheiro de todas as horas, meu esposo amado, Kieronny Sidney, por seu incondicional apoio principalmente na área da informática, sempre me proporcionando as melhores ferramentas de trabalho e ainda, por seu amor, carinho, cuidados, paciência e compreensão durante os dias de privação, ausência e postergação do planejamento familiar.

Epígrafe

“Se você acredita que pode, ou se acredita que não pode, você está certo.”

Henry Ford

RESUMO

O Brasil representa uma nação em desenvolvimento, onde seu crescimento econômico é diretamente proporcional ao consumo das diversas fontes de energia. Assim, a tendência é que a demanda por energia se torne maior que a oferta, gerando uma grande preocupação com a possível falta de energia. Diante dessa realidade, as políticas governamentais direcionam esforços para diversificar a matriz energética do país. No entanto, gerar mais energia não é suficiente: existe a necessidade de, além da diversificação das fontes de energia, economizar no uso e eliminar o desperdício. Dentro deste contexto, o setor industrial é considerado o de maior consumo de energia, onde a principal fonte consumida é a eletricidade. No caso específico da indústria cimenteira, a energia elétrica corresponde a segunda maior fonte de consumo e seu uso é praticamente todo destinado à força motriz, que por sua vez, apresenta alto potencial de eficiência energética. Assim, com o objetivo de analisar o desempenho energético de uma indústria de cimento através da eliminação do desperdício de energia elétrica, foram realizados estudos e identificados pontos de melhorias no Sistema de Abastecimento de Água de uma cimenteira com capacidade de 10 milhões de sacos de cimento por ano. Como parte da pesquisa e soluções de eficiência energética, foi implantado um novo projeto de automação, que proporcionou a realização de melhorias na operação, controle, supervisão e medições do sistema e suas respectivas grandezas elétricas. Essas melhorias foram possíveis, devido ao desenvolvimento e aplicação de lógicas de controle para o nível do reservatório de água geral e implantação de novas tecnologias e controle para o acionamento das bombas centrífugas. Os resultados comprovaram que o acionamento das bombas centrífugas através de inversores de frequência é mais eficiente que os acionamentos tipo partida direta e/ou *soft-start*. Quanto ao controle do nível do reservatório geral, ficou evidenciado que o Controle tipo Proporcional, Integral e Derivativo mantém o nível do reservatório geral constante e a operação da bomba em regime contínuo, sem aumentar o consumo de energia elétrica. Dessa forma, o mesmo tornou-se o mais indicado para obtenção de Eficiência Energética no Sistema de Abastecimento de Água da fábrica.

Palavras-Chave: Sistema de Abastecimento de Água, Eficiência Energética, Indústria Cimenteira, Automação.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais equipamentos e usos finais da energia envolvidos nas etapas de fabricação de cimento.....	36
Tabela 2 – Percentual de energia consumida e consumo específico de energia elétrica e térmica, nas etapas de fabricação do cimento.	37
Tabela 3 – Grandezas do motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo.	42
Tabela 4 – Interpretação da curva característica do desempenho dos motores de indução.	43
Tabela 5 – Relação entre as grandezas que determinam o desempenho de um motor de indução.	44
Tabela 6 – Características técnicas do poço de água da fábrica.....	58
Tabela 7 – Dados técnicos dos motores das bombas do SAA.	59
Tabela 8 – Relação das caixas d’água distribuídas pelas áreas administrativas.	60
Tabela 9 – Distribuição elétrica do painel D-20.	63
Tabela 10 – Medições realizadas nos motores das bombas do SAA.	74
Tabela 11 – Características técnicas do CLP <i>SLC500</i> [®] 5/05 (1747-L551).....	84
Tabela 12 – Dados de referência e observações quanto à instalação e capacidade dos blocos que constituem a arquitetura do <i>CLP500</i> [®] , utilizado na automação do SAA.	85
Tabela 13 – Descrição sucinta dos programas e subprogramas do Projeto AUT_SAA.	91
Tabela 14 – Valores das medições realizadas na bomba M30 com variação de nível e tipo de acionamento.	110
Tabela 15 - Valores das medições realizadas na bomba M26 com variação de nível e tipo de acionamento.	113
Tabela 16 - Valores das medições realizadas na bomba M22 com variação de nível e tipo de acionamento das bombas M26 e M30.....	115
Tabela 17 - Valores das medições realizadas nas bombas M30 e M26 com variação do tipo de acionamento e nível de controle da caixa geral constante em 100 a 90%.	117
Tabela 18 - Medições diárias com variação do tipo de controle da bomba M30.....	120
Tabela 19 - Medições de seis horas com variação de frequência da bomba M30	123
Tabela 20 - Medições da bomba M30 com controle PID e Nível durante os horários sazonais de ponta e fora ponta.	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação do PIB/OIE.....	26
Figura 2 – Oferta interna de energia no Brasil.	26
Figura 3 – Consumo final por fonte no Brasil.....	27
Figura 4 - Consumo final de energia por setor no Brasil, ano 2012.	30
Figura 5 – Participação dos setores de atividade industrial no consumo de energia, ano 2012.	30
Figura 6 - Estrutura do consumo de energia no setor industrial.....	31
Figura 7 – Consumo final de energia elétrica por setor econômico no Brasil, ano 2012.	31
Figura 8 – Consumo de eletricidade por setor de atividade industrial, ano 2012.	32
Figura 9 - Estrutura do consumo no setor cimenteiro.	34
Figura 10 – Consumo das fontes de energia no setor cimenteiro, ano 2012.....	35
Figura 11 – Curva Rendimento x Vazão da bomba.	40
Figura 12 – Curva característica do desempenho dos motores de indução.....	43
Figura 13 - Pirâmide de Automação	49
Figura 14 – (1) Mancal moinho de bolas, (2) Mancal dos rolos de apoio do forno rotativo, e (3) Redutor do acionamento do moinho de bolas.	57
Figura 15 – Tubulações de água de abastecimento e retorno dos bicos pulverizadores da torre de refrigeração do forno rotativo.....	57
Figura 16 – Bombas centrífugas do SAA.....	58
Figura 17 – (1) Caixa d’água geral, e (2) Tubulações de abastecimento de água para os processos.	60
Figura 18 – Válvulas de manobra do SAA.	61
Figura 19 – (1) Painel D20 do Sistema de Abastecimento de Água, e (2) Módulos de controle <i>LOGO</i> [®]	62
Figura 20 - Fluxograma geral da lógica de controle que estava em funcionamento no SAA..	64
Figura 21 – (1) fluxograma da condição prioritária 1, e em (2) fluxograma da condição prioritária 2.....	65
Figura 22 – Painel <i>Smart 2.2</i> para medição de energia elétrica das bombas M30, M26 e M22.	80
Figura 23 – Em (1) e (2) <i>Soft-Start Weg</i> e Inversor de Frequência <i>Danfoss</i> para a bomba M26, e em (3) e (4) <i>Soft-Start</i> e Inversor de Frequência, ambos <i>Danfoss</i> para bomba M30.	82

Figura 24 – Painel D20.1: Acionamento dos <i>drivers</i> eletrônicos.	82
Figura 25 – Painel de Controle do SAA.....	85
Figura 26 – Visão geral das instalações dos novos painéis e <i>drivers</i> do SAA.....	86
Figura 27 - Sensor de pressão submersível utilizado para a medição do nível de água da caixa geral.	87
Figura 28 – Desenho esquemático da instalação do sensor de pressão submersível, recomendado pelo fabricante IFM.	88
Figura 29 – Válvula eletropneumática para a manobra de abastecimento de água do poço para a caixa dos escritórios.	89
Figura 30 – Arquitetura da rede de automação do SAA.	89
Figura 31 – Equipamentos para a comunicação do sistema: (1) caixa de fusão da fibra ótica, (2) conversor de mídia <i>Ethernet</i> /Fibra Ótica, e (3) Layout do conjunto instalado no Painel de Controle do SAA.....	90
Figura 32 - Tela Principal do SAA.....	96
Figura 33 – Tela “Operação M26”. (1) Operação em automático com Inversor de Frequência; (2) Operação em manual-remoto com partida Direta, e (3) Operação em manual-local com partida <i>Soft-Start</i>	97
Figura 34 – Tela “Operação Bombas”.	97
Figura 35 – Tela “Controle Níveis Reservatórios”.	98
Figura 36 – Tela “Consumo Água”.....	98
Figura 37 – Tela Operação Válvula. (1) Operação em automático; (2) Operação em manual.....	99
Figura 38 – Tela “PID”.	99
Figura 39 – Tela “Gráfico Consumo Água”.....	100
Figura 40 - Tela “Gráfico Nível Reservatórios”.	101
Figura 41 – Tela “Medições Bomba M30”.	102
Figura 42 – Tela “Medições Variação Nível e Acionamento”.....	103
Figura 43 – Tela “Medição 6 horas”.	103
Figura 44 – Tela “Medições Variação Nível e Frequência”.	104
Figura 45 – Tela “Medições Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa D’Água Geral”.	104
Figura 46 – Tela “Resultados Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa D’água Geral”.	105
Figura 47 – Tela “Análises de Eficiência Energética”.	108
Figura 48 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 com variação de nível e tipo de acionamento.	112

Figura 49 - Consumo de energia elétrica da bomba M26 com variação de nível e tipo de acionamento.	114
Figura 50 - Consumo de energia elétrica da bomba M22 com variação do nível da caixa geral.	116
Figura 51 – Consumo médio diário de energia elétrica da bomba M30 com variação do tipo de acionamento.	118
Figura 52 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 para os tipos de controle digital, analógico e PID.	121
Figura 53 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 para os controles digital, analógico, PID, PID simulando o HZP, nível caixa geral entre 100% a 75%, e variação de frequência.	122
Figura 54 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 com variação de frequência.	124
Figura 55 – Consumo de energia elétrica com controle PID e Nível durante os horários sazonais de ponta e fora ponta.....	126
Figura 56 – Fator de Potência da bomba M30 durante o mês de agosto de 2013.....	127
Figura 57 – Valores médios do Fator de Potência para cada tipo de acionamento da Bomba M30.	128
Figura 58 - Gráfico de demanda da bomba M30 durante o mês de agosto de 2013.	128
Figura 59 - Gráfico do consumo ativo de energia elétrica da bomba M30 durante o mês de Agosto de 2013.....	129

NOMENCLATURA

Abreviações

CA - Corrente Alternada
CC - Corrente Contínua
CV - Variável de Controle
CVP – Coque Verde de Petróleo
EA – Entrada Analógica
ED – Entrada Digital
EE - Eficiência Energética
HZP – Horário Sazonal de Ponta
PV - Variável de Processo
SA – Saída Analógica
SAA - Sistema de Abastecimento de Água
SCI – Sistema de Combate ao Incêndio
SD – Saída Digital
SP - Set Point

Siglas

BEN - Balanço Energético Nacional
BEU - Balanço de Energia Útil
CCM - Centro de Comando de Motores
CIP – *Control and Information Protocol*
CLP - Controlador Lógico Programável
CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
FMI - Fundo Monetário Internacional
GESTAL – Gestão de Energia e Utilidades
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IHM - Interface Homem Máquina

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IP - *Internet Protocol*

ISO - *International Organization for Standardization*

MME - Ministério de Minas e Energia

OIE - Oferta Interna de Energia

PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem

PDE - Plano Decenal de Energia

PEE – Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica

P&ID – *Piping & Instrument Diagram*

PIB - Produto Interno Bruto

PID - Controlador Proporcional Integral Derivativo

PNE - Plano Nacional de Energia

PNE2030 – Plano Nacional de Energia 2030

PNEf – Plano Nacional de Eficiência Energética

PPGSCA - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia

PROESCO - Programa de Apoio a Projetos de Eficiência Energética

SAC – Sistema Automático de Controle

SGA – Sistema de Gestão Ambiental

SGE – Sistema de Gestão de Energia

SNIC - Sindicato Nacional da Indústria de Cimento

STP – *Shielded Twisted Pair*

TCP - *Transmission Control Protocol*

UAD - Unidade de Aquisição de Dados

UADC - Unidade de Aquisição de Dados e Controle

UCP - Unidade Central de Processamento

UD - Unidade Dedicada

UFERSA - Universidade Federal Rural do Semiárido

UTR - Unidade Terminal Remota

TC - Transformador de Corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	MOTIVAÇÃO	21
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E AUTOMAÇÃO.....	25
2.1	CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL.....	25
2.1.1	Eficiência energética no Brasil.....	28
2.1.2	Consumo de energia na indústria	29
2.2	SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	38
2.2.1	Eficiência do conjunto motor-bomba de Sistemas de Abastecimento de Água	39
2.2.2	Eficiência Energética dos Motores Trifásico de Indução	42
2.2.3	Eficiência energética no acionamento e controle eletrônico da força motriz: soft-start e inversor de frequência.....	44
2.3	ASPECTOS DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	48
2.3.1	Arquitetura da automação industrial.....	49
2.3.2	Controlador Lógico Programável	50
2.3.3	Sistemas Supervisórios	52
2.3.4	Automação do Gerenciamento de Energia Elétrica	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
3.1	DESCRIPTIVO FUNCIONAL DO SAA.....	56
3.2	CONTROLE AUTOMÁTICO DO SAA	61
3.2.1	Arquitetura do antigo controle do SAA	62
3.2.2	Antigo controle do SAA: Monitoramento, Proteção e Intertravamento.	64
3.2.3	Alarmes do antigo sistema de controle.....	65
3.3	FRAGILIDADES DO ANTIGO SISTEMA DE CONTROLE DO SAA	67
3.3.1	Falta de registro e controle do consumo de energia elétrica	68
3.3.2	Desperdício de energia elétrica e redução da vida útil dos motores.....	68
3.3.3	Controle seguro do nível de água dos reservatórios e controle do horário de funcionamento do sistema	70

3.3.4	Controle seguro do nível de água dos reservatórios e desperdício de água	72
3.3.5	Rendimento e fator de potência dos motores	74
3.3.6	Sistema automático com baixa eficiência	74
3.4	PROJETO DE AUTOMAÇÃO	76
3.4.1	Infraestrutura de Hardware instalado para a automação	78
3.4.2	Projeto do Programa Ladder do SAA	91
3.4.4	Projeto do Programa Supervisório	94
3.5	METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES	106
4	MEDIÇÕES VISANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	108
4.1	MEDIÇÕES COM VARIAÇÃO DE NÍVEL E TIPO DE PARTIDA	108
4.1.1	Resultados das medições com variação de nível e tipo de acionamento	109
4.2	MEDIÇÕES COM VARIAÇÃO DE CONTROLE E VAZÃO DA BOMBA M30 E TEMPO DE ENCHIMENTO/ESVAZIAMENTO DA CAIXA GERAL	118
4.2.1	Resultados das medições com variação de controle e vazão da bomba M30 e tempo de enchimento/esvaziamento do nível da caixa geral	119
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	130
5.1	CONCLUSÕES	130
5.1.1	Contribuições Técnico-Científicas	134
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136
	ANEXOS	140
	- Anexo A -	141
	APÊNDICES	142
	- Apêndice A -	143
	- Apêndice B -	146
	- Apêndice C -	149
	- Apêndice D -	150
	- Apêndice E -	151
	- Apêndice F -	152
	- Apêndice G -	153

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país em desenvolvimento que ocupa o lugar da sexta maior economia do mundo e segunda maior economia do continente americano (IBGE, 2012a). Esse contexto apresenta um país com alto potencial de consumo de energia, e assim, as políticas governamentais se direcionam para a diversificação da sua matriz energética, devido, principalmente, à tendência da demanda por energia ser maior que a oferta. Nessa direção, é possível identificar a necessidade não somente de gerar cada vez mais energia, mas também eliminar os desperdícios, buscando o máximo de desempenho com o mínimo de consumo (ELETROBRÁS, 2006).

Entre os setores que consomem mais energia no Brasil, o segmento industrial se destaca. Segundo os dados do Balanço Energético Nacional (BEN) contidos em EPE (2013, p. 28) tal setor é responsável por 35,1% do consumo total de energia no país. Nesse segmento, a eletricidade se enquadra como a principal fonte de energia, e entre as indústrias que mais consomem energia elétrica, a de cimento ocupa o 9º lugar (BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010).

Assim, com o objetivo principal de proporcionar um consumo eficiente de energia elétrica para a indústria cimenteira, e conseqüentemente para a matriz energética do país, escolheu-se um sistema em funcionamento, para realizar análises de desempenho visando à eficiência energética.

O sistema escolhido para análise foi o Sistema de Abastecimento de Água, indispensável para a refrigeração dos equipamentos de grande porte constituintes dos três principais processos produtivos da indústria de cimento, a saber, a moagem de cru, clinkerização¹ e moagem de cimento. Em caso de falha e/ou falta desse sistema, os processos produtivos são paralisados. O referido sistema não representa um processo produtivo e seu consumo de energia elétrica é pouco representativo, apenas 1% do consumo total de energia elétrica da fábrica. Porém, o sistema apresenta vários pontos de desperdício de energia elétrica que ao serem eliminados garantirão economia da referida energia para a empresa.

Outro ponto relevante do sistema em estudo é que algumas das situações onde existe desperdício de energia elétrica são repetidas em outras áreas produtivas da fábrica, onde inclusive, o consumo e o desperdício da energia elétrica são mais representativos. Dessa

¹ Clinkerização é a etapa do processo onde a farinha crua (mistura formada por calcário, minério de ferro e argila) é transformada em clínquer (principal componente do cimento) através da combustão da mesma dentro do forno rotativo.

forma, todas as conclusões e oportunidades de melhorias levantadas para o sistema em análise, poderão ser replicadas às outras áreas produtivas que apresentarem semelhantes fontes de desperdício e baixa eficiência energética.

Uma boa característica do Sistema de Abastecimento de Água é que o mesmo possui suprimento autônomo. Sendo assim, apresenta disponibilidade para a realização de paradas necessárias para a implementação das tecnologias de eficiência energética pleiteadas. Normalmente as áreas de maior consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, maior potencial de conservação de energia, apresentam a barreira da indisponibilidade de parada, dificultando a realização de simulações e análises que visam à eficiência energética.

Outro aspecto do SAA é que, além do desperdício de energia elétrica, o sistema também provoca desperdício de água. De acordo com Trojan e Kovalske (2005, p. 2), a água é entre todos os recursos naturais, o mais importante para o bem-estar da humanidade, o que significa que sua má aplicação é inaceitável. Entretanto, avaliou-se que o desperdício de água do sistema, ocorre dentre outros motivos, devido às falhas no controle do mesmo. Assim, a automatização do sistema objetivou melhorar a operação, o controle, a supervisão e as medições de consumo de energia elétrica e água. Dessa forma, pretendeu-se demonstrar que a automação pode ser uma ação de eficiência energética capaz de proporcionar o melhor desempenho para os processos, e assim, contribuir com a eliminação do desperdício e proporcionar o menor consumo das fontes de energia (combustíveis sólidos, eletricidade, água, entre outras).

Nesse ponto vale destacar que o Sistema de Abastecimento de Água da fábrica já apresentava um sistema de controle, porém esse sistema possuía pontos deficientes que proporcionavam perdas energéticas para a indústria. Assim, foi feito um estudo minucioso do funcionamento do sistema existente e identificado alguns pontos de melhorias. Para solucionar as fragilidades de controle e operação do sistema, foi desenvolvido e instalado um novo projeto de automação, eliminando situações como desperdício de água, falta de controle eficiente dos níveis dos reservatórios e operações pouco eficientes das bombas centrífugas.

Adicionalmente, através da instalação da automação, foi possível o desenvolvimento de lógicas de controle que proporcionaram a realização de medições horárias e diárias, cujos resultados foram os subsídios para as análises de eficiência energética e conclusões a respeito dos seguintes questionamentos: Quais os valores de nível máximo e mínimo mais eficientes para o controle da caixa d'água geral do sistema? Qual o tipo de acionamento mais eficiente para operação das bombas centrífugas? Qual o controle mais eficiente para a manutenção do nível dos reservatórios de água? Qual a vazão ótima para a bomba centrífuga da caixa d'água

geral e de que forma a variação de vazão influencia no consumo de energia elétrica? Como eliminar ou diminuir o consumo de energia elétrica durante o horário sazonal de ponta? e, por fim, o tipo de acionamento das bombas centrífugas interfere na qualidade de energia elétrica?

Em algumas pesquisas científicas, tais como as de Moreira (2008) e de Garcia (2003), foi comprovada que o acionamento de motores de bombas centrífugas através de inversores de frequência proporciona maior eficiência energética do que os acionamentos via *soft-start*. No presente trabalho, a veracidade desses resultados foi confirmada através da aplicação prática das referidas partidas eletrônicas no acionamento das bombas centrífugas do sistema de abastecimento de água em estudo. Além das análises de eficiência energética entre as partidas eletrônicas, foram também realizadas análises com a partida direta. Nessa última, também foi comprovado a maior eficiência energética para as partidas eletrônicas².

No trabalho de Moura (2010) foi apresentado que o uso do inversor de frequência para o controle da vazão d'água de bombas centrífugas somente era eficiente quando o consumo da água dos reservatórios tinha um comportamento variável. Porém, no SAA em estudo, que possui uma característica de consumo contínuo de água dos reservatórios, os resultados negaram essa afirmativa, e foi confirmada a eficiência energética na aplicação do inversor de frequência em sistemas com característica de consumo contínuo.

Além dessas contribuições científicas, neste trabalho foi comprovado que o consumo de energia elétrica do sistema não apresenta grandes variações quando se modifica o controle digital para o controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

Outros resultados, tanto de confirmação, como também de controvérsias científicas, poderiam ser verificados. Porém é importante destacar que a presente pesquisa foi delimitada para a realização de medições e análises restritas a aplicação de lógicas de controle e tecnologias voltadas para eficiência energética de bombas centrífugas. Assim as análises aqui apresentadas enquadraram, em um primeiro momento, as bombas centrífugas de abastecimento dos reservatórios da caixa d'água geral e bacia de refrigeração, e em um segundo momento, o comportamento somente da bomba centrífuga que abastece o reservatório da caixa d'água geral. Em acréscimo, a implantação da automação permitiu também a aplicação de ações de eficiência energética para o consumo de água.

² O acionamento das bombas centrífugas do Sistema de Abastecimento de Água em estudo, era tipo partida direta, desde sua concepção.

1.1 MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento dessa pesquisa teve três principais motivações. A primeira possui uma dimensão em nível de sociedade que pode ser considerada como uma motivação macro. A segunda é a motivação micro, com intuito de atender a uma empresa especificamente. Por fim, a terceira e principal é a aplicação técnica-científica, onde o grande objetivo é provar que as tecnologias utilizadas consistem em ferramentas fundamentais para o alcance da eficiência energética em todo e qualquer processo industrial.

A motivação macro tem a pretensão de contribuir para a sociedade, no intuito de diminuir o desperdício de energia elétrica e de água, e proporcionar o menor consumo das referidas fontes de energia através da aplicação de tecnologias que proporcionam eficiência energética.

A motivação micro está direcionada para a oportunidade de contribuir com a redução do consumo e custo com energia elétrica da indústria cenário do estudo, e que poderá ser replicada para os demais setores econômicos que possuam sistemas semelhantes.

E a terceira motivação, classificada como a motivação técnica-científica, consiste na comprovação que a aplicação de tecnologias tais como os acionamentos eletrônicos, sensores de nível analógicos e automação industrial são ferramentas que, além de proporcionarem benefícios para o processo, principalmente quanto à qualidade, controle e segurança, também admitem análises e aplicação de controles que proporcionam eficiência energética.

Além dessas principais motivações, existem outras importantes contribuições, tais como a implantação da Norma ISO 50.001/2011 que trata sobre Sistemas de Gestão de Energia (SGE) e possui o objetivo de incentivar as empresas investirem em Sistemas de Gerenciamento de Energia que obtenham maior eficiência energética; implantação da Norma ISO 14.001/2004 que trata sobre Sistemas de Gestão Ambiental (SGA), e também incentiva as empresas a investirem em Sistemas de Gerenciamento Ambiental, e, por fim, comprovar que os resultados dos testes científicos realizados em bancadas de laboratório, que simulam o desempenho de um Sistema de Abastecimento de Água real, são verdadeiros, e podem ser aplicados.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho se dividem em objetivo geral e específico.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de um Sistema de Abastecimento de Água de uma indústria cimenteira, através da aplicação de novas tecnologias, lógicas de controle, e automação, a fim de realizar comparações de consumo de energia elétrica e desempenho entre diferentes tipos de acionamentos para bombas centrífugas, modificações no tipo de controle do nível dos reservatórios de água, e ajustes na operação com inversores de frequência; visando maior eficiência energética para o sistema, entre outros benefícios.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar o Balanço Energético Nacional e entender o consumo das fontes de energia do país, destacando o consumo de energia elétrica no setor industrial e na indústria cimenteira;
- Identificar as necessidades de conservação de energia elétrica e aplicação de ações de eficiência energética na indústria cimenteira;
- Identificar no Sistema de Abastecimento de Água da indústria cimenteira em estudo as perdas energéticas, e levantar as oportunidades de melhorias;
- Desenvolver e aplicar um novo sistema automatizado para a operação, controle, supervisão e medições do Sistema de Abastecimento de Água da indústria cimenteira;
- Analisar os resultados de consumo de energia elétrica do Sistema de Abastecimento de Água devido à modificação no controle do nível do reservatório de água geral, substituindo o sensor digital existente, por sensor analógico de pressão submersível;

- Analisar os resultados de consumo e qualidade de energia da força motriz do Sistema de Abastecimento de Água com a aplicação de partidas eletrônicas em substituição das partidas diretas, e, definir qual dos tipos de acionamento resulta em maior eficiência energética;
- Definir quais as práticas de controle mais eficientes para a manutenção dos reservatórios de água e ciclo de operação das bombas do Sistema de Abastecimento de Água, através das comparações entre os controles digital, analógico e Proporcional, Integral e Derivativo e aplicação do inversor de frequência;
- Encontrar os valores ótimos de vazão da bomba centrífuga principal do sistema e definir o ciclo de operação do sistema durante o Horário Sazonal de Ponta, a fim de se obter a redução no consumo de energia elétrica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para atender os objetivos traçados para esta dissertação planejou-se a organização do trabalho em seis capítulos, que explanarão sobre o entendimento da situação econômica e social do país, das indústrias e especificamente da indústria cimenteira, o conhecimento da situação de eficiência energética do Sistema de Abastecimento de Água em funcionamento na fábrica cenário da pesquisa, os materiais e métodos implantados, e por fim as medições, análises e conclusões dos resultados obtidos.

No Capítulo 1 é apresentado o Sistema de Abastecimento de Água, objeto de estudo do trabalho, explanado sobre os estudos científicos existentes e os ainda não comprovados, demonstrado a importância do estudo para a sociedade, para a indústria e para o advento da automação contribuindo para as análises científicas pretendidas; os objetivos gerais e específicos, e a organização do trabalho.

No Capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica com o foco no cenário nacional de energia e detalhes sobre o consumo de energia elétrica no setor industrial e na indústria cimenteira; os planos governamentais para o alcance da eficiência energética; eficiência energética nos Sistemas de Abastecimento de Água; tecnologias utilizadas para obtenção de maior desempenho energético da força motriz, e sistemas de automação.

O Capítulo 3 é referente à descrição dos materiais e métodos utilizados para a realização das análises de eficiência energética do Sistema de Abastecimento de Água. Neste é detalhado o funcionamento do sistema e analisado suas fragilidades focando principalmente na falta de registro do consumo de energia elétrica, e no controle deficiente do sistema. Por fim, é apresentado o novo Projeto de Automação instalado e a metodologia aplicada para a realização das medições e análises do desempenho energético do sistema.

O Capítulo 4 é dedicado às medições realizadas no sistema, e principalmente as análises e discussões dos resultados obtidos após as variações nos controles e acionamentos das bombas centrífugas, controles de nível dos reservatórios de água e modificações no funcionamento do sistema utilizando o inversor de frequência. Serão apresentados os valores de consumo de energia e outras características elétricas que permitam a avaliação da qualidade da energia elétrica consumida e a eficiência energética do sistema.

E por último, o Capítulo 5 expõe as conclusões das análises de eficiência energética para o Sistema de Abastecimento de Água em estudo, e sugestões para trabalhos futuros.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E AUTOMAÇÃO

Este Capítulo visa apresentar a revisão da literatura, base do desenvolvimento dessa dissertação. O mesmo contempla as principais informações a respeito do consumo das fontes energéticas no Brasil e na indústria com foco especificamente no consumo de energia elétrica no setor cimenteiro. Os programas de eficiência energética praticados pelo governo e empresas comprometidas com a conservação de energia serão brevemente citados. Far-se-á uma concisa explanação sobre Sistemas de Abastecimento de Água e as principais práticas de conservação de energia aplicadas. Por fim, serão comentados alguns aspectos da automação industrial.

2.1 CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL

De acordo com Goldemberg e Villanueva (2003, p. 23), o consumo de energia de um país pode ser tratado como um indicador de desenvolvimento econômico, ou seja, quanto maior o poder econômico de uma nação, maior será o consumo de energia originado principalmente de aspirações e necessidades materiais capazes de proporcionar melhor qualidade de vida para a população.

Dentro desse contexto, destaca-se o Brasil como um país em desenvolvimento econômico e conseqüentemente em contínuo aumento do consumo de energia. Em 2011, o país foi classificado pelo Fundo Monetário Internacional (FMI) como a sexta maior economia do mundo, apresentando em 2010 um Produto Interno Bruto (PIB) de 2,04 trilhões de dólares. Essa realidade classificava o país como a segunda maior economia do continente americano, estando atrás apenas dos Estados Unidos (IBGE, 2010).

O banco de investimento *Goldman Sachs* considerou em 2012, que por volta do ano de 2050, a economia brasileira deverá tornar-se a quarta maior do mundo. Isso significa que o consumo de energia continuará aumentando (IBGE, 2011). Assim, para que o país permaneça em crescimento econômico, é necessário o acompanhamento da Oferta Interna de Energia (OIE), ou seja, é necessário ter energia para alcançar o desenvolvimento. A Figura 1 mostra a relação entre o PIB e a OIE, nos últimos 10 anos.

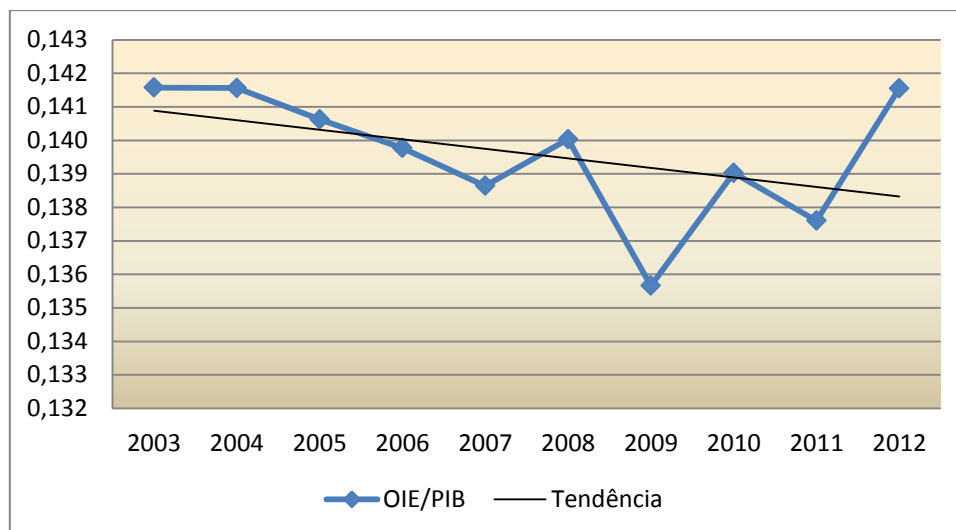


Figura 1 – Relação do PIB/OIE.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE (2013, p. 130).

Essa situação demonstra a necessidade de investir em esforços para aumentar a matriz energética do Brasil. Desde a crise de energia elétrica em 2001 ficou claro que a energia não é abundante e que a falta dela gera consequências danosas para a economia do país. Assim, é indispensável o planejamento em longo prazo da ampliação do parque gerador nacional.

O Brasil apresenta uma OIE bastante diversificada e esta vem crescendo ao longo dos últimos 42 anos. A Figura 2 demonstra a OIE e o seu crescimento, principalmente em relação às fontes de energia de petróleo, derivados da cana, hidráulica e eletricidade.

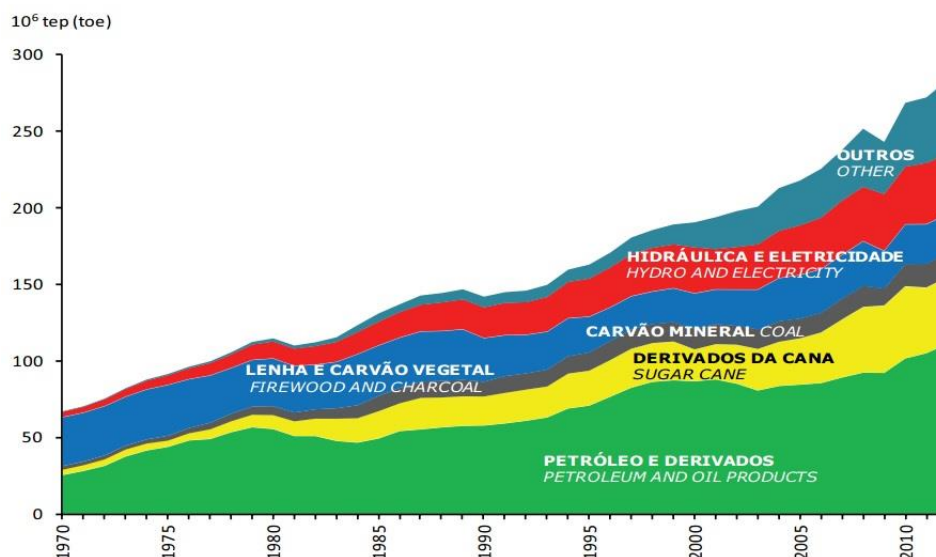


Figura 2 – Oferta interna de energia no Brasil.

Fonte: EPE (2013, p. 22).

Para essa oferta de energia, existe uma demanda de consumo, denominada de consumo final por fonte, apresentada na Figura 3.

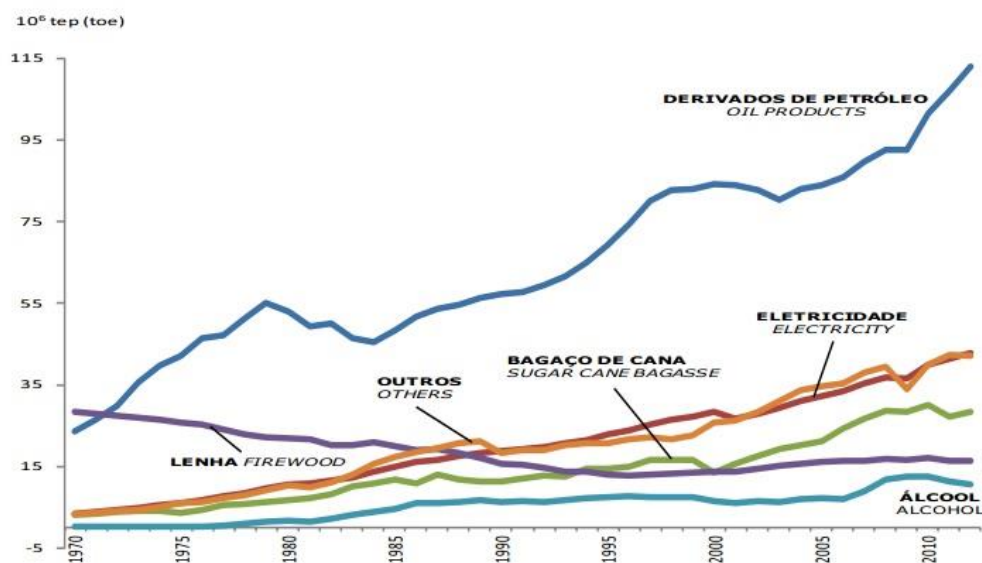


Figura 3 – Consumo final por fonte no Brasil.
Fonte: EPE (2013, p. 24).

De acordo com os dados apresentados nas Figura 2 e Figura 3, observa-se o crescimento da oferta de energia acompanhando o consumo final por fonte. Porém, é perceptível que o consumo cresce de forma mais acelerada que a oferta. Segundo as pesquisas desenvolvidas em Brasília (2010?), o consumo de energia no Brasil cresce ano após ano, e esse crescimento gera a preocupação quanto à possibilidade da falta de suprimentos dessa energia.

Como o Brasil se configura como um país em desenvolvimento, isto significa que a demanda por energia permanecerá crescente sendo dessa forma necessário não somente gerar cada vez mais energia, mas também, “[...] eliminar desperdícios, buscando o máximo de desempenho com o mínimo de consumo” (BRASÍLIA, 2010?).

Entende-se por eliminação do desperdício de energia a realização da conservação de energia e consequentemente promoção da Eficiência Energética (EE). Segundo o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), eficiência energética é o que se tem quando há um saldo positivo na divisão entre os resultados obtidos e os recursos empregados (BRASÍLIA, 2010). Assim, será alcançada a eficiência energética quando for possível atender às necessidades da sociedade, sem que seja necessário investir na construção de meios para gerar mais energia.

Diante dessa definição, verifica-se a necessidade do desenvolvimento de um sistema de energia sustentável capaz de suprir a demanda sem necessitar de maiores investimentos. O Brasil está caminhando para essa sustentabilidade, porém, para alcançá-la, é necessário a implantação, amadurecimento e aplicação de vários programas de eficiência energética que estão sendo aplicados nos principais setores de consumo de energia.

2.1.1 Eficiência energética no Brasil

De acordo com o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) apresentado pelo Ministério de Minas e Energia (2011, p. 23), a eficiência energética no Brasil surgiu com as crises do petróleo de 1973-74 e 1978-81. Estas trouxeram a percepção da escassez do recurso energético e forçaram a alta dos preços, abrindo espaço para ações voltadas à conservação e maior eficiência no uso dos seus derivados. Na mesma época, foi iniciada a busca para a diversificação da matriz energética visando garantir segurança para o atendimento da demanda de energia.

Está registrado no PNEf que com os vários movimentos em prol do meio ambiente, a eficiência energética serviu de instrumento para a mitigação de implicações decorrentes das emissões de gases de efeito estufa e destruidores da camada de ozônio. Diante desse cenário, houve a percepção que o aumento da EE constituía uma das formas mais econômicas e ambientalmente favoráveis de atendimento de partes dos requisitos da energia.

O Brasil possui, em mais de 20 anos, programas de EE reconhecidos internacionalmente, sendo os principais: o PROCEL, o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo (CONPET) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE).

Além desses programas, no ano 2000, foi promulgada a Lei nº 9.991, que regulamenta a obrigatoriedade de investimentos em programas de eficiência energética no uso final por parte das empresas distribuidoras de energia elétrica. Tal Lei fundou o Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (PEE) (MME, 2011 p. 24).

Antecedente ao PNEf foram estabelecidos, após a retomada do planejamento do setor de energia, o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE2030) e os Planos Decenais de Energia (PDE), estando em ambos a eficiência energética incorporada. Tanto o PNE2030 quanto os Planos Decenais de Energia foram elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e

são coordenados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estabelecendo metas de conservação de energia elétrica a serem alcançadas dentro dos futuros horizontes.

A eficiência energética consiste em:

Ações de diversas naturezas que culminam na redução da energia necessária para atender as demandas da sociedade por serviços de energia sob a forma de luz, calor/frio, acionamento, transportes e uso em processos. Objetiva, em síntese, atender às necessidades da economia com menor uso de energia primária e, portanto, menor impacto da natureza (MME, 2011, p. 21).

Todas as ações que tenham custos inferiores aos necessários para suprir a energia economizada, devem ser privilegiadas, incluindo assim as ações administrativas e organizacionais tais como, melhor organização, conservação e gestão energética por parte das entidades envolvidas. No caso do setor elétrico, projeta-se para 2030 a obtenção de 5% de redução da demanda do consumo devido ao progresso autônomo que se caracteriza pela iniciativa das próprias empresas. Baseado nesse percentual foi estabelecido uma meta também de 5% adicionais para os investimentos do governo, o chamado progresso induzido.

Espera-se que o PNEf indique os instrumentos de ação e de captação dos recursos e a legislação regulamentadora do assunto, para que seja possível um mercado sustentável de eficiência energética e, mobilize a sociedade brasileira no combate ao desperdício de energia, preservando principalmente os recursos naturais.

2.1.2 Consumo de energia na indústria

Em 2012, o setor industrial foi responsável pelo consumo final de 35,1% de energia e apresentou a segunda maior relação entre consumo final de energia e PIB, ficando a primeira maior relação para o setor energético. Essa classificação significa que a contribuição do setor para a economia justifica o elevado consumo de energia elétrica. A Figura 4 mostra a participação dos setores econômicos no consumo final de energia.

Vale ressaltar que para o ano de 2012 o consumo de energia de todos os setores da economia foi de $236.744 \times 10^3 \text{tep}^3$, e somente para o setor industrial, o consumo foi de $89.966 \times 10^3 \text{tep}$ (EPE, 2013, p. 37).

³tep: unidade que representa a quantidade de toneladas equivalente de petróleo.

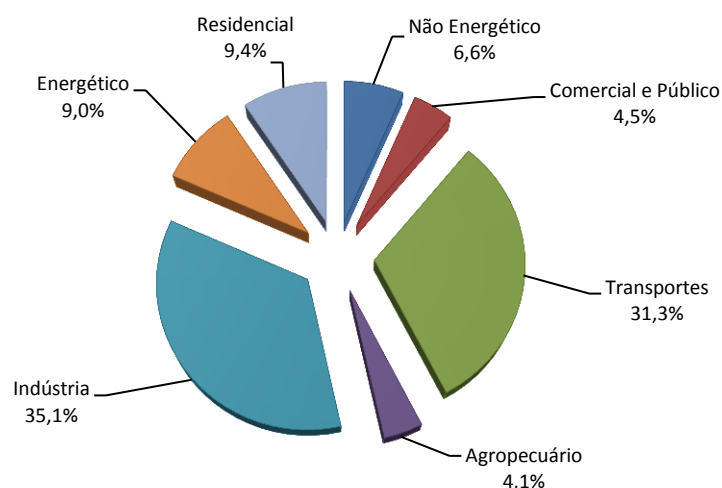


Figura 4 - Consumo final de energia por setor no Brasil, ano 2012.
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE (2013, p. 131).

A indústria brasileira é dividida em setores de atividades, conforme apresentado na Figura 5. No ano de 2012 as indústrias de alimentos e bebidas, ferro-gusa e aço, papel e celulose foram as maiores consumidoras de energia.

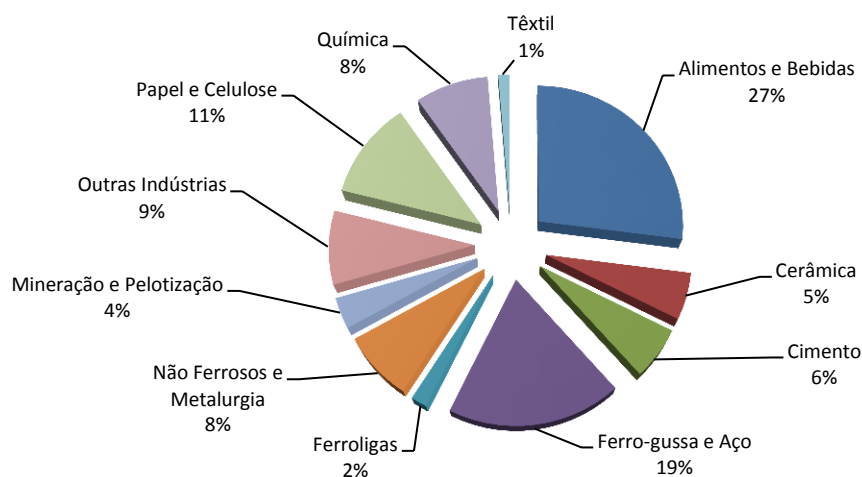


Figura 5 – Participação dos setores de atividade industrial no consumo de energia, ano 2012.
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE (2013, p. 131).

Quanto as fonte de energia utilizadas no setor industrial, a Figura 6 mostra o consumo percentual nos últimos 39 anos.

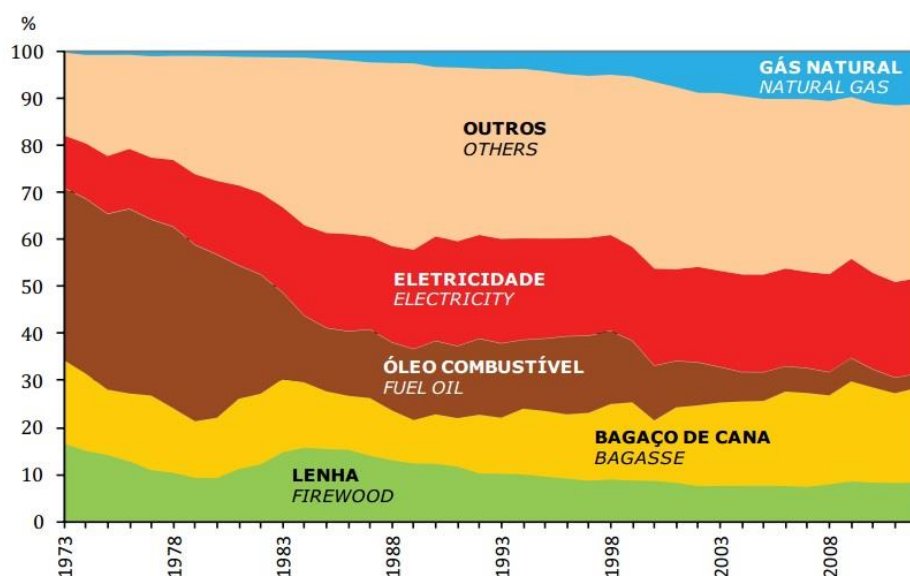


Figura 6 - Estrutura do consumo de energia no setor industrial.

Fonte: EPE (2013, p. 85).

O bagaço da cana e a eletricidade são as duas fontes energéticas principais no setor industrial, respondendo por mais de 40% de toda energia consumida na indústria. No entanto, dentro do contexto geral de energia, destaca-se a eletricidade como o energético de maior consumo, pois a mesma é difundida por todos os segmentos industriais, ao contrário do bagaço da cana que se concentra majoritariamente no setor de alimentos e bebidas (MME, 2011, p. 23). A Figura 7 mostra a distribuição de energia elétrica em todos os setores econômicos do país.

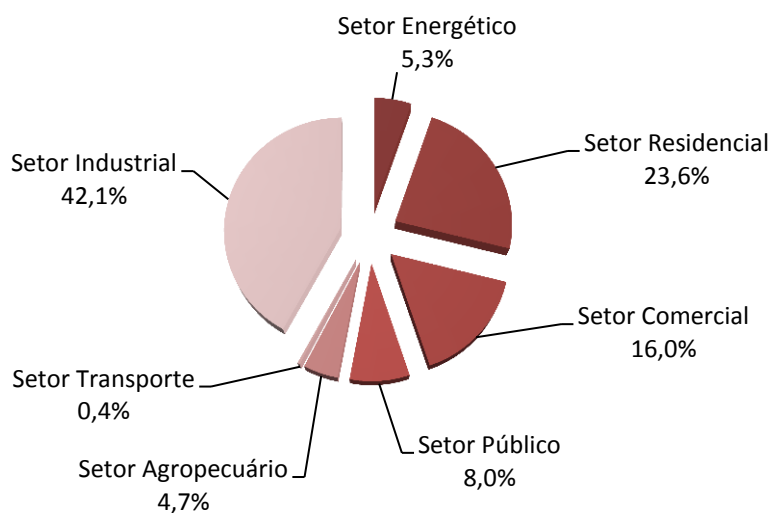


Figura 7 – Consumo final de energia elétrica por setor econômico no Brasil, ano 2012.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da EPE (2013, p. 67).

Quanto ao consumo de eletricidade por setor de atividade industrial, as indústrias que mais consomem energia elétrica são metalúrgica, alimentos e bebidas, e química. A indústria de cimento ocupa o 9º lugar no consumo da eletricidade conforme mostrado na Figura 8.

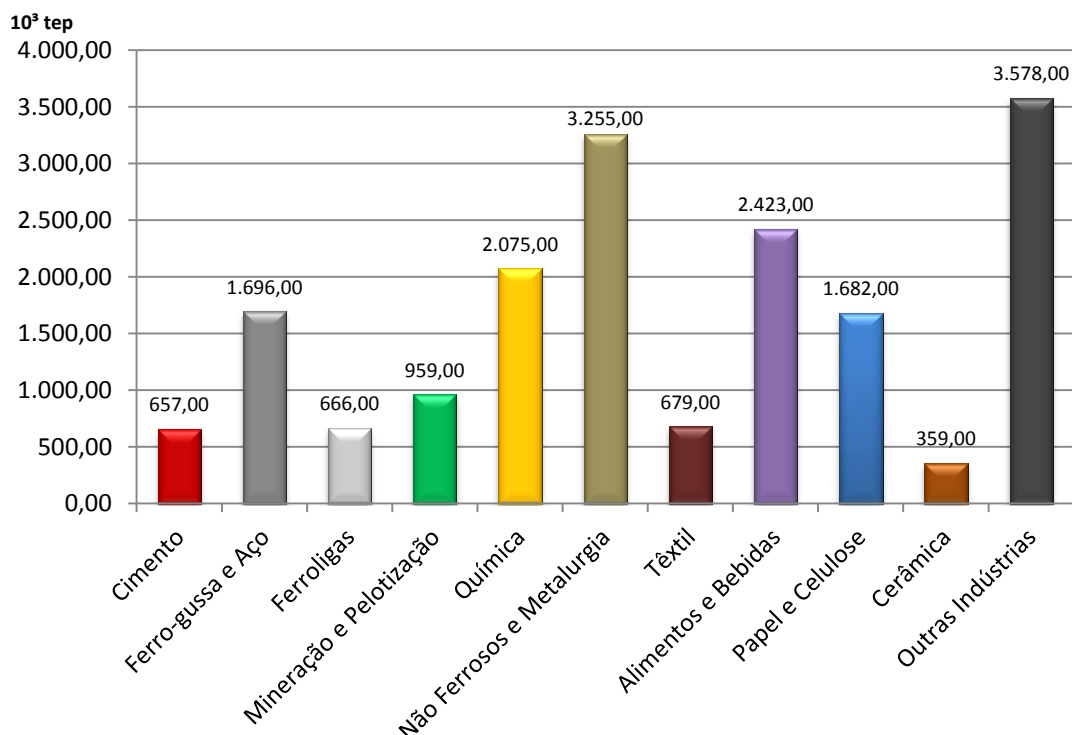


Figura 8 – Consumo de eletricidade por setor de atividade industrial, ano 2012.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do EPE (2013, p. 86).

Observado a considerável participação do setor industrial no consumo de energia elétrica, várias ações têm sido empregadas visando à promoção da eficiência energética na indústria. Dentre essas, destacam-se o PROCEL Indústria; Programa de Apoio a Projetos de Eficiência Energética (PROESCO); e os já citados PEE e CONPET.

O principal objetivo desses programas é alcançar a conservação de energia elétrica, com a finalidade de obter reduções de 5% a 10% no consumo de eletricidade durante um período em longo prazo. Para isso, é indispensável promover a conservação de energia elétrica através da racionalização da produção e consequentemente do consumo de energia elétrica; e da eliminação dos desperdícios. Afirma Moreira (2008, p. 6) que o aumento contínuo do consumo de energia elétrica deve-se ao aumento populacional e o aumento da produção industrial, e que para este consumo exige-se um planejamento antecipado e execução de políticas econômicas governamentais de forma que as mesmas possam suprir a tempo as necessidades de expansão da produção de energia elétrica.

Segundo as metas estabelecidas pelo PROCEL, caso seja mantida a estrutura atual de uso de energia elétrica, projeta-se uma necessidade de suprimento, para 2015, em torno de

780 TWh/ano. Atingindo os objetivos de redução dos desperdícios, estima-se uma conservação anual de até 130 TWh (MME, 2011).

Na seção 2.1.2.1 será tratado o consumo de energia especificamente na indústria de cimento, objeto de estudo, e as possibilidades de conservação de energia elétrica nesse setor de atividade.

2.1.2.1 CONSUMO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

Segundo Bajay, Gorla e Dorileo (2010, p. 32), em 2006 a indústria de cimento ocupou o oitavo lugar como consumidor de energia entre os segmentos industriais analisados, tendo sido responsável por 4% do consumo energético total da indústria brasileira. Atualmente, a indústria cimenteira conserva sua posição de oitava maior consumidora de energia no país, porém sua parcela de consumo diminuiu de 4 para 3,6%.

O SINDICADO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC) (2010, p. 52) apresentou dados de 2009 classificando o Brasil como o sétimo maior produtor e terceiro maior consumidor de cimento do mundo. Em 2012, a indústria de cimento consumiu 5.320.000 tep de energia necessária para produzir 68.224.000 toneladas de cimento (EPE, 2013, p. 135).

O processo de fabricação de cimento pode ser simplificado basicamente em três etapas: preparação do cru (britagem da matéria-prima com propósito de reduzi-la a diâmetros adequados para a moagem), clinquerização e moagem de cimento. A energia consumida para cada uma dessas etapas representa em torno de 20 a 40% do custo total da produção do cimento (IEA, 2007 apud BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010).

A Figura 9 mostra a evolução do consumo dos energéticos utilizados nas indústrias de cimento do país nos últimos 37 anos. Na referida figura se visualiza que na década de 70 o principal energético consumido na indústria de cimento era o óleo combustível, no entanto, por volta dos anos 80, devido ao “Programa Conserve”⁴ os representantes das indústrias de cimento e do Ministério da Indústria e Comércio assinaram um termo de compromisso, visando à substituição do óleo combustível pelo carvão mineral e carvão vegetal, porém a

⁴O Programa Conserve fundado em 1981 visa à promoção da conservação de energia na indústria, ao desenvolvimento de produtos e processos energeticamente mais eficientes, e ao estímulo da substituição de energéticos importados por fontes alternativas (MME, 2011).

parcela de mercado do óleo combustível voltou a aumentar, devido à participação dos dois tipos de carvão (MME, 2011).

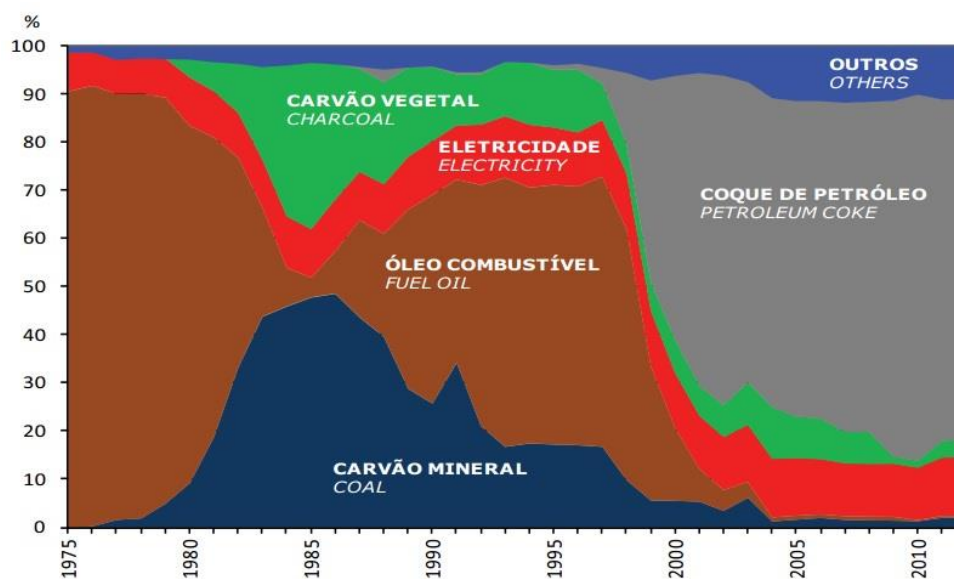


Figura 9 - Estrutura do consumo no setor cimenteiro.

Fonte: EPE (2013, p. 87).

Observa-se também na Figura 9 que na década atual tem ocorrido a substituição do óleo combustível pelo Coque Verde de Petróleo (CVP), que possui um custo bem menor em relação ao óleo combustível.

Outras fontes de energia vêm aumentando sua penetração na indústria cimenteira, principalmente fontes de resíduos. Como os fornos das indústrias cimenteiras trabalham com elevadas temperaturas, os mesmos permitem a condição de serem alimentados por vários tipos de combustíveis, principalmente resíduos dos mais diversos tipos, como por exemplo, pneus velhos (BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010).

Quanto ao consumo da energia elétrica, este não tem sofrido alterações significativas nos últimos nove anos, conforme visualizado na Figura 9. Entretanto, é importante ressaltar que a energia elétrica e o CVP correspondem às duas maiores fontes energéticas do setor cimenteiro (informação verbal)⁵.

Segundo dados da EPE (2013, p.135), em 2012, o consumo de energia elétrica da indústria de cimento foi de 7.634 GWh e o consumo específico foi de 0,112 MWh/t. A Figura 10 mostra a distribuição do consumo das fontes de energia da indústria de cimento no ano de 2012.

⁵ Informação adquirida em treinamento de trainee para fábrica de cimento em Recife, novembro de 2002

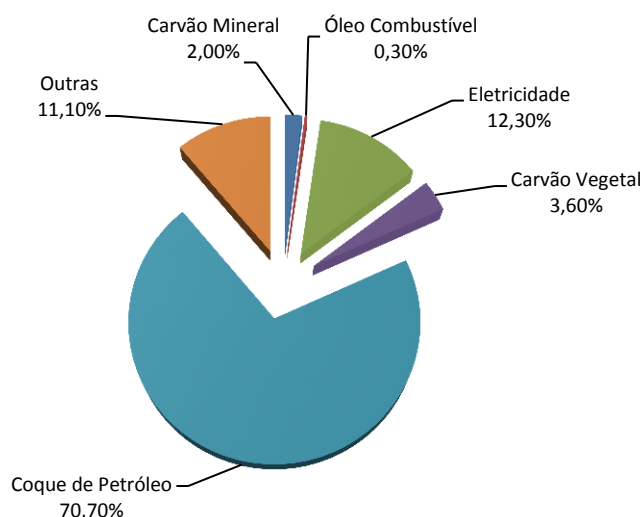


Figura 10 – Consumo das fontes de energia no setor cimenteiro, ano 2012.

Fonte: EPE (2013, p. 86).

No ano de 2006, foram contabilizados os percentuais por usos finais do consumo final de energia da indústria de cimento no Brasil, sendo o aquecimento direto considerado o principal uso, correspondendo à aproximadamente 80% do total, seguido pela força motriz, com 12,4% e o calor de processo, com 8,2%. Os outros usos finais como iluminação, refrigeração e demais usos foram muito insignificantes ou nulos (BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010).

Ainda de acordo com o Bajay, Gorla e Dorileo (2010, p. 35), as definições por usos finais de energia utilizadas no Balanço de Energia Útil (BEU), são:

- Força motriz: energia usada em motores estacionários ou de veículos de transporte individual ou coletivo, de carga, tratores, etc;
- Calor de processo, na forma de vapor gerado: energia usada em caldeiras e aquecedores de água ou circulação de fluídos térmicos;
- Aquecimento direto: energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e microondas;
- Iluminação: energia utilizada em iluminação interna e externa;
- Refrigeração: energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar condicionado, tanto de ciclo de compressão ou de absorção;
- Outros usos finais: energia utilizada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

É importante destacar que a energia útil apresenta altos níveis de perda, devido principalmente aos baixos rendimentos de conversão dos diversos combustíveis durante o aquecimento direto, uso final dominante na indústria cimenteira. Os principais equipamentos

e usos finais de energia envolvidos nas etapas de fabricação de cimento estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais equipamentos e usos finais da energia envolvidos nas etapas de fabricação de cimento.

Etapas de fabricação de cimento	Principais equipamentos	Usos finais da energia
Extração de matérias-primas	Britadores, perfuratrizes, locomotivas, caminhões, cintas transportadoras.	Força Motriz
Britagem, depósito de silos de calcário.	Britadores, extratores, cintas transportadoras, filtros de desempoeiramento.	Força Motriz
Britagem e depósitos de argila	Pontes rolantes, cintas transportadoras.	Força Motriz
Moagem e homogeneização do cru	Cintas transportadoras, secadores, moinhos, elevadores, separadores.	Aquecimento Direto; Força Motriz; Calor de Processo.
Alimentação do forno	Roscas, elevadores, bombas e ciclones.	Força Motriz
Forno rotativo	Aquecedores, ventiladores, queimadores, bombas e motores.	Aquecimento Direto, Força Motriz; Calor de Processo.
Britagem de gesso e moagem final	Britadores, cintas transportadoras, moinhos, separadores.	Força Motriz
Ensacamento e expedição	Sistemas pneumáticos, ensacadoras, caminhões e filtros.	Força Motriz

Fonte: Soares (1998) apud Bajay, Gorla e Dorileo (2010).

Observa-se na Tabela 1 que em todas as etapas do processo de fabricação de cimento a força motriz está presente. O uso da eletricidade é quase que em sua totalidade direcionada para a força motriz, o que significa que a eletricidade é uma fonte de energia indispensável para a fabricação de cimento e representa o segundo maior custo da indústria, sendo inferior somente aos custos direcionados para a obtenção do calor de processo e do aquecimento direto.

De acordo com Soares (1998) apud Bajay, Gorla e Dorileo (2010, p.41), a etapa que consome mais energia elétrica é a moagem de cimento, representando cerca de 40% do consumo de eletricidade em uma planta típica de cimento no Brasil, cujo processo é via seca⁶. O consumo específico de energia está diretamente relacionado com o tipo de cimento produzido e a quantidade em toneladas. A Tabela 2 apresenta os percentuais de energia

⁶ O cimento pode ser produzido através de dois processos: via úmida e via seca. No processo via seca, os materiais são introduzidos na forma de uma farinha, com um baixo teor de umidade, ao passo que na via úmida as matérias-primas são preparadas e homogeneizadas com água, formando uma espécie de lama, antes de serem aquecida no forno onde ocorrerá a clínquerização. A escolha do processo recai sobre as condições locais, a disponibilidade de matérias-primas, estrutura de custos, especificação do produto final e tipos de combustíveis utilizados, entre outros (BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010).

consumida em cada uma das três principais etapas de fabricação do cimento, e o consumo específico para a produção do cimento de forma geral.

Tabela 2 – Percentual de energia consumida e consumo específico de energia elétrica e térmica, nas etapas de fabricação do cimento.

Etapas do Processo	Percentual de energia consumida	Consumo Específico de Energia em 2006
Moagem de Cru	30% eletricidade 3% energia térmica	29,5 kWh/t de cimento 0,12 GJ/t de clínquer
Clinquerização	29% eletricidade 95% energia térmica	28,5 kWh/t de cimento 3,76 GJ/t de clínquer
Moagem de Cimento	40% eletricidade 0% energia térmica	39,3 kWh/t de cimento

Fonte: BAJAY, GORLA e DORILEO (2010, p. 41).

As etapas de clinquerização e moagem de cimento são as que possuem os maiores potenciais de conservação de energia na indústria cimenteira. O potencial de conservação de energia térmica do processo de clinquerização representa 94% do potencial do setor cimenteiro como um todo. Assim, identifica-se que as áreas que mais consomem energia são também as áreas que possuem maior potencial de conservação de energia (BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010, p. 53).

Diante desta realidade, a indústria de cimento visa otimização do uso energético, devido principalmente aos altos custos desse insumo no produto final, e também devido à forte contribuição que a mesma tem na emissão de gases do efeito estufa e na geração de resíduos. Através da atualização tecnológica com equipamentos mais eficientes e a automação das plantas, é possível alcançar a eficiência energética no processo.

Ainda segundo Bajay, Gorla e Dorileo (2010, p. 58), os ganhos de eficiência energética em energia térmica se darão pelo contínuo aperfeiçoamento do processo via seca, enquanto que os ganhos de eficiência energética em energia elétrica acontecerão especialmente no uso final da força motriz, tendo-se nos moinhos e motores a grande oportunidade de conservação de energia.

No processo, a tendência de redução do consumo específico de eletricidade deve-se a fatores como o aumento da automação (3% de economia), o uso de sistemas automáticos de empacotamento (25% menor), a utilização de britagem híbrida com moinhos de rolos e de bolas, maior número de moinhos verticais em operação (20% menor), o uso de silos de armazenamento mais modernos (redução de 50%), resfriadores de clínquer mais eficientes (15% de economia), o uso de separadores dinâmicos mais eficientes e o desenvolvimento de estudos sobre a moagem do clínquer baseado na microestrutura cristalina (BAJAY, GORLA e DORILEO, 2010).

Entretanto, apesar da identificação dos potenciais de eficiência energética na indústria de cimento, é importante destacar que existem algumas barreiras que dificultam a prática das

ações de eficiência, as três principais barreiras são a priorização de redução de emissões de gases de efeito estufa e melhoria da qualidade, devido principalmente às exigências ambientais; necessidade de paradas técnicas que implicam em perda de produção para a aplicação de medidas de eficiência energética em equipamentos principais; e condições de financiamento consideradas pouco vantajosas e com retorno em longo prazo.

2.2 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

De acordo com Trojan e Kovaleski (2005, p. 2) a água é entre todos os recursos naturais, o mais importante para o bem-estar da humanidade. Durante milênios, a água representou um recurso da natureza inteiramente livre e pelo qual os homens se serviram despreocupadamente. Entretanto, com o progresso a quantidade de água necessária para atender as múltiplas atividades urbanas e industriais cresceu significativamente, tornando o produto escasso.

Segundo Dutra (2005, p. 3), com a geração preponderantemente hidrelétrica no Brasil, pensava-se que a água era uma fonte inesgotável, porém, o tempo mostrou que esta afirmação não era verdadeira. A exploração predatória dos recursos naturais teve como resposta a incapacidade da natureza repor o que se consome. Atualmente, não somente no Brasil, mas no mundo, a preocupação com o controle da produção energética, com aumento de rendimentos e com formas alternativas de energia são preocupações constantes. Os investimentos de geração podem ser reduzidos e transferidos para as áreas da saúde, educação e outros setores sociais. Para as empresas, os investimentos em eficiência energética traduzem preços competitivos, maior produtividade, e em alguns setores econômicos, decidem a sobrevivência no mercado.

Para a maioria das indústrias a água é uma fonte energética indispensável para o processo. Por exemplo, na indústria do cimento, a água é fundamental para a refrigeração dos principais equipamentos dos processos produtivos, que em sua maioria são de grande porte e sua indisponibilidade representa altos custos financeiros para a empresa. A falta do abastecimento de água no processo implica diretamente na perda de produção. Assim, obter eficiência energética em Sistemas de Abastecimento de Água, referenciados nesta dissertação por SAA, não é uma preocupação exclusiva das empresas do setor de abastecimento de água,

onde em geral são empresas públicas, mas também envolve uma gama de empresas de outros setores econômicos dotadas de sistemas menores.

Moura (2010, p. 1) afirma que os programas de controle e redução das perdas de água em sistemas de abastecimento têm grande potencial para reduzir o consumo de eletricidade dos mesmos. Logo, é importante desenvolver programas que integrem o planejamento e a gestão dos recursos hídricos e energéticos das empresas. Tais programas devem usar como base duas premissas: economizar energia elétrica através da economia de água; e fazer uso eficiente de energia elétrica.

É importante destacar que no presente trabalho não será abordada as questões de economia e redução do desperdício de água, conforme citado pelos autores referenciados, o estudo aqui proposto está focado na economia e redução do consumo de energia elétrica no SAA em estudo.

Na seção 2.2.1 será abordado de forma simplificada os componentes de um Sistema de Abastecimento de Água e sua eficiência energética.

2.2.1 Eficiência do conjunto motor-bomba de Sistemas de Abastecimento de Água

Em Tsutiya (2005) apud Eleotero (2008), e Dutra (2005, p. 4) encontram-se algumas definições, objetivos e características de um Sistema de Abastecimento de Água e seus componentes.

Em Dutra (2005, p. 7) é definido o rendimento da bomba como a relação entre a potência mecânica fornecida a bomba pelo motor, e a potência hidráulica cedida ao fluido, dado pela Equação 1. A Figura 11 mostra a relação entre a vazão da bomba e o seu rendimento, onde é possível notar que existe um valor de rendimento máximo, pelo qual, a partir desse valor o aumento da vazão provoca a diminuição do rendimento. Isso significa que a partir do ponto de vazão ótimo a energia mecânica cedida à bomba é cada vez menos transformada em energia hidráulica e as perdas aumentam.

$$\eta \text{ (rendimento da bomba)} = \frac{P_h \text{ (Potência hidráulica)}}{P \text{ (Potência consumida)}} \quad (1)$$

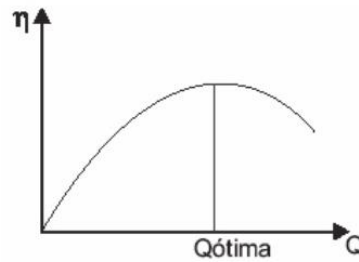


Figura 11 – Curva Rendimento x Vazão da bomba.
Fonte: Dutra (2005, p. 7)

A potência que a bomba entrega ao líquido é diferente da potência consumida por ela. Para se calcular a potência consumida, ou potência mecânica fornecida à bomba pelo motor, é necessário conhecer o rendimento da bomba. A Equação 2 permite o cálculo da potência consumida pela bomba, para as condições de vazão Q e altura manométrica H.

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{270 \cdot \eta} \quad (2)$$

Onde:

P – Potência consumida pela bomba em cv;

γ – Peso específico do líquido, em kgf/l;

Q – Vazão, em m³/h;

H – Altura manométrica, em m;

270 – fator de conversão.

Assim como há perdas na transformação da potência mecânica, fornecida a bomba pelo motor, em potência hidráulica, o motor elétrico também apresenta perdas na transformação da energia elétrica em mecânica. Assim, o rendimento total do conjunto motor-bomba deve ser determinado através dos rendimentos do motor e da bomba, dados pela Equação 3.

$$\eta_m \cdot \eta_b = \frac{P_m}{P_e} \cdot \frac{P_h}{P_m} = \frac{P_h}{P_e} \quad (3)$$

Onde:

P_m – Potência mecânica;

P_h – Potência hidráulica;

P_e – Potência elétrica;

η_m – Rendimento do motor;

η_b – Rendimento da bomba.

2.2.1.1 Leis de Similaridade

De acordo com ELETROBRAS (2005, p. 76), as leis de similaridade refletem a variação das características da bomba (vazão, altura manométrica e potência) quando outras grandezas variam (rotação, diâmetros do rotor, peso específico do líquido bombeado, viscosidade, entre outros). No entanto, tomando-se como base o foco dessa dissertação, é relevante identificar como as curvas características da bomba variam com a variação da rotação do motor. Sendo assim, segundo Moreira (2008, p. 23), para a variação da rotação tem-se a variação da vazão Q , mostrada na Equação 4, da altura manométrica H , apresentada na Equação 5, e da potência consumida P , em Equação 6.

$$Q = Q_1 \left(\frac{N}{N_1} \right) \quad (4)$$

$$H = H_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^2 \quad (5)$$

$$P = P_1 \left(\frac{N}{N_1} \right)^3 \quad (6)$$

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 altura manométrica (carga) e altura manométrica antiga, respectivamente (m);

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

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

Segundo Macintyre (2012, p. 42), a bomba é projetada para atender a um valor prefixado do número N de rotações, e com esse valor de N operará com valores de vazão e altura de elevação que proporcione um rendimento total máximo. Porém, quando se deseja que a bomba funcione com outros valores de vazão e altura de elevação uma das soluções é variar a rotação da bomba. Isso acontece, normalmente, em elevatórias de água ou de esgotos em que a descarga Q depende da hora e do dia da semana. A variação da rotação, normalmente pode ser feita utilizando inversores de frequência, que serão tratados na seção 2.2.3.2.

O uso do inversor permite uma maior precisão no controle da vazão, aliada a uma significativa economia de energia. O efeito da redução da velocidade do rotor da bomba é similar ao efeito da redução do diâmetro do impelidor, fazendo com que seja possível levar o equipamento ao seu melhor ponto de operação dentro de um grande intervalo de vazões (MACHADO, 2007, p. 6).

Porém, nessa solução de variação do número de rotações da bomba, deve-se atentar para que o rendimento do sistema não caia para valores abaixo dos aceitáveis. Na Equação 4 entende-se que a descarga Q variará proporcionalmente ao número de rotações N , permanecendo constante a área de seção de escoamento. No caso da Equação 5, verifica-se que em grandes variações de rotação N , o rendimento hidráulico H varia pouco. E por último, na Equação 6 é mostrado que a potência absorvida pelo motor que aciona a bomba varia com o cubo do número de rotações.

Modificando-se o número de rotação para um valor diferente daquele para o qual foi previsto no projeto, o rendimento do funcionamento da bomba diminuirá, assumindo um novo valor de rendimento, como mostra a Equação 7. Num projeto de eficiência energética para sistema de bombeamento é indispensável o cálculo do número de rotações para o rendimento máximo ($\eta_{\text{máx.}}$) chamado de número normal de rotação da bomba.

$$N = N_x \cdot \frac{\eta_x}{\eta} \quad (7)$$

2.2.2 Eficiência Energética dos Motores Trifásicos de Indução

Segundo Moreira (2008, p. 13) o motor trifásico de indução corresponde a 75% dos motores existentes no Brasil, e especificamente na indústria, devido à utilização de motores de maior porte, esse número é seguramente maior. Na operação do motor de indução existem diversas grandezas variando durante todo o tempo de funcionamento do mesmo. Essa variação ocorre de acordo com a carga solicitada no eixo do motor. No caso do presente trabalho, as de maior relevância para os estudos estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Grandezas do motor de indução trifásico rotor gaiola de esquilo.

Grandeza	Símbolo	Unidade	Descrição
Potência Mecânica	P_{mec}	cv	Potência fornecida no eixo do motor.
Potência Elétrica	P_{el}	kW	Potência fornecida ao motor.
Torque	T	Nm	Toque (conjugado) desenvolvido no eixo do motor.
Rotação	N	rpm	Rotação do eixo do motor.
Corrente	I	A	Corrente absorvida da rede elétrica pelo motor.
Tensão	E	V	Tensão da rede que alimenta o motor.
Fator de Potência	FP	1	Atraso da corrente em relação à tensão, medido pelo cosseno do ângulo de atraso.
Rendimento	η	1	Relação entre potência mecânica e potência elétrica.
Carregamento	γ	1	Relação entre a potência fornecida e a potência nominal do motor.

Fonte: Garcia (2003, p. 63).

Garcia (2003, p. 64) descreve duas situações limites que caracterizam o desempenho de um motor de indução: a carga nominal e a carga a vazio. A carga nominal é aquela calculada para o dimensionamento do motor, referente a 100% da carga, enquanto que a carga a vazio acontece com o motor desacoplado de qualquer carga, ou seja, 0% de carga. Nesse caso a corrente e a tensão apresentam valores mínimos enquanto a rotação assume o valor máximo, muito próximo do campo girante. Normalmente o motor funciona entre essas duas condições, podendo, eventualmente, funcionar acima da condição nominal, estando nesse caso em sobrecarga.

No catálogo do fabricante WEG (2003) apud Garcia (2005) é visualizada a curva característica de desempenho dos motores. Na Figura 12 pode ser identificada a variação típica de algumas grandezas do motor de indução em relação à carga no eixo.

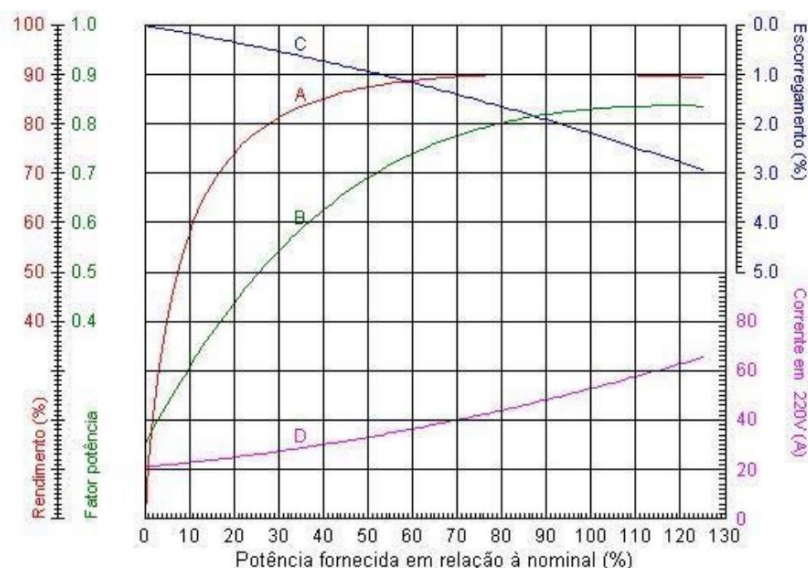


Figura 12 – Curva característica do desempenho dos motores de indução.

Fonte: Catálogo fabricante Weg (2003) apud Garcia (2005).

A Tabela 4 explica o significado de cada curva denominada de A, B, C e D, conforme apresenta a Figura 12.

Tabela 4 – Interpretação da curva característica do desempenho dos motores de indução.

Curva	Representação	Interpretação
A	Rendimento	Acima de 75% de carregamento assume um valor praticamente constante. Entretanto, cai rapidamente abaixo de 50%, o que indica ser completamente ineficiente usar um motor com baixa carga (ou sobredimensionado).
B	Fator de Potência	Como o rendimento, é bem baixo para cargas baixas.
C	Escorregamento	Representa a velocidade do rotor em relação ao campo girante, em termos percentuais. Praticamente zero a vazio, chega a um valor típico de 3% em carga nominal.
D	Corrente	Sai de um valor não nulo a vazio, crescendo com a carga.

Fonte: Elaboração própria, a partir de Garcia (2005).

A relação entre as grandezas diretamente relacionadas com o desempenho dos motores são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Relação entre as grandezas que determinam o desempenho de um motor de indução.

Relação entre as grandezas	Unidades
Rendimento $\eta = \frac{P_{mec} \cdot 0,736}{P_{el}}$	η = rendimento P_{mec} (cv) = potência mecânica P_{el} (kW) = potência elétrica
Potência Elétrica $P_{el} = E \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot FP$	P_{el} (kW) = potência elétrica; E (V) = tensão elétrica entre fases; I (A) = corrente elétrica; FP = fator de potência.
Carregamento $\gamma = \frac{P_{mec}}{P_{nom}}$	γ = carregamento; P_{mec} (cv) = potência mecânica P_{nom} (cv) = potência nominal

Fonte: Elaboração própria, a partir de Garcia (2005).

Outro fator que interfere diretamente no desempenho do motor são as perdas intrínsecas de sua construção e operação. O motor, por ser uma máquina que transforma energia elétrica em energia mecânica, sempre apresentará perdas durante essa conversão de energia. De acordo com Moreira (2008, p. 13), a potência de saída não é igual à de entrada devido às perdas internas do motor. Garcia (2003, p. 66) dividiu essas perdas em fixas (se não dependem do carregamento) e variáveis (perdas no ferro (núcleo), perdas mecânicas, perdas no estator, perdas no rotor e perdas suplementares).

Além dos fatores já mencionados, Campana et al (1999) apud Moreira (2008) acrescenta outros: dimensionamento incorreto, desequilíbrio entre fases e variação da tensão de alimentação. Garcia (2003, p. 68) também faz referência ao rebobinamento dos motores e a manutenção.

2.2.3 Eficiência energética no acionamento e controle eletrônico da força motriz: soft-start e inversor de frequência

De acordo com Moreira (2008, p. 19) os avanços na área de eletrônica de potência, tornou o acionamento eletrônico uma alternativa atrativa tanto para o acionamento como também para o controle de velocidade dos motores elétricos, devido principalmente, seu significativo potencial de conservação de energia. O acionamento eletrônico pode ser usado tanto como método de partida através das chaves de partida a estado sólido (*soft-start*) ou como métodos de controle de vazão, através dos inversores de frequência.

Um momento crítico no acionamento de um motor de indução é quanto a sua aceleração inicial. Com o escorregamento muito alto, a corrente do motor é muito alta, chegando entre 7 a 8 vezes a corrente nominal. Essa elevada corrente pode causar problemas tanto à rede de alimentação, provocando queda de tensão, quanto ao próprio motor (GARCIA, 2003). Essa situação pode ser resolvida através da aplicação dos acionamentos eletrônicos.

Outra ocorrência é quando a aplicação do motor requer o controle da velocidade. O inversor de frequência é o desenvolvimento da eletrônica de potência capaz de fornecer o acionamento de tensão, corrente e frequência variáveis, necessário para obter um desempenho de velocidade variável em máquinas de corrente alternada. O acionamento de motores elétricos de indução por meio de inversores de frequência fornece uma série de benefícios, comparados a outros métodos de variação de velocidade. Tais benefícios, porém, dependem de um dimensionamento adequado para que possam ser efetivamente vantajosos na comparação entre eficiência energética e custos. Dentre os muitos benefícios estão à redução de custos, o controle à distância, a versatilidade, o aumento de qualidade, de produtividade e a melhor utilização da energia (WEG, [entre 2006 a 2012]).

Moreira (2008, p. 19) afirma que além de garantir uma maior versatilidade os acionadores eletrônicos também são utilizados como forma de conservar energia elétrica. Como exemplo, cita o controle de vazão em processos de bombeamento. Os inversores de frequência substituem os controles tradicionais de forma mais eficiente, tais como válvula de controle, *by-pass*, sistema liga-desliga, entre outros. Nadel et al (2002) apud Santos (2005) afirma que estudos demonstram um potencial de economia de energia entre 15 a 30%, aplicável em 1/3 a 2/3 de ventiladores, bombas e equipamentos de ar condicionado, aquecimento e ventilação.

2.2.3.1 *Soft-Start*

As *soft-start* são chaves de partida estáticas constituídas de um circuito eletrônico acoplado a um microprocessador que controla um conjunto de tiristores responsáveis pelo ajuste da tensão aplicada aos terminais do motor. Através de ajustes acessíveis, permite o controle do torque do motor e a corrente de partida a valores desejados em função da exigência da carga. Dentre as suas principais características destaca-se a economia de energia elétrica (MAMEDE, 2012, p. 240).

Se o motor está operando em carga reduzida, consequentemente abaixo do fator de potência, a *soft-start* melhora o ponto operacional do motor minimizando as perdas de energia reativa, fornecendo apenas a energia ativa requerida pela carga. Isso caracteriza um procedimento de economia de energia elétrica. A função de limitação da corrente de partida é aplicada, com vantagens, em situações que o motor permanece funcionando sem carga (a vazio) por um longo período de tempo. Isso é feito mediante a redução da tensão fornecida nos terminais do motor durante o tempo em que o motor desenvolve a sua operação em carga reduzida ou sem carga. Ao reduzir a tensão, reduz-se a corrente a vazio e, consequentemente, as perdas no ferro, proporcionais ao quadrado da tensão (MAMEDE, 2012, p. 243).

Mamede (2012, p. 243) também afirma que dependendo do caso, pode-se obter uma economia de energia com carregamento inferior a 50% da potência nominal, considerando que o motor opere nas mesmas condições, porém sob tensão nominal. Em casos em que o motor opera em carga reduzida e por curtos períodos de tempo, a utilização do *soft-start* não apresenta nenhuma vantagem. Na prática, a função de otimização de energia só faz sentido se ativada quando a carga for menor que 50% da carga nominal durante um período de operação superior a 50% do tempo de funcionamento do motor. As aplicações mais indicadas para esta função são nos motores de serraria, esmeril, esteiras transportadoras de aeroportos e cargas similares.

2.2.3.2 Inversor de frequência

Inversores de frequência são equipamentos da eletrônica de potência usados para converter sistemas de corrente contínua (CC) em outros com frequência e tensão variáveis, que são requeridos para aplicações de motores. O sistema típico de um inversor de frequência consiste em três seções: a seção de entrada que retifica a tensão de corrente alternada (CA) fixa da rede em uma tensão ou CC; a seção intermediária que filtra a saída do retificador, produzindo corrente ou tensão relativamente constantes, dependendo do tipo de acionamento que está sendo considerado; e a seção de saída do inversor que converte a tensão ou CC em tensão ou CA com frequência e tensão variáveis na qual podem ser aplicadas aos terminais do motor (FITZGERALD, 2006).

Fitzgerald (2006) também afirma que para variar velocidade pode-se atuar em três parâmetros: número de pólos, escorregamento e frequência da tensão estacionária. A atuação no número de pólos caracteriza-se como uma variação discreta e sobredimensionamento da carcaça do motor, o escorregamento é uma aplicação de variação contínua, perdas rotóricas e

faixa de variação pequena, e a variação de velocidade por frequência da tensão estatórica se configura em uma variação do inversor de frequência.

No catálogo da WEG em Jaraguá do Sul (2012, p. 59) encontra-se que a melhor maneira de se variar a velocidade de um motor de indução é por meio da variação da frequência de alimentação. Os inversores de frequência transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade mecânica do motor.

A utilização do inversor de frequência possibilita controle contínuo da velocidade do motor, fornece torque constante em toda a sua faixa de rotação, inclusive em zero rpm, sem a necessidade de ventilação forçada em baixas frequências. Assim, acima da frequência base de operação caracteriza-se a região de enfraquecimento de campo, na qual o fluxo diminui, provocando redução de torque. Dessa forma, verifica-se que o torque fornecido pelo motor é constante até a frequência base de operação, decrescendo gradativamente nas frequências de operação acima desta (JARAGUÁ DO SUL, 2009).

No entanto, para que o motor possa trabalhar em uma faixa de velocidade, não basta variar a frequência de alimentação, deve-se variar também a amplitude da tensão de alimentação, de maneira proporcional à variação de frequência. Assim, o fluxo e, por conseguinte, o torque eletromagnético do motor, permanece constante enquanto o escorregamento é mantido. Dessa forma, basicamente a variação da relação tensão/frequência é linear até a frequência base (nominal) de operação do motor. Acima desta, a tensão, que é igual à nominal do motor, permanece constante e há apenas a variação da frequência estatórica (JARAGUÁ DO SUL, 2009).

Basicamente existem dois tipos de controle dos inversores eletrônicos: o escalar e o vetorial. Araújo (2003) apud Moreira (2008) explica que, quando há necessidade apenas de variação de rotação e partidas suaves, o inversor do tipo escalar (relação V/f) atende a aplicação, mas, quando o sistema requer um controle mais eficaz, faz-se necessário o uso do inversor tipo vetorial, visto que estes controlam a tensão (V) e a frequência (f) independentemente uma da outra, e não mais seguindo a relação V/f .

De forma geral, tanto os inversores do tipo escalar como vetorial, ajustam seus parâmetros de modo a manter o rendimento de um motor na condição nominal de carga ou próximo dela, o que significa que o inversor adapta-se conforme as solicitações da carga acionada pelo motor. Essa característica é fundamental para o alcance da eficiência energética do motor.

2.3 ASPECTOS DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Segundo Moraes e Castrucci (2001, p. 15) entende-se por automação qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano e que vise soluções rápidas e econômicas para atingir os complexos objetivos das indústrias e dos serviços, por exemplo, automação industrial.

A automação industrial e de serviços foi classificada por Moraes e Castrucci (2001, p. 22) como uma automação de complexidade média. Estas são de âmbito local e podem realizar-se com Controladores Lógicos Programáveis (CLP), isolados ou em redes. Como exemplo tem-se a automação de transportadores, células de fabricação, processos químicos, térmicos, gerenciadores de energia e de edifícios, e processos produtivos de indústrias.

Nesse conceito estão inclusos a automação do Sistema de Abastecimento de Água da indústria de cimento, objeto de estudo do presente trabalho, e os sistemas de automação aplicados por Moreira (2008) e Araújo (2008) para as simulações de eficiência energética em Sistemas de Bombeamento de Água e Sistemas Motrizes Industriais, respectivamente, e que foram modelos para a esta pesquisa.

Moraes e Castrucci (2001, p. 16) também afirmam que a automação na indústria decorre das necessidades de maiores níveis de qualidade de conformação e de flexibilidade, menores custos de trabalho, menores perdas materiais e menores custos de capital; além de maior controle das informações relativas ao processo, maior qualidade das informações e melhor planejamento e controle da produção.

De acordo com os resultados apresentados em Moreira (2008) e Araújo (2008) a automação também atende a nova necessidade das indústrias de controle do desperdício de energia e obtenção da eficiência energética das máquinas, equipamentos e processos.

Para atender esse contexto, a automação de média complexidade é aplicada, e o desenvolvimento desta necessita da implantação de sistemas interligados e assistidos por redes de comunicação, compreendendo sistemas supervisórios ou Interfaces Homem-Máquina (IHM), que irão auxiliar os operadores no exercício de supervisão e análise dos problemas que venham ocorrer.

Além do aspecto de operação e supervisão, destaca-se na automação uma ferramenta de gerenciamento de manutenção e consumo de energia. Através da automação dos sistemas é possível tomar ações preventivas e corretivas em máquinas e equipamentos a fim de mantê-

los em operação com máxima eficiência energética e eliminando os desperdícios de diferentes fontes de energia.

2.3.1 Arquitetura da automação industrial

Seguindo o modelo chamado por Moraes e Castrucci (2013, p. 13) de Pirâmide de Automação, são apresentados os diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial. Tais níveis traduzem as muitas funções realizadas por um sistema de automação industrial com nível de complexidade média.

Na Figura 13 pode ser visualizada a Pirâmide de Automação, onde na base estão os dispositivos de campo, atuando via inversores, conversores ou sistemas de partida suave sobre máquinas e motores e outros processos produtivos. No topo encontra-se a parte de gerenciamento corporativo, onde a característica marcante é a informatização do setor corporativo da empresa.

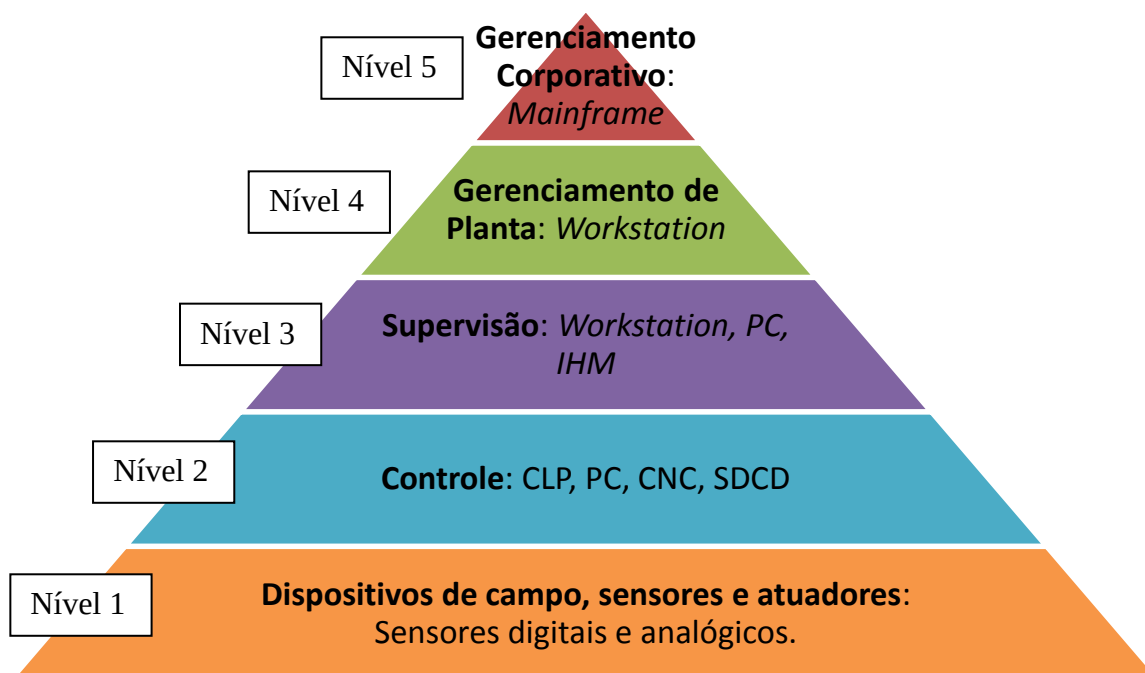


Figura 13 - Pirâmide de Automação.

Fonte: Elaboração própria, a partir de Moraes e Castrucci (2013, p. 13).

O Nível 1 mostrado na Figura 13, conforme já citado, é caracterizado pelo nível das máquinas, dispositivos e componentes da planta.

Logo acima do Nível 1 tem-se o nível dos equipamentos que executam o controle automático das atividades da planta, eles recebem e enviam os sinais de controle para do Nível 1 e para o Nível 3, respectivamente.

No Nível 3 está a supervisão do processo. Neste estão os bancos de dados com as informações dos índices de qualidade da produção, relatórios e estatísticas do processo, índices de produtividade, e etc. Encontram-se também no Nível 3, concentradores de informações sobre o Nível 1, e as Interfaces Homem-Máquina.

Destaca-se no Nível 3 a possibilidade de desenvolvimento de algoritmos de otimização da operação produtiva e etc. É nesse nível que pode ser implantado o Sistema de Controle Avançado onde utiliza-se várias ferramentas definidas segundo o desenvolvedor do sistema e as necessidades e complexidade do processo automatizado. Como exemplo das ferramentas de Controle Avançado, cita-se: *Lógica Fuzzy*, Inteligência Artificial, entre outras.

O Nível 4 é responsável pela programação e planejamento da produção realizando o controle e a logística dos suprimentos e no Nível 5 estão os responsáveis pela administração dos recursos da empresa, onde se encontram os softwares para gestão de vendas e gestão financeira. É no Nível 5 onde se realizam as decisões e o gerenciamento de todo o sistema.

A automação industrial desenvolvido para o SAA alcança até o nível 3 da pirâmide. Nas seções subsequentes serão apresentadas as ferramentas que compõem os níveis 2 e 3 da *Pirâmide de Automação*, empregados na automação do SAA.

2.3.2 Controlador Lógico Programável

Georgini (2012, p. 48) define CLP como um dispositivo de estado sólido, um computador industrial, capaz de armazenar instruções para implementação de funções de controle (sequência lógica, temporização, contagem), além de realizar operações lógicas e aritméticas, manipulação de dados e comunicação em rede, sendo utilizado no controle de Sistemas Automatizados.

Seu desenvolvimento aconteceu a partir da necessidade da indústria automobilística, com o objetivo de substituir os Painéis de Controle a Relés. O CLP se tornou um dos equipamentos mais utilizados na implementação de Sistemas Automatizados (GEORGINE, 2012). Segundo Moraes e Castrucci (2013, p. 23) o CLP é o elemento fundamental de realização física para uma automação de complexidade média.

Na década de 1970, os CLPs sofreram aprimoramento devido às inovações tecnológicas dos microprocessadores, maior flexibilidade e um grau maior de inteligência. Nos anos de 1980, os CLPs atingiram alto grau de integração, tanto no número de pontos como no tamanho físico, possibilitando o fornecimento de minis e micros CLPs. Atualmente, os CLPs apresentam as seguintes características:

- Módulos de I/O de alta densidade (grande número de pontos de I/O por módulo);
- Módulos remotos controlados por uma mesma CPU;
- Módulos inteligentes, como coprocessadores que permitem realização de tarefas complexas: controle PID, posicionamento de eixos, transmissão via rádio ou modem, leitura de códigos de barra;
- *Software* de programação em ambiente *Windows*[®] (facilidade de programação);
- Integração de Aplicativos *Windows*[®] (Access, Excel, Visual Basic) para comunicação com CLPs;
- Recursos de monitoramento da execução do programa, diagnósticos e detecção de falhas;
- Instruções avançadas que permitem operações complexas (ponto flutuante, funções trigonométricas);
- *Scan Time* (tempo de varredura) reduzido (maior velocidade de processamentos) devido à utilização de processadores dedicados;
- Processamento paralelo (sistemas de redundância), proporcionando confiabilidade na utilização em áreas de segurança;
- Pequenos e micros CLPs que oferecem recursos de *hardware* e de *software* dos CLPs maiores;
- Conexão dos CLPs em rede (conexão de diferentes CLPs na mesma rede, comunicação por meio de Rede Ethernet).

Além dessas, Moraes e Castrucci (2013, p. 23) acrescenta como características principais dos CLPs, as seguintes:

- Linguagem de programação de alto nível, caracterizando um sistema amigável com relação ao operador. Depois de concluído e depurado, o programa pode ser transferido para outros CLPs, garantindo confiabilidade na sua utilização;
- Simplificação nos quadros e painéis elétricos. Toda a fiação do comando fica resumida a um conjunto de entradas e saídas. Como consequência, qualquer alteração necessária torna-se mais rápida e de menor custo;

- Confiabilidade operacional. Uma vez que as alterações podem ser realizadas através do programa aplicativo, necessitando de praticamente nenhuma alteração da fiação elétrica, a possibilidade de haver erros é minimizada, garantindo sucesso nos desenvolvimentos ou melhorias a serem implantadas;

- Funções Avançadas e Comunicação em rede, já anteriormente citadas.

Em resumo, os CLPs substituíram os quadros elétricos com controle a relés e trouxeram uma série de vantagens que não existiam tais como: facilidade de programação, menor espaço de ocupação, menor preço, baixo consumo de energia elétrica entre outras (TREINAMENTO ROCKWELL AUTOMATION, 1998).

2.3.3 Sistemas Supervisórios

Os Sistemas Supervisórios são sistemas digitais de monitoração e operação da planta que gerenciam variáveis de processo. Estas são atualizadas continuamente e podem ser guardadas em bancos de dados locais ou remotos para fins de registro histórico (MORAES E CASTRUCCI, 2013, p.117).

Segundo Moraes e Castrucci (2001, p. 82) o supervisório somente recebe sinais vindos do CLP e do operador, e somente envia sinais para o CLP atuar nos equipamentos instalados na planta; em algumas arquiteturas o supervisório por si só não executa nenhuma ação, somente recebe os sinais e supervisiona. Em arquiteturas mais modernas, o supervisório possui o controlador programável incorporado, caracterizando um supervisório inteligente.

O supervisório normalmente está próximo à linha de produção instalada na estação de trabalho, traduzindo os sinais vindos do CLP para sinais gráficos, de fácil entendimento. Quem faz o controle da planta é o CLP, baseado na sua programação e nos comandos do operador.

O funcionamento do supervisório ocorre através da comunicação com o CLP que envia sinais para o supervisório através de tags, ou seja, mensagens digitais que levam informações quanto ao endereço dentro do CLP e o tipo de tag.

Os sistemas supervisórios apresentam dois modos distintos de operação:

- Modo de desenvolvimento: ambiente onde se criam as telas gráficas, isto é, onde se elabora um desenho que será animado no modo *RunTime*.

- *Modo Run Time*: ambiente onde se mostra a janela animada criada no modo de desenvolvimento e no qual se dará a operação integrada com o CLP, durante a automação da planta em tempo real.

Planejar um Sistema Supervisório requer o conhecimento profundo do processo e do *software* utilizado para o desenvolvimento da supervisão.

Moraes e Castrucci (2013, p. 135) recomendam nove etapas para o desenvolvimento dos sistemas supervisórios: entendimento do processo; variáveis do processo; planejamento da base de dados; planejamento de alarmes; planejamento da hierarquia de navegação entre telas; desenho de telas; gráficos de tendências; planejamento do sistema de segurança; e, padrão industrial de desenvolvimento.

2.3.4 Automação do Gerenciamento de Energia Elétrica

Focados na eficiência do uso das fontes de energia, os consumidores de energia buscam implantar em suas instalações Sistemas de Gerenciamento de Energia que proporcionem maior produção com menor custo, ou seja, otimização dos processos a fim de minimizar os custos com energéticos, mantendo ou aumentando a produção.

Segundo Mamede (2011, p. 549) a energia consumida numa indústria geralmente provém de fornecimentos externos, como energia elétrica, gás natural, carvão e outros, e de produções internas, como gases de alto-forno, ar comprimido e etc. Dessa forma, o preço e/ou custos das diferentes formas de energia consumidas pela indústria pode variar pela quantidade, pelo período do ano (uso sazonal) e pela hora do dia durante a qual se consome essa energia (horários sazonais de ponta e fora de ponta).

Assim, o uso racional dessas diferentes formas de energia poderá resultar numa redução do custo operacional da indústria. Mamede (2011, p. 549) afirma que essa eficiência no uso de energia elétrica, requer o uso de ferramentas de supervisão e controle que podem ser otimizados com o emprego de sistemas informatizados.

Existem no mercado diversas soluções para o gerenciamento de energia tanto para prédios residenciais, comerciais e industriais. Para as instalações industriais, a complexidade desses sistemas é função dos requisitos do processo, da quantidade de fontes energéticas consideradas e da natureza tecnológica dos equipamentos de produção.

A indústria cimenteira, cenário do estudo, optou pela implantação de um Sistema de Gerenciamento de Energia Elétrica e Utilidades, desenvolvido pela empresa de Gestão de Energia e Utilidades Ltda (GESTAL)⁷, denominado de *Smart Energy* e que se encontra em operação na planta desde 2003.

De acordo com São Paulo (2003, p. 7) o *Smart Energy* compreende todas as funções de medição, controle e gerenciamento das grandezas diretamente ligadas ao faturamento de energia elétrica da empresa. O mesmo envolve além da medição geral de energia (entrada do medidor de faturamento), outras medições setoriais de forma a serem monitorados e controlados separadamente cada um dos pontos da instalação, como por exemplo, para rateio de centros de custos.

O objetivo principal do *Smart Energy* é otimizar o insumo de energia elétrica através da diminuição dos valores contratados de demanda, consumo e manutenção do fator de potência acima do mínimo exigido pela legislação, sem prejuízo da produção.

Além disso, com o *Smart Energy* realiza-se a supervisão e o controle de toda a infraestrutura das instalações elétricas da fábrica através de uma interface homogênea e de fácil integração com os processos. Dessa forma, os usuários do Sistema são munidos de informações precisas para promover a racionalização e a conservação de energia elétrica e podem manter a instalação funcionando sob pontos ótimos⁸ operacionais, sendo estes, demanda, fator de potência, consumo e outras grandezas envolvidas (SÃO PAULO, 2003).

Diante dessas ferramentas, para o presente trabalho, optou-se em utilizar o *Smart Energy* para a realização das análises energéticas dos controles desenvolvidos para o SAA. Dessa feita, as medições de demanda, consumo, fator de potência e fator de carga, das bombas centrífugas e submersas que compõem o Sistema de Abastecimento de Água da fábrica foram computadas pelo *Smart Energy* através do *software Smart 32*⁹.

Em resumo, o sistema de energia elétrica é composto de Unidades de Controle *SMART I/O* e Unidades de Gerenciamento *SMART 32* integradas via rede RS-485 *Modbus* e *Ethernet*. A Unidade de Controle *SMART I/O* é responsável pelas funções de monitoração, aquisição de dados e controle, enquanto que a Unidade de Gerenciamento *SMART 32* é responsável pela

⁷ A GESTAL é uma empresa 100% brasileira fundada desde 1997 cuja missão é fornecer soluções inteligentes no segmento de Gerenciamento e Controle de Energia Elétrica e Utilidades através de suas linhas de produtos e serviços, possibilitando a redução dos custos e do impacto ambiental com foco nos objetivos de cada cliente, identificando as oportunidades de economia e da melhoria contínua na utilização racional dos recursos disponíveis em seus clientes (GESTAL, 2013).

⁸ Entende-se por pontos ótimos operacionais aqueles sob as quais é possível atingir o máximo de economia com o máximo de produção sob-restrições de contrato.

⁹ Vale destacar que qualquer outro *software* de supervisão no mercado pode ser utilizado para análise dos dados em formato *Access*.

configuração, supervisão e gerenciamento do processo. No ANEXO A encontra-se a arquitetura do *Smart Energy* implantado na fábrica.

No capítulo 3 será apresentado como foi inserido na rede do sistema *Smart Energy* as medições de energia elétrica das bombas do SAA, para uso nas análises de Eficiência Energética que constituem esse trabalho.

Na seção 2.3.4.1 será apresentado com brevidade os Protocolo *ModBus* de comunicação do *Smart Energy* e o Protocolo *Ethernet* de comunicação da rede de automação.

2.3.4.1 Protocolos *ModBus* e *Ethernet*

Moraes e Castrucci (2013, p. 169) explicam que o protocolo *ModBus* pode utilizar vários tipos de meios físicos, entre os quais o mais utilizado é o RS-485 a dois fios. A comunicação RS-232 é utilizada somente para comunicação ponto-a-ponto. A tecnologia de comunicação no protocolo *ModBus* é o mestre-escravo, sendo que somente um mestre e no máximo 247 escravos podem ser conectados à rede. Cada escravo pode ter um número variado de entradas e saídas.

Quanto ao modo de transmissão, existem duas formas seriais para o protocolo *ModBus*: RTU e ASCII. O modo de transmissão definido deve ser o mesmo para todos os dispositivos.

A *Ethernet/IP* é um protocolo aberto que foi desenvolvido baseado em padrão europeu que especifica várias características, dentre elas, destaca-se: a utilização de protocolo CSMA/CD para acesso ao meio; protocolo Ethernet TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) e protocolo CIP (*Control and Information Protocol*), que possibilita mensagens em tempo real e informação ponto-a-ponto.

No Capítulo 3 será apresentado o descritivo funcional do SAA em estudo e suas fragilidades de controle e consumo de água e energia elétrica. Serão apresentados os materiais instalados e os métodos aplicados para o desenvolvimento do novo Sistema de Automação Industrial implantado assim como as medições que foram realizadas a fim de definir o sistema de controle e operação mais eficiente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como já tratado no Capítulo 2 o Sistema de Abastecimento de Água da indústria cimenteira é fundamental para a operação dos equipamentos de médio e grande porte dos principais processos produtivos e, assim como as empresas de saneamento básico, a indústria possui a mesma preocupação com o uso eficiente de água e energia elétrica. Dentro desse contexto, o presente capítulo irá apresentar os materiais e a metodologia utilizados para a avaliação do controle e operação do SAA visando à eficiência energética.

O capítulo em questão segue a sequência lógica de como o trabalho foi desenvolvido. Desta forma, primeiramente será realizada a descrição do funcionamento do sistema, em seguida será feita a apresentação do controle automático que existia na indústria, bem como suas fragilidades, e a partir de então será apresentado o planejamento e desenvolvimento do novo projeto de automação. Por último, será demonstrada a metodologia das medições utilizadas na análise do desempenho energético do sistema.

3.1 DESCRITIVO FUNCIONAL DO SAA

O Sistema de Abastecimento de Água da fábrica de cimento em estudo apresenta como principal função a refrigeração dos equipamentos de grande porte que, devido ao atrito, sofrem com elevação da temperatura. Assim, por causa do aquecimento, tais equipamentos necessitam trocar calor com a água, a fim de manter a temperatura em níveis aceitáveis para sua perfeita operação.

Em algumas aplicações a água entra diretamente em contato com o equipamento, dessa forma o monitoramento da qualidade dessa água é importante, pois dependendo da sua dureza e outras características físico-químicas, a mesma poderá causar desgastes na estrutura dos equipamentos com a qual entra em contato. Os equipamentos que precisam da circulação da água para funcionarem são os mancais dos moinhos de bolas, mancais dos rolos de apoio do forno rotativo, mancais dos compressores da homogeneização, e redutores dos moinhos de bolas. A Figura 14 mostra alguns dos equipamentos que o SAA refrigera.



Figura 14 – (1) Mancal moinho de bolas, (2) Mancal dos rolos de apoio do forno rotativo, e (3) Redutor do acionamento do moinho de bolas.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Além da refrigeração dos equipamentos citados, a água também é aplicada diretamente no processo produtivo através da torre de refrigeração, que é o equipamento responsável pela refrigeração dos gases quentes provenientes do forno rotativo em direção ao filtro eletrostático. No filtro eletrostático os gases quentes vindos do forno são filtrados e as partículas sólidas retornam para o processo, enquanto os gases limpos são emanados para o meio ambiente. A Figura 15 mostra as tubulações de água que abastecem os bicos de pulverização d'água da torre de refrigeração. Por último, tem-se a aplicação da água para fins de saneamento básico das instalações sanitárias, água potável, sistema de combate a incêndio e manutenção e conservação da cerca viva do parque fabril.



Figura 15 – Tubulações de água de abastecimento e retorno dos bicos pulverizadores da torre de refrigeração do forno rotativo.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Toda a água utilizada é proveniente de um poço submerso denominado de poço d'água P-35 que, segundo o relatório de recuperação do poço de água da fábrica apresentado em Mossoró (1989, p. 1), o mesmo foi perfurado em 1970 pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, e em 1989 foi recuperado pela empresa Halliburton, que o entregou com 909,55m de profundidade e com as características técnicas apresentadas na Tabela 6. Tais características foram coletadas após o teste de vazão realizado com a bomba submersa instalada a 80m de profundidade.

Tabela 6 – Características técnicas do poço de água da fábrica

Característica Técnica	Valor
Vazão	42,35 m³/h
Nível Estático	23,8 m
Nível Dinâmico	65,2 m
Rebaixamento	41,40 m
Vazão Específica	1,02 m³/h

Fonte: Mossoró, 1989.

A água é bombeada do poço para o reservatório de água (cisterna) através de uma bomba submersa. A cisterna possui capacidade de 196.000 litros de água. Através de uma bomba centrífuga a água é deslocada da cisterna para a bacia de refrigeração, onde é realizado o tratamento, o controle e a refrigeração. A capacidade da bacia de refrigeração é de 200.000 litros. Após o tratamento da água e com seus parâmetros de controle analisados no laboratório da fábrica, a mesma é disponibilizada para o processo através de uma bomba centrífuga que abastece a caixa d'água geral com capacidade de 314.000 litros. A Figura 16 mostra as bombas centrífugas do Sistema de Abastecimento da Água.

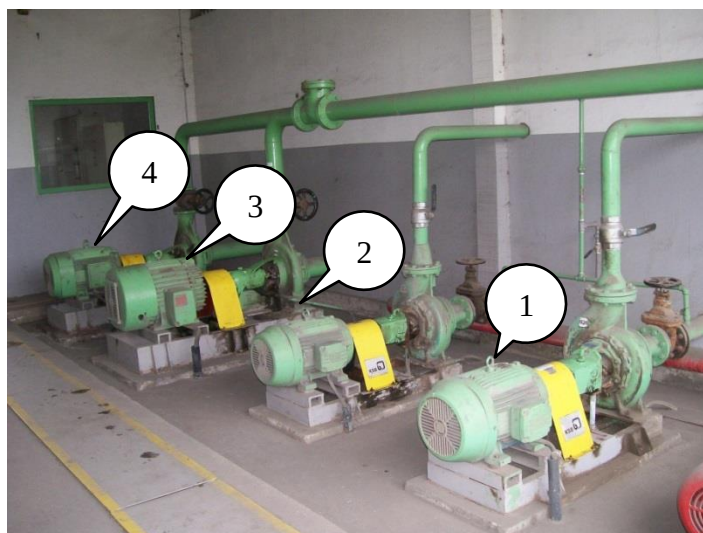


Figura 16 – Bombas centrífugas do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Na Figura 16 as bombas 1 e 2 são as bombas centrífugas de recalque, responsáveis pelo bombeamento da água da cisterna para a bacia de refrigeração. As bombas 3 e 4 são as bombas centrífugas responsáveis pelo bombeamento da água da bacia de refrigeração para a caixa geral. Apesar de conter duas bombas de cada tipo, há o funcionamento de apenas uma por vez, ficando sempre a outra como reserva. Essa situação é preventiva para atender tanto uma possível falha nas bombas, como também garantir a manutenção das mesmas. A Tabela 7

apresenta os dados técnicos dos motores das bombas e seus respectivos TAG's¹⁰ no sistema, seguindo a numeração determinada na Figura 16.

Tabela 7 – Dados técnicos dos motores das bombas do SAA.

Nº	TAG	Descrição	Potência (kW)	Tensão (V)	Corrente (A)	Frequência (Hz)	Rotação (rpm)
1	M24	Motor bomba d'água 2 cisterna p/ bacia de refrigeração (Reserva)	22	440	36,9	60	1765
2	M26	Motor bomba d'água 1 cisterna p/ bacia de refrigeração (Principal)	22	440	36,9	60	1765
3	M28	Motor bomba d'água 2 bacia refrigeração p/ caixa d'água geral (Reserva)	55	440	90	60	1775
4	M30	Motor bomba d'água 1 bacia refrigeração p/ caixa d'água geral (Principal)	55	440	90	60	1775
5	M22	Motor bomba submersa	22	440	42	60	3450

Fonte: Autoria própria, a partir dos dados de placa dos motores das bombas do SAA, 2012.

A caixa geral possui 25,15m de altura e abastece a água para o processo por meio da queda d'água por gravidade. São três tubulações de água que distribuem para as áreas da moagem de cru, forno e moagem de cimento. A água distribuída atinge os pontos de refrigeração dos equipamentos por meio da gravidade e a força da coluna d'água nas tubulações. Toda água que vai para o processo retorna para a cisterna através de tubulações de retorno que desaguam na cisterna, com exceção da água que é consumida no processo através dos bicos de pulverização da torre de refrigeração. O retorno da água também é movido pela gravidade e a força d'água na tubulação.

Além do abastecimento de água para o processo produtivo a caixa geral também abastece por gravidade três caixas menores: do britador de calcário (capacidade 1.000 litros), torre de refrigeração (capacidade 8.000 litros) e carregamento e expedição (capacidade 2.000 litros). Cada uma dessas caixas abastecem seus pontos específicos de consumo. A Figura 17 mostra a caixa geral e as tubulações de abastecimento de água para o processo produtivo

¹⁰ TAG ou “etiqueta”: identificação do equipamento, ou de forma mais específica sigla utilizada para definir o código do equipamento cadastrado no Sistema de Controle e Manutenção das Máquinas e Equipamentos em operação no parque fabril.



Figura 17 – (1) Caixa d'água geral, e (2) Tubulações de abastecimento de água para os processos.
Fonte: Autoria própria, 2012.

Na tubulação da bomba submersa do poço existe uma válvula manual que faz o desvio do abastecimento do reservatório de água para a caixa do escritório (capacidade 40.000 litros), que é a segunda maior da fábrica, responsável pelo abastecimento das instalações sanitárias dos prédios administrativos e outras caixas menores distribuídas nos demais prédios de uso administrativo, que fazem o abastecimento por gravidade de suas áreas específicas. A Tabela 8 apresenta a descrição e capacidade nominal dessas.

Tabela 8 – Relação das caixas d'água distribuídas pelas áreas administrativas.

Identificação	Descrição caixa d'água	Capacidade em litros
1	Portaria	1.000
2	Comercial	1.000
3	Auditório	1.000
4	Cantina dos Caminhoneiros	2.400
5	Almoxarifado	1.000
6	Oficina mecânica	4.000
7	Salas Gestores	1.000
8	Laboratório	8.000
9	Banheiro Caminhoneiros	1.000
Total		20.400

Fonte: Autoria própria, a partir do layout do fluxograma das águas, 2006.

A caixa dos escritórios abastece as instalações via gravidade e a mesma é abastecida diretamente pela bomba submersa do poço. A Figura 18 mostra as válvulas que fazem a manobra direcionando a água do poço para a caixa dos escritórios ao invés do abastecimento direto para a cisterna. A água consumida pela caixa dos escritórios não retorna para o reservatório de água.



Figura 18 – Válvulas de manobra do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2012.

Esse descritivo do processo de abastecimento de água da fábrica foi feito a partir do *layout* do fluxograma das águas existente. Após mostrar o funcionamento do SAA da fábrica em questão, na seção 3.2 será apresentada a descrição do controle automático que existia e estava em funcionamento na planta antes do desenvolvimento do presente trabalho. A descrição do controle do SAA foi feita através do estudo e interpretação dos diagramas elétricos de captação e tratamento de água do painel elétrico existente, e também do entendimento da lógica de controle, comando e operação gravada no módulo de controle do sistema, o LOGO^{®11}, e visualizada através do *software* de comunicação LOGO!Soft Comfort.

3.2 CONTROLE AUTOMÁTICO DO SAA

O controle automático do Sistema de Abastecimento de Água que se encontrava em funcionamento, desempenhava quatro funções básicas: promover o monitoramento, proteção, alarme e intertravamento das cargas. Apesar do sistema não ser provido com o conjunto CLP e supervisor, o módulo de controle do LOGO[®] desempenhava várias funções similares que mantinham a continuidade do processo. Nas seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 serão descritos, a arquitetura, o controle e os alarmes executados pelo sistema quando controlado pelo LOGO[®]. Na seção 3.3 serão levantadas as fragilidades do sistema e as possíveis soluções de melhoria que motivaram a implantação de um novo sistema de controle e supervisão.

¹¹ LOGO[®]: Módulo Lógico de Controle, desenvolvido pelo fabricante Siemens e utilizado para aplicações de automatização de pequeno porte.

3.2.1 Arquitetura do antigo controle do SAA

O Sistema Automático de Controle do SAA apresentava uma Unidade de Aquisição de Dados (UAD) constituída de uma Unidade de Aquisição de Dados e Controle (UADC) e de uma Unidade Dedicada (UD), ambas instaladas no Centro de Comando de Motores (CCM) do SAA, identificado como Painei D20. A UADC era constituída por dois módulos lógicos de automação *LOGO*[®] e a UD era formada pelos relés digitais e os intertravamentos. O sistema de controle também era composto pelas Unidades Terminais Remotas (UTR's), formadas pelas botoeiras seletoras instaladas na frontal do painel. A Figura 19 mostra o painel CCM do sistema de abastecimento de água, com detalhes das botoeiras seletoras e os dois módulos de controle *LOGO*[®].

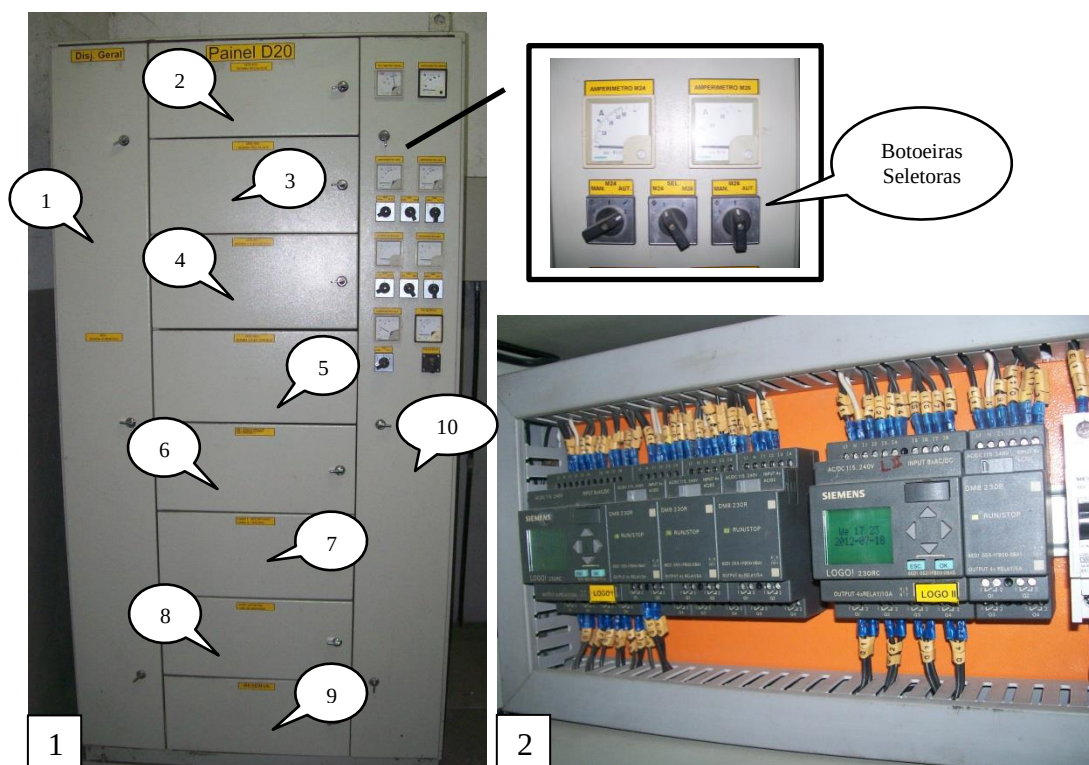


Figura 19 – (1) Painei D20 do Sistema de Abastecimento de Água, e (2) Módulos de controle *LOGO*[®].
Fonte: Autoria própria, 2012.

Como visualizado na Figura 19, o painel D20 possui 10 portas e em cada uma dessas estão instalados os comandos de acionamento dos motores das bombas e as unidades UADC, UD e UTR. A Tabela 9 apresenta a distribuição do painel D20 seguindo a numeração das portas identificadas na Figura 19.

Tabela 9 – Distribuição elétrica do painel D-20.

Porta	Tag	Descrição	Dispositivo de Acionamento	Ilustração
1	M22	Motor Bomba Submersa	Soft-Start	
2	M24	Motor bomba d'água 2 cisterna p/ bacia de refrigeração (Reserva)	Partida Direta	
3	M26	Motor bomba d'água 1 cisterna p/ bacia de refrigeração (Principal)	Partida Direta	
4	M28	Motor bomba d'água 2 bacia refrigeração p/ caixa d'água geral (Reserva)	Partida Direta	
5	M30	Motor bomba d'água 1 bacia refrigeração p/ caixa d'água geral (Principal)	Partida Direta	
6	Sem tag	Transformador de Iluminação; Alimentação painel CCM e painel de combate a incêndio; Circuitos de tomadas trifásicas.	Disjuntores	
7	UADC	Módulos de Controle LOGO® I e LOGO® II	Módulos de Controle LOGO®	
8	UD	Relés de eletrodos	Relés	
9	-	Reserva	Vazio	Sem imagem
10	UTR	Botoeiras de Comando Medidores de Corrente e Tensão	Botoeira de seleção	

Fonte: Autoria própria, a partir do diagrama elétrico do painel D20, 2012.

Na seção 3.2.2 será apresentado o controle realizado pelos LOGO®'s.

3.2.2 Antigo controle do SAA: Monitoramento, Proteção e Intertravamento.

A inicialização do controle era feita após a seleção do modo de operação das bombas em automático ou manual, através das botoeiras de comando individualizadas para cada bomba, inclusive as reservas.

Quando a botoeira estava selecionada para o modo automático, o acionamento das bombas era controlado pelos sensores de nível existentes nos reservatórios (poço, cisterna, bacia de refrigeração e caixa geral), e seguiam o comando do *LOGO*[®]. Quando a bomba era selecionada para o modo manual, as indicações de nível dos locais de controle eram desconsideradas e o próprio operador ligava e desligava a bomba, ou seja, a lógica existente no *LOGO*[®] ficava desativada. No caso das bombas de recalque e da caixa geral, que possuem bombas reservas, era necessário selecionar também qual das duas bombas iriam funcionar, no caso a principal ou a reserva, através das botoeiras de seleção.

A Figura 20 apresenta a lógica de controle que regia a operação das bombas centrífugas e submersa do SAA. De forma geral, o controle das bombas obedecia duas condições prioritárias, uma para garantir a água no processo (condição 1), e a outra para confirmar o funcionamento elétrico do motor da bomba (condição 2).

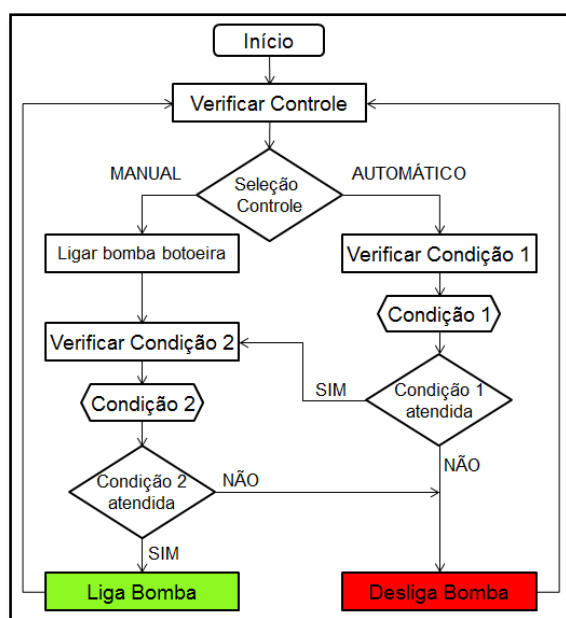


Figura 20 - Fluxograma geral da lógica de controle que estava em funcionamento no SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Como já apresentado na Tabela 9, existiam dois módulos *LOGO*[®] de controle, o *LOGO*[®] I, que controlava a bomba submersa e as bombas de recalque, e o *LOGO*[®] II, que

controlava as bombas da caixa geral. A Figura 21 mostra o fluxograma de controle para a verificação de atendimento das duas condições prioritária contidas no fluxograma apresentado na Figura 20.

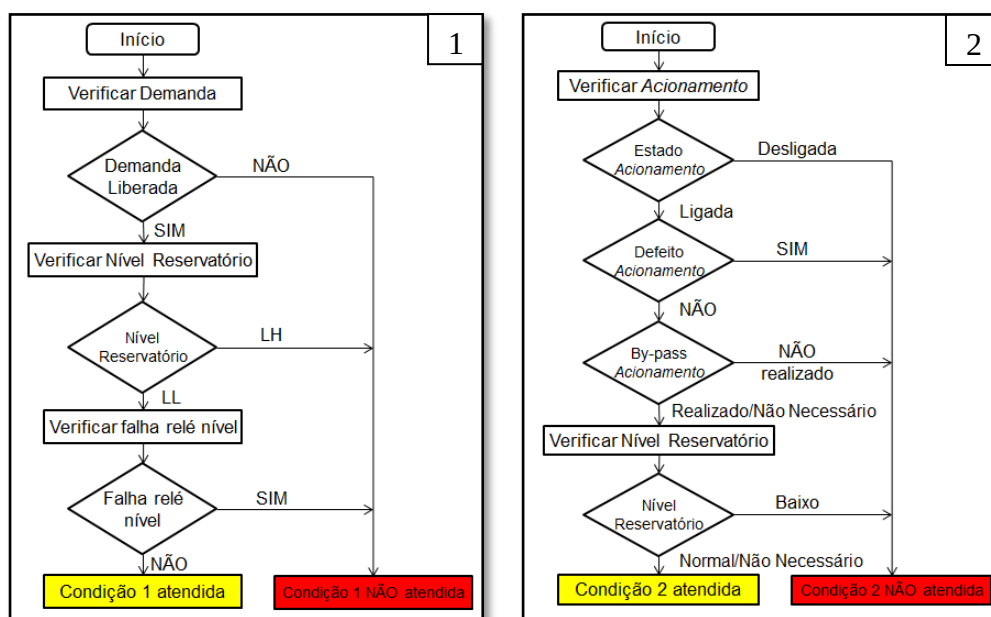


Figura 21 – (1) fluxograma da condição prioritária 1, e em (2) fluxograma da condição prioritária 2.
Fonte: Autoria própria, 2013.

Vale destacar, que cada bomba tem sua particularidade em termos de tipo de acionamento e necessidade de verificação do nível dos reservatórios a montante e a jusante, mais de forma geral, todas operavam de acordo com as lógicas de controle apresentadas nos fluxogramas das Figura 20 e Figura 21.

3.2.3 Alarmes do antigo sistema de controle

Além do controle automático para ligar e desligar as bombas, com o objetivo de manter a disponibilidade do Sistema de Abastecimento de Água realizado pelo módulo de controle *LOGO*[®], existia também o controle de alarmes onde o sistema não atuava diretamente na planta mas mandava uma indicação para o operador, e este por sua vez se encarregava de tomar as providências necessárias.

Assim, o *LOGO*[®] utilizado possuía a função de imprimir em sua tela digital mensagens de falha e sinalizações de ocorrência de defeitos. Quando as bombas paravam devido a alguma falha operacional ou elétrica, o *LOGO*[®] enviava um sinal para uma sinaleira

que ficava localizada no painel sinótico do operador da moagem de cru, e no *display* do *LOGO*[®] era descrito a falha ocorrida para que o mantenedor identificasse o acontecido e tomasse uma ação no menor tempo possível.

Além desses alarmes que paravam o funcionamento das bombas de forma automática, ainda existiam mais dois alarmes que não atuavam diretamente no sistema, mas indicavam para o operador uma situação de urgência onde se fazia necessário à tomada de ação. Essas situações ocorriam quando o nível da bacia de refrigeração e/ou o nível do reservatório de água estavam muito baixos. Para essa indicação de nível muito baixo foi empregado um terceiro sensor do tipo boia na bacia de refrigeração e na cisterna.

O sensor do tipo boia possui dois níveis de estado “0” ou “1”, que significa acionado ou não. Na lógica, foi utilizado o nível “1” para indicar nível de água seguro e nível “0” quando o nível estivesse abaixo do nível de segurança, ou seja, nível de urgência. Caso os níveis dos reservatórios não fossem rapidamente recuperados, o sistema ficaria sem água e as áreas produtivas da moagem de cru, forno e moagem de cimento parariam.

A sinaleira existente no painel de controle do moinho de cru ficava acesa, indicando que o sistema estava funcionando normalmente. Quando a mesma ficava piscando significava que existia alguma falha ou alarme no sistema. No momento que o operador da moagem de cru identificava que a sinaleira estava piscando sua ação era chamar o mantenedor (no caso, o electricista) e o mesmo se direcionava imediatamente para o painel D20 para ler a mensagem do *LOGO*[®], tomar uma ação para corrigir a falha sinalizada, e retornar o sistema para operação normal.

Além dessas sinalizações controladas pelo *LOGO*[®], havia mais duas sinalizações que não passavam pela lógica de controle automática do sistema. Essas sinalizações consistiam de botões sinaleiros instalados um na sala de comando e controle do forno, e o outro na portaria da fábrica. Ambos indicavam nível muito baixo, ou seja, nível de urgência na caixa geral e na caixa dos escritórios, respectivamente.

Dessa forma, tanto na caixa geral como na caixa dos escritórios existiam dois sensores, o sensor do tipo boia para indicar nível muito baixo (situação de urgência), e o conjunto sensor e relé de eletrodos para indicar o nível alto ou baixo de operação das bombas. Exclusivamente, na caixa dos escritórios, os sensores de eletrodos não enviam o sinal de estado do nível para o *LOGO*[®], mas, diretamente para a sinaleira localizada na portaria da fábrica.

A ação era manual e dependia totalmente do vigilante da fábrica que por sua vez tinha a incumbência de monitorar a sinaleira que indicava o nível da caixa d’água dos escritórios, e

caso fosse necessário, deveria solicitar ao eletricista de turno a realização da chamada “manobra da caixa d’água”. Em relação à boia, quando o estado lógico estava sinalizando “1”, significava nível normal e sinaleira acesa, no entanto quando o estado lógico comutava para “0”, significava nível muito baixo, e então a sinaleira ficava piscando.

Quando a manobra d’água era realizada a vazão de água do poço para a cisterna era cessada, porém essa ação não possuía nenhum critério de segurança, podendo ocasionar a diminuição do nível da cisterna, pois o controle automático feito pelo *LOGO*[®] permaneceria atuando sem conseguir identificar que a água estava sendo desviada para a caixa dos escritórios. Na seção 3.3 serão apresentadas essa e outras fragilidades do sistema de controle descrito.

3.3 FRAGILIDADES DO ANTIGO SISTEMA DE CONTROLE DO SAA

Conforme identificado na descrição do controle do Sistema de Abastecimento de Água feita na seção 3.2, o controle em funcionamento na planta apresentava fragilidades que poderiam comprometer a disponibilidade do sistema e contribuir para uma baixa eficiência energética, entre outras perdas materiais e financeiras.

Foram quantificados sete principais pontos de melhorias para o controle do SAA em estudo: (1) falta de registro e controle do consumo de energia elétrica; (2) desperdício de energia elétrica; (3) desperdício de água; (4) diminuição da vida útil do conjunto motor-bomba; (5) mau dimensionamento no controle do nível de água dos reservatórios; (6) baixo rendimento e fator de potência dos motores; (7) sistema automático pouco eficiente.

As seções 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5 e 3.3.6 tratam detalhadamente das fragilidades constatadas no antigo sistema de controle do SAA, e propõem soluções de melhorias visando eliminar as deficiências no controle, operação, supervisão e eficiência energética do sistema.

3.3.1 Falta de registro e controle do consumo de energia elétrica

No SAA em estudo o consumo de energia elétrica é atribuído aos cinco conjuntos motor-bomba existentes na planta. Cada conjunto motor-bomba possuía um Transformador de Corrente (TC) em uma de suas fases e esses enviavam a informação da corrente do motor para seus respectivos indicadores de corrente localizados na UTR do painel D20.

Tais indicadores de corrente são analógicos e seus registros são em tempo real, não havendo nenhum armazenamento dos valores indicados. Não existe transformador de potencial no circuito elétrico dos motores. Dessa forma, a potência ativa de operação dos motores não era registrada, e conseqüentemente não havia medição do consumo da energia elétrica, nem tampouco das grandezas que indicam a qualidade dessa energia tais como fator de potência, potência aparente, potência reativa e rendimento dos motores.

Assim, não podia ser avaliado o funcionamento das bombas no ponto ótimo de vazão x rendimento, e, portanto não era possível realizar um controle que garantisse a eficiência energética do processo.

Solução Proposta: Para obter a medição e o controle da energia elétrica consumida de cada motor e simultaneamente das grandezas elétricas (potência, fator de potência e fator de carga) necessárias para a análise de eficiência energética do sistema, as medições de energia das bombas M22, M26 e M30 foram inseridas na rede *ModBus* do Sistema de Gerenciamento de Energia Elétrica da fábrica. Dessa forma, os registros de corrente, tensão, demanda, fator de potência, fator de carga e consumo de energia elétrica passaram a ser armazenados no banco de dados do *Smart 32*, podendo ser consultados a qualquer momento em tempo real através das telas de supervisão do *Smart 32*, como também, através dos históricos diários, mensais e anuais, também apresentados nas telas de relatórios do *Smart 32*.

3.3.2 Desperdício de energia elétrica e redução da vida útil dos motores

Como já descrito na seção 3.2, o controle dos níveis de água era do tipo liga/desliga, onde se enviava os comandos para as bombas sem que houvesse nenhum critério de segurança quanto ao tempo e a quantidade de água disponível no sistema.

Somando o tempo que as bombas centrífugas ficavam funcionando com o tempo em que ficavam paradas, obtinha-se um ciclo de trabalho de 30 minutos. No decorrer de 1 hora, as bombas faziam dois ciclos de trabalho. Como o sistema funciona 24 horas, tinha-se que em funcionamento normal as bombas realizavam 48 ciclos de trabalho, o que significava que as bombas ligavam e desligavam 48 vezes por dia. Traduzindo esses valores em horas, no decorrer de um dia de trabalho, as bombas funcionavam durante 14,4 horas e ficavam 9,6 horas paradas.

O acionamento elétrico das bombas era do tipo partida direta, o que significa elevação de corrente durante a partida. O pico de corrente provoca aquecimento nos enrolamentos dos motores, e, por conseguinte essa elevação de temperatura causa desgastes na isolação do cobre e também elevação da corrente elétrica no painel CCM. Essa situação inevitavelmente acarretava diminuição da vida útil dos motores, sobrecarga na rede elétrica e desperdício de energia.

Quanto à bomba submersa, o ciclo de funcionamento é diferente em relação aos das bombas centrífugas. Essa diferença ocorre principalmente porque a bomba submersa abastece tanto a cisterna como também a caixa dos escritórios. Além disso, em relação ao reservatório da cisterna, vale salientar que o mesmo recebe água tanto do poço, como também do retorno do processo, assim, o ciclo de funcionamento da bomba do poço é variado. A vantagem da bomba submersa em relação às demais está no seu acionamento através de “*soft-start*”, dessa forma a bomba M22 não sofre desgaste devido elevadas correntes de partida.

Solução Proposta: Para diminuir a corrente de partida das bombas centrífugas (bombas M26 e M30) foram realizados testes onde o acionamento tipo partida direta foi substituído ora por *soft-start*, ora por inversor de frequência.

No caso da utilização da *soft-start*, o objetivo foi diminuir a elevação de corrente na partida, e consequentemente o sobreaquecimento do motor. Para a aplicação com inversor de frequência, pretendeu-se tanto a diminuição do valor da corrente de partida, como também a realização do controle da velocidade do conjunto motor-bomba.

Através do controle de velocidade é permitido aumentar e/ou diminuir a vazão da bomba de tal forma que a mesma mantenha o nível dos reservatórios de água cheios, não sendo necessária a realização de 48 partidas diretas por dia. Essa operação contínua das bombas será contemplada na Solução Proposta na seção 3.3.3.

Para a bomba submersa não foram feitos testes com variação do tipo de acionamento. Os motivos foram devido à mesma já se encontrar operando com partida suave, o que não justificaria retroceder para uma partida direta, e quanto à realização de testes para

acionamento com inversor de frequência, o fabricante da bomba KSB, não recomendou devido à variação de tensão e frequência apresentar um risco de queima para a bomba.

Outra solução para diminuir o desgaste do motor devido o número elevado de partidas/dia é manter a bomba em operação contínua. Na placa dos motores das bombas tem a informação que os mesmos são projetados para regime de trabalho contínuo (tipo S1), assim, para atender as características de regime de operação das bombas foi aplicada a Solução Proposta descrita na seção 3.3.3.

3.3.3 Controle seguro do nível de água dos reservatórios e controle do horário de funcionamento do sistema

O controle dos reservatórios de água através dos sensores de eletrodos não quantificava a quantidade de água disponível para o abastecimento do sistema. Assim, em caso de falha no sistema, quando o sensor detectava nível mínimo eram necessárias ações de urgência, devido não se ter disponível o valor real do nível de água, e conseqüentemente a estimativa do tempo seguro para atuar na falha do sistema sem ocorrer falta d'água. Inclusive, informa-se que ocorreram situações onde foi necessário comprar água de carros pipas, devido o desconhecimento do nível real da caixa geral e quanto tempo o sistema se manteria sem o devido abastecimento de água.

Da mesma forma, por não se ter o controle da quantidade de água real no sistema, não era possível parar as bombas no horário sazonal de ponta, onde a energia elétrica apresenta um valor monetário superior ao horário sazonal fora de ponta. Pois, como as bombas funcionavam sempre na mesma vazão, o tempo para recuperação do nível máximo de água nos reservatórios era constante, e em caso do sistema ficar parado durante as 3 horas referentes ao horário sazonal de ponta, poderia acarretar na diminuição do nível da caixa geral a um nível mínimo pela qual a bomba M30 não fosse capaz de recuperar em um tempo útil e seguro de forma a não provocar a parada dos processos produtivos.

Solução Proposta: Para resolver o problema da falta de indicação real do nível de água nos reservatórios, foi instalado para experimento, um sensor de nível analógico na caixa geral. Com esse sensor o nível de água disponível nos reservatórios passou a ser medido em tempo real e em unidade percentual de caixa d'água cheia.

Além do sensor analógico, com o acionamento da bomba da caixa geral com inversor de frequência, foi possível variar a vazão da bomba e assim controlar tanto o enchimento quanto o esvaziamento da caixa geral. Isso possibilitou diminuir o tempo de recuperação do nível desejado, e aumentar o tempo de esvaziamento até o nível mínimo programado.

Com essa implementação, foi realizada a redução da vazão da bomba sem pará-la durante o horário sazonal de ponta. Ou seja, a bomba é mantida em uma rotação mínima onde a vazão de enchimento é um pouco menor do que a vazão de esvaziamento. Logo, durante as 3 horas do horário sazonal de ponta, o nível do reservatório baixa até um valor mínimo de segurança, e finalizado o horário sazonal de ponta, a bomba retorna a sua rotação nominal e recupera rapidamente o nível máximo desejado.

Essa operação elimina os picos de corrente na partida, visto que o motor da bomba não fica ligando-desligando, sendo sua operação contínua com variação de rotação. Nesse caso, quanto menor a frequência de operação do motor, menor a potência de operação, e consequentemente menor o consumo de energia elétrica.

Outra solução aplicada foi à implementação de um controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID), com o objetivo de manter o nível da caixa geral constante. Nesse caso eliminou-se o controle por máximos e mínimos e definiu-se um *Set-Point*¹² referente ao nível de água que se desejava manter no reservatório.

Esse controle garante que o sistema estará sempre com o nível de água estável, e em caso de falhas, há um tempo maior para a equipe de manutenção atuar, visto que não ocorrerá mais o risco da falha acontecer justamente quando o reservatório estivesse com nível mínimo.

O controle PID elimina a situação das bombas sofrerem várias partidas por dia, pois a bomba fica em operação constante variando somente a vazão devido à variação na frequência de rotação do motor da bomba e também, como já citado no Capítulo 2, a variação de frequência proporciona variação na potência e está influencia diretamente no consumo de energia elétrica.

¹² *Set Point*: ponto de referência desejado.

3.3.4 Controle seguro do nível de água dos reservatórios e desperdício de água

Foi identificado como alto potencial de falha no controle do consumo de água do poço a execução da manobra d'água para o abastecimento da caixa dos escritórios. Como já citado na seção 3.2.3, quando a sinaleira de controle da caixa d'água localizada na portaria indicava nível baixo ou nível alto na caixa dos escritórios, o eletricista era acionado pelo vigilante para realizar a “manobra d'água”, que consistia em abrir ou fechar a válvula de desvio da água do poço para a cisterna.

Esse controle era integralmente manual e dependente da ação humana. Por esse motivo, duas situações indesejáveis estavam propícias a acontecer: a primeira estava relacionada com a perda do controle do bombeamento da água para a cisterna, podendo acarretar em falta d'água para o processo, e a segunda consistia no transbordo de água na caixa dos escritórios, provocando desperdício de um considerável volume de água.

Quanto à primeira situação indesejada, tinha-se que quando a bomba submersa do poço estava abastecendo diretamente a caixa dos escritórios, o controle da bomba, indiferentemente se estava selecionado para automático ou manual, não era capaz de enviar água para o enchimento da cisterna, pois a água, mesmo sendo bombeada do poço, estaria fisicamente desviada para a caixa dos escritórios. Dessa forma, o sistema ficava vulnerável podendo acontecer do nível do reservatório da cisterna baixar até um nível menor do que o nível de urgência. Caso essa situação acontecesse, a bomba de recalque não poderia ser acionada e os níveis, tanto da bacia de refrigeração como da caixa geral iriam baixar podendo atingir um nível inferior ao nível de urgência, o que caracterizaria uma situação crítica para o processo.

Outra situação, ainda dentro da primeira condição indesejada, ocorria quando na operação da “manobra d'água”, o eletricista precisava verificar se a bomba do poço estava em operação. Caso não estivesse, era necessário colocá-la em manual e acioná-la até o nível da caixa do escritório se recuperar, do contrário, o nível da caixa do escritório continuaria baixando mesmo com a manobra realizada. Estando o nível da caixa do escritório recuperado, o eletricista deveria desfazer a manobra d'água, desligar a bomba submersa em manual e retornar o comando da referida bomba para automático, sob o risco de a bomba submersa ficar em manual e não obedecer à lógica de controle de nível da cisterna, ocasionando o desequilíbrio do sistema.

No que se refere à segunda situação indesejada, ocorria que estando à bomba submersa alimentando a caixa dos escritórios, quando o nível fosse recuperado e o vigilante percebesse a sinalização de nível alto, comunicaria (através de rádio de comunicação) ao eletricista do turno que a caixa estava cheia e solicitaria para o mesmo desfazer a “manobra d’água”. Recebido o comando da portaria, o eletricista precisaria se deslocar até o poço para desfazer a “manobra d’água”, abrindo a válvula de desvio manualmente, e caso a bomba submersa tivesse sido colocada em manual, deveria retornar a seleção do comando para automático.

Porém, nem sempre o eletricista estava disponível para atender de imediato a solicitação da portaria, e, além disso, também ocorria da localização do eletricista se encontrar distante da casa de bombas, visto que a mesma é afastada do processo. Nesses casos, provavelmente o eletricista levaria um tempo mínimo entre 10 a 15 minutos para atender a solicitação de desfazer a “manobra d’água”. Nesse intervalo, o nível da caixa do escritório poderia transbordar ocasionando um grande desperdício de água. Vale destacar aqui que os transbordos de água da caixa dos escritórios eram frequentes.

Ainda para essa situação, deveria ser considerada a possibilidade do eletricista, durante a ação de desfazer a “manobra d’água”, esquecer-se de verificar a seleção da botoeira da bomba submersa (automática ou manual). Assim, se fazia necessário que o eletricista se certificasse que a seleção da bomba M22 estava na posição automático, pois caso a mesma ficasse selecionada para manual, após a “manobra d’água” ser desfeita, ocorreria o previsto na primeira condição onde a bomba submersa ficaria sem nenhum controle de acionamento ou então, se a bomba estivesse ligada em manual, ocasionaria o transbordo de água da cisterna.

Solução Proposta: A solução aplicada para evitar a ocorrência das duas condições indesejáveis citadas foi a instalação de uma válvula eletropneumática para a realização automática da manobra d’água sem depender da ação do homem, tanto no que se refere à supervisão do vigilante quanto à realização da manobra manual da válvula de desvio feita pelo eletricista.

Com a automatização da válvula de desvio, a lógica de controle implementada no CLP verifica os níveis de água dos reservatórios da cisterna e do poço, e antes de realizar a “manobra d’água”, analisa e decide se é seguro ou não a realização da mesma. Em sequência, após executada a manobra da válvula para o abastecimento da caixa dos escritórios, o sistema permanece monitorando os demais níveis de água da cisterna e do poço. Caso o nível da cisterna baixe e alarme nível baixo, o lógica de controle comandará a reversão da manobra da caixa dos escritórios para a cisterna. Nesse controle, a prioridade será sempre atender aos

níveis de água que impactam diretamente na continuidade do processo, ou seja, os níveis da cisterna e bacia de refrigeração.

3.3.5 Rendimento e fator de potência dos motores

Utilizando o analisador de potência e harmônicos *Power Harmonics Analyzer Fluke 41B*, foram feitas medições pontuais de potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, corrente e tensão das bombas submersas e centrífugas, a Tabela 10 mostra os valores medidos.

Tabela 10 – Medições realizadas nos motores das bombas do SAA.

Equipamento	Potência Nominal (kW)	Relação Pot. (Pativa/Pn) (%)	Relação Corrente (Iativa/Inominal) (%)	Fator de Potência
M22	22	77	62,4	0,86
M24	22	68	70,5	0,76
M26	22	69	71	0,76
M28	55	107	98,9	0,90
M30	55	98	89,1	0,87

Fonte: Elaboração própria, a partir dos valores medidos em campo, 2012.

Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram que os motores de acionamento das bombas M24 e M26 não estão bem dimensionados e apresentam rendimento abaixo de 75%. Isso significa que está havendo desperdício de energia com reativos e os motores estão trabalhando com baixo fator de potência.

Solução Proposta: O fator de potência baixo pode ser ajustado através da definição do ponto ótimo de funcionamento da bomba que poderá ser alcançado com a variação de velocidade. Dessa forma, por meio do acionamento das bombas com inversor de frequência, buscou-se ajustar a vazão da bomba para o ponto ótimo a fim de melhorar o fator de potência da bomba M26.

3.3.6 Sistema automático com baixa eficiência

Outras situações consideradas como pontos de melhorias na automação que estava em operação no SAA, estão relacionadas à eficiência do controle e da supervisão do sistema. Por

exemplo, a determinação sobre qual das bombas iria funcionar, a principal ou a reserva, não estava contemplada na lógica do *LOGO*[®]. Essa seleção era feita de forma manual através de botoeira na porta do painel D20.

Outro exemplo está relacionado à supervisão do sistema, essa consistia em sinaleiras distribuídas em três pontos diferentes (painel de controle da moagem de cru, forno e portaria). Além das sinaleiras estarem distribuídas em pontos distintos, as mesmas apenas indicavam um estado de urgência dos níveis dos reservatórios ou que o sistema estava em falha, mas não descreviam exatamente qual a falha.

O último exemplo se refere à impossibilidade do desenvolvimento de lógicas de controle automáticas que auxiliassem nas análises da eficiência energética do sistema. A automação instalada não oferecia ferramentas que permitissem a criação de históricos, gráficos, supervisão em tempo real, e ferramentas para desenvolver algoritmos com o objetivo de auxiliar nas análises necessárias para a melhoria do sistema, e principalmente a análise de eficiência energética. A interface homem-máquina do *LOGO*[®] é limitada e não existia um supervisor para o acompanhamento em tempo real do sistema.

Solução Proposta: A solução para essas deficiências foi o desenvolvimento de um Novo Projeto de Automação que alcançasse os níveis 1, 2 e 3 da Pirâmide de Automação, apresentada na Figura 13 (p. 49) mostrada na seção 2.3.1 (p. 49). Para isso, foi aplicada a infraestrutura de *hardware* e de *software* que serão apresentadas na seção 3.4.

Em resumo, a nova automação implantada apresenta a seleção das bombas, principal ou reserva, realizada na tela do supervisor. Qualquer defeito no sistema é devidamente alarmado e o diagnóstico poderá ser lido e repassado para o mantenedor imediatamente.

O sistema não ficará mais vulnerável a uma indicação de sinaleira que acusa somente duas condições: funcionando ou defeito. Quando o operador observar o alarme no supervisor, o mesmo já terá a informação do defeito ocorrido e solicitará o atendimento do eletricista com o devido diagnóstico do problema. Tal situação diminui de forma considerável o tempo de reparo de uma falha e aumenta a disponibilidade do sistema e eficiência.

De forma geral, a nova automação implantada foi fundamental para a implementação de todas as soluções sugeridas nessa seção, para eliminar as falhas do sistema e promover a eficiência energética do mesmo. A seção 3.4, apresentará a automação implantada detalhando a infraestrutura de *hardware* e *software* empregados.

3.4 PROJETO DE AUTOMAÇÃO

Como visto nas seções 3.2 e 3.3, o SAA em estudo, mesmo com controle automático, apresentava fragilidades e limites de controle, operação e supervisão que inviabilizavam a realização de análises de eficiência energética. Assim, foi necessária a implantação de uma nova automação, conforme sugeriu as soluções propostas nas seções de 3.3.1 a 3.3.6.

A implementação do novo projeto de automação para o SAA foi baseada tanto nas recomendações de procedimentos para automação industrial verificadas em Moraes e Castrucci (2013, p. 183), como também, no padrão de automação em operação em alguns processos produtivos da fábrica¹³, buscando manter a padronização da automação já aplicada na indústria.

Seguindo a sequência de procedimentos recomendados por Moraes e Castrucci (2013, p. 183), a primeira ação que a ser realizada para a implantação da automação refere-se à descrição da planta industrial. Para essa descrição, recomenda-se a produção ou utilização das seguintes ferramentas: fluxogramas e diagramas de processo; diagramas de blocos; diagramas de fluxo de processo; diagramas de tubulação e instrumentação denominados de *Piping & Instrument Diagram* (P&IP).

Como o SAA já possuía o fluxograma das águas e a descrição do processo já havia sido realizada durante o estudo do antigo sistema automático em funcionamento, apresentado na seção 3.1, a primeira etapa da automação já estava concluída. Assim, seguiu-se para a segunda recomendação de Moraes e Castrucci (2013, p. 187), referente à criação dos documentos necessários para o projeto. Assim, os documentos criados foram:

- Lista de instrumentos e de entrada/saída: foi criada uma lista contendo os equipamentos e instrumentos em operação no processo de abastecimento de água. Nessa lista estão todas as variáveis de entrada (sensoreadas) e as de saída (atuadoras) do CLP para o processo industrial e vice-versa. A lista está dividida em equipamentos e instrumentos e possui vários campos para os dados referentes às tag's, descrição detalhada do

¹³ Atualmente na fábrica, os processos automatizados são: moagem de CVP; alimentação do forno rotativo que inclui balanças gravimétricas e torre intercambiadora; ensacadeiras e sistema de combate a incêndio.

equipamento/instrumento, endereçamento no CLP, descrição da automação¹⁴, tipo de variável¹⁵, entre outros. A lista completa está apresentada no APÊNDICE A;

- Especificação da operação automática: trata-se da especificação redacional, descrevendo todas as situações e ações consequentes que são desejadas no processo. É o descritivo do sequenciamento e da lógica de controle do processo, visando segurança e eficiência do mesmo. Nesse ponto, permaneceu inalterado o descritivo apresentado nas seções 3.2.2 (p. 64) e 3.2.3 (p. 65);

- Diagramas de controle lógico: representado na lógica de controle e operação, escrita em linguagem *ladder*;

- Diagramas de causa e efeito: desenvolvido no Projeto do Programa *Ladder*;

- Lista de entradas e saída (E/S's) no CLP: foi criada a lista contendo todas as entradas e saídas do CLP e suas respectivas tag's. A lista de E/S's do CLP está organizada pelo tipo do cartão do CLP e suas respectivas entradas e/ou saídas disponíveis. Cada endereço de entrada e/ou saída possui uma tag correspondente. A lista de E/S's do CLP está demonstrada no APÊNDICE B;

- Diagramas de controle dinâmico: criado para a montagem de todo o sistema, desde a parte física com a montagem do painel de controle do CLP, interligação das cargas com as entradas e saídas do CLP, até a lógica de programação do CLP. Esse documento não foi anexado no trabalho devido pertencer e interessar exclusivamente à fábrica onde o sistema está em operação;

A terceira etapa da automação, ainda segundo Moraes e Castrucci (2013, p. 195) está direcionada para o Projeto do Programa *Ladder* de Automação. No entanto, antes de ser apresentado o Programa *Ladder* desenvolvido para o controle e análise do SAA, será exposta na seção 3.4.1 a infraestrutura de *hardware* instalado.

¹⁴ Descrição da automação é referente à tag utilizada na lógica *ladder* do CLP.

¹⁵ Tipo de variável indica se a variável consiste em uma variável de entrada ou de saída, e se a mesma é digital ou analógica. As possibilidades são: entrada digital (ED), entrada analógica (EA), saída digital (SD) e saída analógica (AS).

3.4.1 Infraestrutura de *Hardware* instalado para a automação

No que se refere à infraestrutura de *hardware* instalado para a automação, destaca-se a montagem e instalação de vários componentes necessários para alcançar os objetivos propostos nesse trabalho.

A princípio, a primeira preocupação foi com as medições de consumo de energia e as demais grandezas elétricas necessárias para a análise da eficiência energética do sistema. Assim, depois de solucionado como seriam feitas as medições de energia elétrica, foi dado início ao levantamento do material para a aquisição, montagem, instalação e acionamento dos seguintes materiais: painel dos transdutores para as medições de energia elétrica; acionamentos eletrônicos (*soft-start* e inversores de frequência); sensores de nível analógico; válvula eletropneumática (já instalada no sistema, porém sem comando para operação); painel do CLP; painel de comutação entre os tipos de partidas; e a rede de automação. Esses materiais são fundamentais para atender as soluções propostas descritas na seção 3.3 (p. 67).

A atenção maior durante o levantamento dos materiais foi direcionada para a utilização e aproveitamento de materiais disponíveis na fábrica, não gerando custos adicionais para a automação antes de realizar o cálculo do retorno da mesma. Os materiais utilizados foram: cabos (coaxial, par trançado sem blindagem e fibra ótica), bandejamentos, painéis elétricos, partidas eletrônicas, CLP, infraestrutura para a rede *Ethernet*, transdutores e outros, todos, disponíveis na Unidade Fabril.

O único material necessário e não disponível foi o sensor de nível submersível, que foi comprado para a realização dos testes e aplicação definitiva no sistema. Dessa feita, foi adquirido um único sensor para aplicação na caixa geral, sendo assim as análises que dependiam do sensor de nível analógico foram limitadas para a bomba que abastece a caixa geral (bomba M30). Nas seções 3.4.1.1 à 3.4.1.6 serão descritos e demonstrados os materiais e sistemas instalados.

3.4.1.1 Derivação da rede do *Smart 32* para as medições de consumo de energia elétrica e outras grandezas elétricas

Para atender a solução proposta na seção 3.3.1 (p. 68), tinha-se planejado a princípio, a compra de medidores de energia elétrica com comunicação *Ethernet*, para que as medições de consumo e outras grandezas elétricas fossem computadas no CLP e visualizadas no supervisor do SAA. Foram consultados alguns fabricantes e entre eles a própria *Rockwell* que apresentou várias opções de transdutores com comunicação *Ethernet*.

Porém, o valor monetário dos instrumentos de medição sugeridos era expansivo e a aquisição não se justificava, pois não se teria outra aplicação para os instrumentos a não ser no sistema que ainda seria submetido a testes de eficiência energética. Assim, foi feita a opção de utilizar o próprio Sistema de Gerenciamento de Energia Elétrica e Utilidades apresentado na seção 2.3.4 (p. 53).

A rede de comunicação do *Smart 32* utiliza o protocolo *Modbus* RS-485, e os transdutores ETE-50 e ETE-60 da ABB. Por conta disso não foi possível comunicar os referidos transdutores com o CLP SLC500®, uma vez que este não possui comunicação *Modbus*, e também se tinha disponível somente o cartão de comunicação *Ethernet*. Assim, foram inseridas as medições de energia elétrica das bombas M30, M26 e M22 na rede do *Smart 32*.

A inserção das medições de energia elétrica das bombas no *Smart 32* só foi possível porque havia na rede algumas cargas que estavam desativadas há alguns anos. Dessa forma, foram aproveitados os transdutores de medição dessas cargas e os seus respectivos endereços de rede. Esses transdutores foram montados em um painel específico e instalados próximo ao CCM D20. O painel com os transdutores foi identificado como Painel *Smart 2.2*, mostrado na Figura 22. No APENDICE C, encontra-se o *Layout* do painel com detalhes dos materiais utilizados para sua montagem.



Figura 22 – Painel *Smart 2.2* para medição de energia elétrica das bombas M30, M26 e M22.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Na Figura 22, a sequência da esquerda para direita mostra que o primeiro e o terceiro são transdutores com display, característica do modelo ETE-60, e o do meio, é o modelo antigo ETE-50, sem display. Os três transdutores medem respectivamente, na sequência da esquerda para a direita, as bombas M30, M26 e M22. Cada acionamento dessas bombas possui um TC instalado em uma das suas três fases. O TC se comunica com o transdutor correspondente, e estes se comunicam através da rede RS-485 com o *Smart 32*.

Após a instalação física e a parametrização do sistema, no que se refere principalmente à relação do TC e valores de tensão e corrente, as medições das grandezas elétricas das bombas do SAA passaram a ser registradas pelo *Smart 32*.

As principais dificuldades encontradas nessa configuração foram inicialmente referentes às instalações e ligações físicas da rede, incluindo a distância de comunicação de um painel para outro e o tipo de cabo utilizado. Outra dificuldade foi quanto ao ajuste da medição correta, pois após toda a instalação concluída, o *Smart 32* não registrava as medições de energia elétrica.

Depois de muitos estudos, foram identificados erros na posição de instalação dos TC's, inversão no sentido de medição, inversão de polaridades e inversão de fases. Através do método de tentativas e erros, e contato com a Assistência Técnica da Gestal, conseguiu-se configurar o sistema adequadamente para obter medições corretas de consumo, fator de potência, fator de carga e demanda de energia elétrica das bombas do SAA.

3.4.1.2 Partidas Eletrônicas e Pannel para Acionamento

Com o foco principal de reduzir o consumo de energia elétrica sem diminuir o uso, tem-se como uma das principais soluções a aplicação de partidas eletrônicas no acionamento de motores, conforme verificado no Capítulo 2, seção 2.2.3 (p. 44). Assim, visando os objetivos desse trabalho e as soluções propostas nas seções 3.3.2 (p. 68) e 3.3.5 (p. 74), fez-se modificações nos acionamentos das bombas M26 e M30. Dessa feita, foi possível mensurar e comparar o consumo de energia elétrica diário de cada tipo de acionamento: partida direta, *soft-start* e inversor de frequência.

Para a bomba principal de recalque da bacia de refrigeração, bomba M26, foi instalado um *soft-start* de 22kW, fabricante *WEG*, e inversor de frequência de 22kW, fabricante *Danfoss*. O *soft-start* foi reaproveitado de outro equipamento e o inversor foi retirado do estoque da fábrica.

Para a bomba centrífuga principal de enchimento da caixa geral, bomba M30, foi instalado um *Soft-Start* de 55kW, fabricante *Danfoss*, e inversor de frequência de 150kW, também fabricante *Danfoss*. Nesse caso, o *soft-start* de 55kW pertencia ao acionamento de um equipamento obsoleto da fábrica, e quanto ao inversor de frequência, utilizou-se um inversor reserva da área do forno.

O ideal para a aplicação na bomba M30 seria um inversor de frequência de 55kW, porém a fábrica não possuía cadastrado inversores dessa potência, consequentemente não tinha-se o *drive* disponível. Assim, para não ter que comprar um inversor novo, utilizou-se um reserva da área do forno que estava fora de uso¹⁶. A Figura 23 mostra os *drives* eletrônicos instalados para as bombas M26 e M30.

¹⁶ No final desse trabalho, caso a direção da empresa opte pela aplicação do acionamento com inversor de frequência para a bomba M30, recomenda-se comprar um inversor de potência de 55kW e aplicação específica para bombas centrífugas. O fabricante *Danfoss*, dispõem da linha de inversores modelo AQUA, próprios para bombas d'água.



Figura 23 – Em (1) e (2) *Soft-Start Weg* e Inversor de Frequência *Danfoss* para a bomba M26, e em (3) e (4) *Soft-Start* e Inversor de Frequência, ambos *Danfoss* para bomba M30.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Por se tratar de acionamentos instalados para testes, os mesmos não foram abrigados em painéis, mas provisoriamente ficaram instalados nas paredes próximos ao painel D20 e suas respectivas bombas centrífugas. Passaram-se cabos de ligação do *driver* até o motor para cada tipo de acionamento. Dessa forma, a mudança do tipo de partida da bomba implicava em trocar os cabos de alimentação dos motores em sua própria caixa de ligação. Decidiu-se por essa configuração por julgá-la mais segura, uma vez que do contrário, seria necessário trocar o tipo de acionamento do motor no painel elétrico, situação essa que acarretava riscos de acidentes (choque elétrico, arco elétrico e campo eletromagnético) para o eletricitista executor da manobra.

Ainda visando segurança, foi montado um painel de força para a instalação dos disjuntores de alimentação dos novos inversores de frequência e *soft-start*'s. No APEDICE D encontra-se o *layout* do painel de força instalado para a comutação dos tipos de partida das bombas, bem como a listagem do material utilizado. O referido painel foi identificado como Painel D20.1, e no APÊNDICE F é possível visualizar a localização do mesmo. A Figura 24 mostra o Painel D20.1, montado, instalado e em operação no SAA.

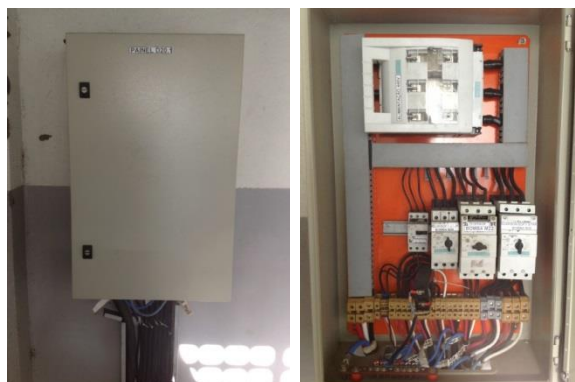


Figura 24 – Painel D20.1: Acionamento dos *drivers* eletrônicos.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Outra preocupação durante a comuta dos tipos de partidas foi com a instalação dos TC's de medição. Na alimentação do motor para acionamento com partida direta ou *soft-start*, o TC ficava instalado na caixa de ligação do motor. Assim, para trocar de partida direta para *soft-start*, por exemplo, era necessário retirar o TC que estava no cabo da partida direta e colocá-lo no cabo do *soft-start*, respeitando fielmente a fase e o sentido de leitura da corrente do motor.

No entanto, para a alimentação do motor para acionamento com inversor de frequência, a configuração era diferente. Por exemplo, na permuta da partida direta ou *soft-start* para inversor de frequência, o TC não poderia ficar na caixa de ligação do motor. Isso acontece porque em se tratando de inversor de frequência, a saída da alimentação do inversor para o motor sofre modulação de tensão na qual interfere na medição do TC. Consequentemente tal interferência influencia na medição do transdutor que envia os sinais de energia elétrica para o *Smart 32*.

Se a instalação estiver incorreta, o *Smart 32* fará leitura de energia com variação de potência ativa, alterando o sinal da potência ativa em positivo e negativo, e nesse caso o *Smart 32* não calculará a potência real do motor. Assim, para evitar a modulação da tensão, o TC deve ficar instalado na alimentação do inversor de frequência.

A priori essa advertência quanto ao ponto correto para a instalação do TC em inversores de frequência não era conhecida. A situação somente foi percebida quando foram verificados os resultados destoantes de consumo de energia elétrica das bombas M26 e M30 com acionamento com inversor de frequência. Os dados mais alarmantes foram os valores de consumo de energia elétrica registrados quando o controle da bomba exigia variação de frequência, como no caso do controle PID da bomba M30. Os resultados de consumo de energia elétrica com inversor de frequência ficaram em torno de 80 a 94% menor do que o consumo com uso de *soft-start* e partida direta.

Esses resultados fizeram com que a instalação fosse tecnicamente analisada. Então, foi utilizado como parâmetro a instalação do conjunto TC/Transdutor dos motores do forno e exaustor do forno, que operam com inversores de frequência e são monitorados pelo *Smart 32*. Unindo o conhecimento da instalação das outras cargas do processo com a teoria de funcionamento do inversor de frequência, foi possível identificar onde estava a falha e realizar a instalação correta. Porém infelizmente, as medições de energia elétrica de cerca de 30 dias tiveram que ser desconsideradas, devido não representarem valores de consumo reais.

Como comentado na seção 3.3.2 (p. 68), ficou de fora dessas análises a bomba M22, devido recomendações do fabricante da bomba. Porém, vale ressaltar que estava disponível

um inversor de frequência de 22 kW para a aplicação na mesma, inclusive o equipamento chegou a ser instalado no sistema, mas não foi utilizado para acionamento da bomba submersa.

3.4.1.3 CLP SLC500[®] e Painel Controle do SAA

O CLP utilizado na automação do SAA foi o SLC500[®], especificamente o SLC 500 5/05 (1747-L551) cujas características principais estão apresentadas na Tabela 11. A lógica de controle foi implementada no *software* de programação RSLogix500[®] e a linguagem de programação utilizada foi a linguagem *ladder*.

Tabela 11 – Características técnicas do CLP SLC500[®] 5/05 (1747-L551).

Característica	Valor
Memória do Usuário	16K palavras
Número de pontos de E/S	4096 in; 4096 out
Máximo de E/S analógicas (local)	96
Tempo de varredura do programa Kpalavra	0,9 ms
Tempo de varredura de E/S	0,225 ms
Nº Máximo de Chassi	3
Nº Máximo de Módulos de E/S (local)	30
Portas de Comunicação	Ethernet/RS-232
Memória de Backup	Flash
Consumo de corrente para a UCP	1.0A em 5V dc; 200mA em 24V dc

Fonte: Treinamento Rockwell Automation, 1998.

A escolha pelo SLC500[®] 5/05 se justifica tanto pelo mesmo atender todas as características citadas na seção 2.3.2 (p. 50), ou seja, atender as necessidades para a realização desse trabalho, como também por ser o CLP utilizado na maioria das automações existentes na fábrica. Sendo assim, o material necessário para a constituição da arquitetura do CLP era cadastrado na Unidade e possuía peças disponíveis no estoque da fábrica.

A quantidade de entradas e saídas requeridas para a implementação da automação foi de três cartões com Entradas Digitais, um cartão com Entradas Analógicas, um cartão com Saídas Digitais e um cartão com Saídas Analógicas, não sendo necessário o uso de cartões especiais. Ao todo foram utilizados seis cartões de comunicação, mais uma Unidade Central de Processamento (UCP), um *rack* para 10 *slots* e uma fonte de alimentação. A Tabela 12 apresenta as referências e observações quanto à instalação e capacidade de sinais de cada bloco utilizado na arquitetura do CLP do SAA.

Tabela 12 – Dados de referência e observações quanto à instalação e capacidade dos blocos que constituem a arquitetura do CLP500®, utilizado na automação do SAA.

BLOCO	REFERÊNCIA	OBSERVAÇÕES SOBRE A INSTALAÇÃO E CAPACIDADE
Fonte de Alimentação	1746-P1	Instalada no <i>Rack</i> do CLP.
UCP	1747-L551 B/C	Possui portas de comunicação RS 232 e Ethernet. Instalada no <i>slot</i> 0 do <i>rack</i> .
Módulos de Entrada e Saída (E/A)		
Módulo de Entradas Digitais	1746-IM16	Foram utilizados 3 Módulos de ED, localizados nos <i>slots</i> 1, 5 e 6. Cada Módulo de ED possui capacidade para receber 16 sinais discretos, totalizando 48 entradas discretas.
Módulo de Entradas Analógicas	1746-NI8	Foi utilizado 1 módulo de EA, sendo instalado no <i>slot</i> 3. O Módulo de EA possui capacidade para 8 sinais de entrada analógicos.
Módulo de Saída Digital	1746-OW16	Foi utilizado 1 módulo de SD, sendo instalado no <i>slot</i> 2. O Módulo de SD possui capacidade para 16 sinais de saída discretos.
Módulo de Saída Analógico	1746-NO8I	Foi utilizado 1 módulo de SA, sendo instalado no <i>slot</i> 4. O Módulo de SA possui capacidade para 8 sinais de saída analógicos
<i>Rack</i>	1756-A10	Foi instalado no Painel CLP com capacidade para 10 <i>slots</i> .

Fonte: Autoria própria, 2013.

O CLP foi montado num painel elétrico identificado como Painel de Controle do SAA, cujo *layout* e lista de materiais encontra-se no APÊNDICE E. Como o Painel do CLP concentra todos os sinais de entrada e saída, optou-se a instalação do mesmo próximo aos painéis de acionamento das bombas, os painéis D20 e D20.1. No APÊNDICE F é possível identificar a localização exata do Painel de Controle do SAA, que seguiu fielmente o padrão da automação utilizada na fábrica. Assim, os sinais de saída passam por relés de 24Vcc para o comando das cargas, enquanto que os sinais de entrada passam pelos fusíveis de proteção com capacidade de 0,5A. A Figura 25 mostra o Painel de Controle do SAA montado, instalado e em operação no Sistema de Abastecimento de Água.



Figura 25 – Painel de Controle do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A princípio havia sido planejado utilizar o CLP em uso no Sistema de Combate a Incêndio, porém não foi possível devido à necessidade de comprar cartões de entrada e saída para montar um painel de remotas do tipo *Flex I/O*. O custo desse material é expansivo e por se tratar de um estudo, não se justificaria a compra.

Por fim, lembrando a antiga arquitetura do comando e controle do SAA, descrita na seção 3.2.1 (p. 62), é importante destacar que a mesma foi desinstalada. Os *LOGO's*[®] que constituíam a UADC foram desativados e o Painel D20 permaneceu somente com a parte de força das partidas diretas e *soft-start* das bombas. Nada mais de comando e controle depende do Painel D20, e a derivação do mesmo é o Painel D20.1. Fisicamente foi feita uma transformação na sala de Comando e Controle das Bombas do SAA. O *layout* apresentado no APÊNDICE F mostra a disposição física de toda a instalação nova realizada (novos painéis e *drivers*). A Figura 26 mostra uma visão geral das novas instalações.



Figura 26 – Visão geral das instalações dos novos painéis e *drivers* do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

O que ainda permaneceu no sistema automático precedente foi a Unidade Dedicada onde foram mantidos os relés de eletrodo para o controle da cisterna, bacia de refrigeração, caixa geral e caixa dos escritórios, e a Unidade Terminal Remota.

Porém, a função das botoeiras de comando da UTR foi modificada. As botoeiras que faziam a seleção de qual bomba (principal ou reserva) iriam operar foi desabilitada, e as botoeiras de liga e desliga somente são habilitadas quando o operador seleciona o modo de operação manual-local no supervisório.

Já os amperímetros analógicos somente sinalizam a corrente dos motores quando o acionamento dos mesmos está com partida direta. Fora isso, não existe nenhuma sinalização de corrente e todo o funcionamento do SAA fica monitorado pelo supervisório instalado na portaria da fábrica.

3.4.1.4 Sensor de Nível Analógico

Com o objetivo principal de atender a solução proposta na seção 3.3.3 (p. 70), instalou-se na caixa geral um sensor de nível analógico. Esse material foi adquirido exclusivamente para a realização desse trabalho, pois a fábrica não possuía esse tipo de sensor instalado em nenhum processo de controle.

A escolha do tipo do sensor foi feita através de consultas com fabricantes sobre os instrumentos disponíveis para medição de nível de água em reservatórios de médio e grande porte. Assim, foi adquirido o sensor de pressão submersível com alcance de medição entre 0 a 1 bar, do fabricante IFM.

As características técnicas desse sensor são: ligação a 2 fios, tensão de operação de 10 a 30V_{DC}, sinal analógico de 4 a 20mA e condutor de ligação de 15m. O sensor é de aço inoxidável e possui um tubo capilar para compensação da pressão na qual pode ser retirado. A Figura 27 mostra o sensor de pressão submersível modelo PS3417 da IFM utilizado para medição do nível de água da caixa geral.



Figura 27 - Sensor de pressão submersível utilizado para a medição do nível de água da caixa geral.

Fonte: Catálogo IFM em Germany, 2008.

A instalação desse sensor é simples, o mesmo é guiado dentro da caixa d'água através de uma haste de ferro e seu condutor de ligação fixado por meio de abraçadeiras de nylon em todo o corpo da haste. Na extremidade de ligação do cabo ao sensor foi anexado um peso adicional para evitar o deslocamento do sensor dentro da caixa d'água.

O cabo de ligação do sensor possui 15m, e a distância da caixa geral até o Painel de Controle do CLP é em torno de 300m. Por isso, foi preciso emendar ao cabo de ligação do sensor um cabo par trançado sem blindagem, instalado em eletroduto de PVC, ligando o sensor dentro da caixa geral até o CLP do SAA. A Figura 28 mostra o desenho esquemático da instalação do sensor de pressão submersível, recomendado pelo fabricante IFM.

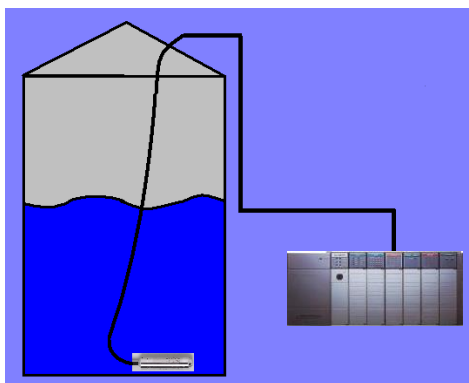


Figura 28 – Desenho esquemático da instalação do sensor de pressão submersível, recomendado pelo fabricante IFM.

Fonte: Adaptação própria, a partir de esquema fornecido pelo fabricante IFM, 2013.

De forma geral, verificou-se que a instalação de um sensor que indicasse o nível real da caixa d'água foi à melhoria mais significativa para o SAA. Um investimento no valor de R\$1.527,00 (custo do sensor) permitiu aumentar a confiabilidade do sistema, evitando desperdícios de energia elétrica e de água. Além desses benefícios, obteve-se ainda, com a instalação do sensor analógico, a possibilidade de implementações de controles com variação de nível, variação de vazão e PID, que foram fundamentais para a realização das análises de eficiência energética no SAA.

3.4.1.5 Válvula Eletropneumática

A instalação da válvula automática para a realização da “manobra d'água” citada na seção 3.3.4 (p. 72), consistiu na alimentação do comando eletropneumático e o desenvolvimento da lógica de controle no CLP.

A referida válvula já estava instalada na tubulação de abastecimento de água do poço para a cisterna, porém devido à distância superior a 500m entre a portaria e a localização da válvula, o comando para operação da mesma ainda não tinha sido realizado.

Com a automação, o controle do SAA passou a ser centralizado na casa de bombas d'água, eliminando assim o problema com a distância e facilitando a alimentação do comando eletropneumático da válvula. A Figura 29 mostra a válvula eletropneumática que foi colocado em operação.



Figura 29 – Válvula eletropneumática para a manobra de abastecimento de água do poço para a caixa dos escritórios.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A válvula possui dois sensores de contato que indicam abertura e fechamento, onde informam para o supervisor se a posição da válvula está aberta ou fechada. Para manter o ar comprimido na linha, foi instalado um compressor dedicado para a válvula.

3.4.1.6 Rede de Automação

A Rede de Automação do SAA utiliza o protocolo *Ethernet/IP* e sua arquitetura está demonstrada na Figura 30.

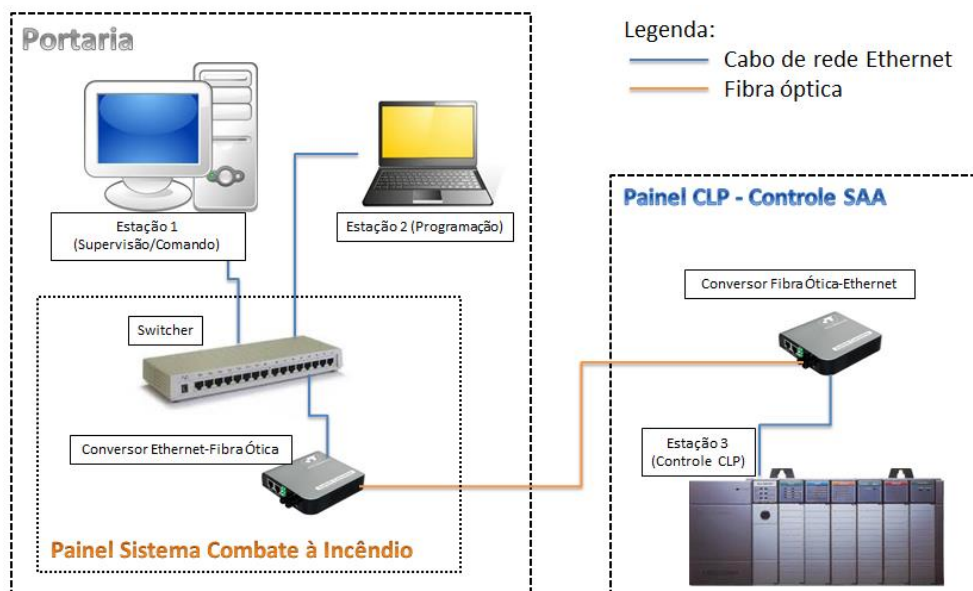


Figura 30 – Arquitetura da rede de automação do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Conforme apresentado na Figura 30 a rede de automação do SAA é constituída de duas estações de trabalho localizadas na portaria da fábrica e que se comunicam via rede *Ethernet* com o Pannel de Controle do CLP, localizado na casa de bombas.

A Estação 1 se refere ao computador da portaria onde é realizada a supervisão e o comando do SAA, do Sistema de Combate ao Incêndio (SCI) e do sistema de controle dos portões de acesso à fábrica. A Estação 2 é referente ao computador da manutenção elétrica, onde foi desenvolvida a lógica de controle do CLP e o Sistema Supervisório. Ambas as estações possuem instalado o Sistema Supervisório *RSView32*[®] e o *RSLgix500*[®]. A Estação 3 é a estação de controle e se refere ao CLP *SLC500*[®].

A distância entre a Portaria e a Casa de Bombas D'Água é cerca de 500m, dessa forma o meio físico de transmissão, inicialmente via Cabo Par Trançado Blindado (*Shielded Twisted Pair* (STP)), foi convertido em fibra ótica e vice-versa. Assim a comunicação entre as Estações 1 e 2 e a Estação 3 é feita via cabo STP e fibra ótica.

A comunicação do sistema foi feita através do conversor de mídia *Ethernet/Fibra Ótica* e vice-versa, instalados nos Pannel de Controle do SAA e no Pannel do Sistema de Combate ao Incêndio, conforme mostrados na Figura 30. Junto aos conversores de mídia foram instaladas as caixas de fusão da fibra ótica. Segue na Figura 31 a imagem do conjunto descrito e instalado no Pannel de Controle do SAA.

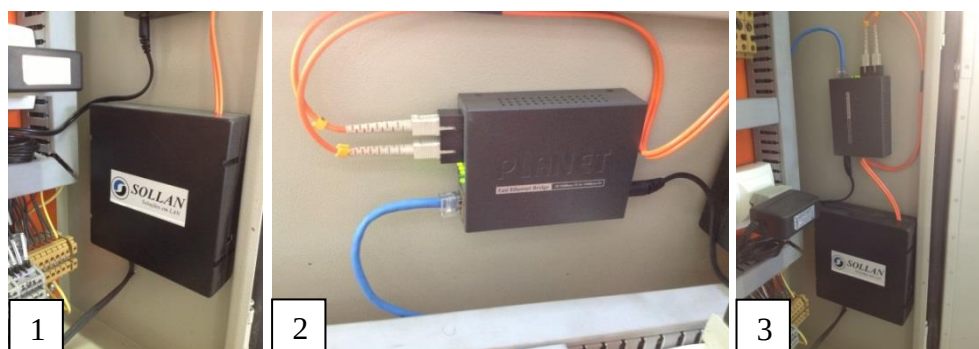


Figura 31 – Equipamentos para a comunicação do sistema: (1) caixa de fusão da fibra ótica, (2) conversor de mídia *Ethernet/Fibra Ótica*, e (3) Layout do conjunto instalado no Pannel de Controle do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

O conjunto caixa de fusão e conversor de mídia instalados na portaria foi alocado dentro do Pannel de Controle do SCI, assim como o *Switcher* de distribuição do sinal *Ethernet/IP*.

3.4.2 Projeto do Programa *Ladder* do SAA

De acordo com Moraes e Castrucci (2013, p. 195), o Projeto do Programa *Ladder* de Automação é a fase do projeto onde se elabora o programa do CLP que visa não somente realizar a operação do processo, mas também facilitar a partida real (*start-up*), a manutenção e qualquer aperfeiçoamento futuro.

Para o desenvolvimento do projeto de automação do SAA adotou-se a Abordagem Estruturada apresentada por Moraes e Castrucci (2013, p. 195). Nessa abordagem a palavra chave é estruturação que significa decomposição em subprogramas, regras de segurança em cada programa e rotina de cópia de variáveis de entrada e saída, para variáveis internas.

Assim, o Programa do CLP foi estruturado em vinte e seis subprogramas associados às etapas do processo e aos grupos de equipamentos com as mesmas funções no sistema. Aplicou-se o critério de agrupar equipamentos, sensores, seleção de controles, seleção de motores, seleção de métodos de medição para a análise de EE, tipos de variáveis, entre outros, em subprogramas específicos. Para alguns casos, com foco nas regras de segurança, ao invés de agrupar, fez-se individualizar. Foi o caso dos subprogramas para cada tipo de partida, somente habilitados quando o tipo de partida fosse selecionado.

Os vinte e seis subprogramas que constituem a lógica do programa *ladder* do SAA denominado de AUT_SAA, podem ser divididos em dois grupos: subprogramas para a operação e supervisão do processo e subprogramas para medições de grandezas elétricas para as análises de eficiência energética. Assim, até o subprograma identificado como vigésimo, incluindo o vigésimo quinto e o vigésimo sexto, a lógica de controle está voltada para a operação e o controle do SAA, os demais foram desenvolvidos para as medições de eficiência energética do sistema.

Segue na Tabela 13 a descrição sucinta da função e lógica de programação de cada subprograma do AUT_SAA. Para facilitar a entendimento dos subprogramas os mesmos estão denominados pelas TAG's definidas no Projeto.

Tabela 13 – Descrição sucinta dos programas e subprogramas do Projeto AUT_SAA.

TAG Programa	Descrição da função e lógica de programação
LAD 2 - GERAL	Programa principal, responsável pela habilitação e chamada de todos os subprogramas. É responsável também pela configuração dos cartões analógicos de entrada e saída, e temporização da seleção dos tipos de partida.
LAD 3 - NÍVEL ÁGUA	Subprograma onde foram agrupados os relés de eletrodos dos reservatórios de água: poço, cisterna, bacia de refrigeração, caixa geral e caixa dos escritórios. É responsável pelo controle dos eletrodos, e a lógica de controle é idêntica àquela empregada no <i>LOGO</i> [®] , porém escrita em linguagem <i>ladder</i> .

TAG Programa	Descrição da função e lógica de programação
LAD 4 - SEL_OPERAC	Subprograma responsável pela seleção do modo de operação das bombas centrífugas se a principal ou reserva (M24, M26, M28 e M30), e bomba submersa (M22). Os modos de operação são: automático ou manual. Para o modo manual é necessário definir se a operação será em manual remoto ou em manual local.
LAD 5 - TIPO_PART	Subprograma responsável pela seleção do tipo de partida das bombas centrífugas principais (M26 e M30) e bomba submersa (M22). As seleções dos tipos de partida são: partida direta, <i>soft-start</i> e inversor de frequência. Exceto a bomba submersa M22 que possui a opção somente de <i>soft-start</i> ou inversor de frequência.
LAD 6 - SS_M22, e LAD 7 - IF_M22	Subprogramas responsáveis pela operação da bomba submersa M22 ora com tipo de partida <i>Soft-Start</i> (LAD 6), ora com tipo de partida Inversor de Frequência (LAD 7). Apresenta a lógica de controle semelhante à lógica empregada no LOGO [®] mostrada na seção 3.2.2 (p. 64), porém escrita em linguagem <i>ladder</i> . O acionamento da bomba M22 é controlado pelo nível da cisterna e da caixa dos escritórios, e ainda da manobra da válvula eletropneumática.
LAD 8 – PD_M26, LAD 9 – SS_M26, e LAD 10 – IF_M26	Subprogramas responsáveis pela operação da bomba centrífuga M26 com tipo de partida Direta (LAD 8), ou <i>Soft-Start</i> (LAD 9), ou Inversor de Frequência (LAD 10). Apresenta a lógica de controle semelhante à lógica empregada no LOGO [®] apresentada na seção 3.2.2, porém escrita em linguagem <i>ladder</i> .
LAD 11 – PD_M30, LAD 12 – SS_M30, e LAD 13 – IF_M30	Subprogramas responsáveis pela operação da bomba centrífuga M30 variando os tipos de partida em Direta (LAD 11), <i>Soft-Start</i> (LAD 12) e Inversor de Frequência (LAD 13). Apresenta a lógica de controle semelhante à lógica empregada no LOGO [®] demonstrada na seção 3.2.2, porém escrita em linguagem <i>ladder</i> , entretanto com a particularidade de duas opções de controle, uma através do controle digital e a outra, pelo controle analógico. No caso da seleção do controle analógico e acionamento da bomba através do inversor de frequência existe ainda, a possibilidade de três formas de controle: digital, analógico e PID.
LAD 14 - ANALÓGICO	Subprograma onde foram agrupadas as variáveis de entrada analógicas. Essas variáveis incluem: nível dos reservatórios (sensores de pressão submersível), rotação das bombas e corrente das bombas (sinal dos inversores de frequência).
LAD 15 - VÁLVULA	Subprograma responsável pela operação da válvula eletropneumática vista na seção 3.4.1.5 (p. 88). Nesta lógica é selecionado o modo de operação da válvula em automático ou manual. Quando em automática a válvula obedece aos sinais dos sensores de nível selecionados para o controle dos reservatórios da cisterna e/ou caixa dos escritórios. Quando em manual, a válvula é operada pelo comando no supervisão.
LAD 16 – PD_M24, e LAD 17 – PD_M28	Subprogramas responsáveis pela operação das bombas centrífugas reservas M24 e M28, ambas com tipo de partida Direta. A lógica de controle é idêntica às lógicas de operação das bombas M26 e M30, descritas nos subprogramas LAD 8 e LAD 11, respectivamente, porém considerando somente a partida direta.
LAD 18 – SEL_BOMBAS	Subprograma responsável pela seleção de qual das bombas centrífugas irá operar: principal ou reserva.
LAD 19 - PID	Subprograma responsável pelo controle PID da bomba M30. Nessa lógica foram agrupados os sinais analógicos de saída das bombas correspondente ao <i>Set Point</i> de referência para a rotação dos motores. O controle PID é feito através da função PID do RSLogix500 [®] e a lógica de controle consiste, de forma sucinta em: ativar o Bloco PID para o modo automático; enviar o valor da variável de processo (PV) referente ao nível da caixa geral; enviar o valor do <i>Set Point</i> (SP) que corresponde ao nível da caixa geral desejado; informar os valores das constantes Proporcional, Integral e Derivativo; e enviar o endereço da variável controlada (CV) referente a rotação do inversor de frequência da bomba M30.

TAG Programa	Descrição da função e lógica de programação
LAD 20 – SEL_CONT_L	Subprograma responsável pela seleção do tipo de controle dos reservatórios de água. No caso, foi desenvolvida a lógica de controle considerando a instalação de sensores analógicos para todos os reservatórios, porém a princípio, somente foi instalado o sensor analógico para a caixa geral, assim os demais reservatórios somente possuem o controle feito pelos eletrodos que indicam nível baixo ou alto, e os sensores tipo boia que sinalizam nível “super” baixo.
LAD 21 - CONTADORES	Subprograma responsável pela contagem do número de partidas das bombas, número de manobras da válvula eletropneumática e habilitação das variáveis responsáveis pelo registro das medições dos números de partidas e tempos de funcionamento das bombas. Os valores contabilizados nas variáveis desse subprograma são movidos para o subprograma LAD 24.
LAD 22 – MED_TEMPO	Subprograma responsável pela contabilização do tempo de funcionamento das bombas. Os valores registrados nas variáveis desse subprograma são movidos para o subprograma LAD 24.
LAD 23 - MED_NÍVEIS	Subprograma desenvolvido para contar o tempo de enchimento e esvaziamento da caixa geral, com a possibilidade de ajuste de qualquer configuração para valores de nível máximo e mínimo, e rotação da bomba M30.
LAD 24 – MED_AUT	Subprograma responsável pela configuração da medição com variação de nível e tipo de partida. Este programa realiza as medições automáticas do número de partida das bombas (M22, M26 e M30) e o tempo de funcionamento total das mesmas, para cada ciclo de medição. Os valores do número de partidas e o tempo de operação são contabilizados nos subprogramas LAD 21 e LAD 22, respectivamente, e os resultados são movidos para o subprograma LAD 24 e visualizados nas telas de resultados do supervisão. O LAD 24 é configurável para até quatro ciclos de medições. Esses ciclos podem ser: de 6 horas (0 às 6, 6 às 12, 12 às 18, e 18 às 24 horas); 24 horas (quatro dias consecutivos) ou a definir (definir data e hora da medição). Independentes do ciclo de medição selecionados, no horário específico para o término da medição são memorizados os valores das variáveis: dia, mês, número de partidas tipo direta e tempo de funcionamento das bombas M26 e M30, número de partidas com <i>soft-start</i> e tempo de funcionamento das bombas M22, M26 e M30, número de partidas com inversor de frequência e tempo de funcionamento das bombas M26 e M30, e número de manobras da válvula eletropneumática.
LAD 25 – CONSUMO EE	Subprograma responsável pela medição do consumo de energia elétrica das bombas M30 e M26. Este subprograma foi desenvolvido apenas para acompanhamento, pois os valores registrados não foram utilizados para a realização das análises de eficiência energética. Os valores de consumo de energia elétrica validados foram os valores registrados pelo <i>Smart 32</i> .
LAD 26 – CONS_AGUA	Subprograma responsável pela quantificação do consumo de água do poço. Na tubulação da bomba submersa do poço, existe instalado um hidrômetro analógico que envia um pulso elétrico digital para cada 100 litros de água bombeada. Assim, dependendo da posição da válvula eletropneumática, se aberta para a alimentação da cisterna, ou fechada para a alimentação da caixa dos escritórios, o pulso enviado pelo hidrômetro será adicionado as variáveis que registram o consumo total e o consumo diário de água da cisterna e da caixa dos escritórios.
LAD 27 – MED_1 HORA	Subprograma desenvolvido especificamente para a variação do tipo de controle da bomba M30, e dependendo de qual controle selecionado permite a configuração de outras variáveis. Os tipos de controle são: analógico, digital e PID. Para o controle analógico é configurável os valores de nível máximo e mínimo da caixa geral e a frequência de rotação da bomba M30. No caso do controle digital, somente é configurável a rotação da bomba M30. E, por fim, para o controle PID se configura o SP do nível da caixa geral.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A implantação da automação consistiu em duas etapas, a primeira ocorreu com a conclusão das instalações de *hardware* vistas na seção 3.4.1 (p. 78), e dos subprogramas voltados para a operação e controle do processo. As instalações e testes foram realizados utilizando a estação de programação conectada diretamente no CLP instalado no Painel de Controle do SAA, apresentado na seção 3.4.1.3 (p. 84). Após a conclusão da rede de automação, vista na seção 3.4.1.6 (p. 89) o sistema foi liberado para operação na portaria e os vigilantes e eletricista foram devidamente treinados para utilizá-lo.

Concluída a primeira etapa, seguiu-se para a segunda etapa que consistiu na criação dos subprogramas relacionados às medições de eficiência energética. Com os subprogramas concluídos e em execução foram feitas as análises que serão tratadas no Capítulo 4.

Na seção 3.4.3 será apresentado o programa do supervisório e nesse inclui a demonstração das telas que interfaceiam os comandos e controles realizados pelos subprogramas descritos na Tabela 13 desta seção.

3.4.3 Projeto do Programa Supervisório

O Projeto do Programa Supervisório foi desenvolvido na plataforma do *RSView32*[®] e seguiu as nove etapas sugeridas por Moraes e Castrucci (2013, p. 135). A primeira etapa trata do entendimento do Processo de Abastecimento de Água da fábrica já descrito na seção 3.1 (p. 56). Em seguida fez-se o levantamento das oportunidades de melhoria no sistema em funcionamento, conforme verificado na seção 3.3 (p. 67), e juntando esses dois estudos foram definidos como seria o Programa Supervisório do SAA.

A segunda, terceira e quarta etapas do projeto, correspondem respectivamente as Variáveis do Processo, Planejamento da Base de Dados e Alarmes, foram dedicadas ao planejamento das tag's utilizadas no supervisório. Conforme se ia desenvolvendo as lógicas de controle e operação no CLP, as tag's iam sendo criadas e cadastradas no software do supervisório.

Os alarmes necessários para o controle do sistema foram definidos no momento do cadastro das tag's, e constituíram-se nos seguintes: indicação de nível baixo nos reservatórios, operação das bombas, falhas nas bombas, falha e operação da válvula eletropneumática, entre outros. Vale destacar que se conservaram todos os alarmes contidos no antigo sistema de controle, vistos na seção 3.2.3 (p. 65).

As etapas correspondentes à quinta (Planejamento da hierarquia de navegação entre telas), sexta (Desenho das telas) e sétima (Gráficos de tendências) do projeto são aquelas que permanecem em construção e melhoria contínua, e consistiram na criação das telas responsáveis pela Supervisão, Controle e Análises de Eficiência Energética do Sistema Supervisório.

As telas foram desenvolvidas utilizando as ferramentas disponíveis na função *Graphics* do *RSView32*. Utilizou-se o diretório *Display* para a gravação das telas e para o desenvolvimento gráfico foram utilizadas figuras do diretório *Library* e outras importadas do *layout* do SAA. Assim, para a supervisão, controle e análises do SAA foram criadas vinte e sete telas classificadas nas seguintes categorias:

- Controle: telas responsáveis pela operação e controle do processo;
- PID: tela especial de controle responsável pela parametrização e acompanhamento do *set-point* e das variáveis de controle e controlada do PID;
- Gráficos: telas responsáveis pelo monitoramento das grandezas do processo;
- Energia: telas responsáveis pelo monitoramento das grandezas elétricas;
- Medições: telas responsáveis pela parametrização das medições para as análises de eficiência energética;
- Resultados: telas responsáveis pelos resultados das medições e simulações de EE;

Todas as telas apresentam em tempo real as informações advindas dos sensores digitais e analógicos, e dos circuitos elétricos correspondentes aos tipos de partidas: direta, *soft-start* e inversor de frequência. Nas seções seguintes serão apresentadas com brevidade as telas desenvolvidas para o SAA, agrupadas de acordo com suas categorias.

3.4.3.1 Telas de Controle e Operação:

Para a realização do controle e a operação do SAA foram desenvolvidas dez telas, sendo elas: “Tela Principal SAA”; “Operação Bombas”; “Operação M22”; “Operação M24”; “Operação M26”; “Operação M28”; “Operação M30”; “Operação Válvula”; “Consumo Água”; e “Controle Níveis Reservatórios”.

A principal tela de controle é aquela nomeada de “Tela Principal SAA”, que contém o desenho esquemático do processo e seus elementos de controle tais como os reservatórios de

água, válvula de manobra e bombas d'água. Possui um *link* para abertura das telas secundárias responsáveis pela monitoração, configuração e detecção das falhas dos elementos de controle correspondentes.

A Figura 32 mostra a “Tela Principal SAA” que é à base do sistema e somente é fechada quando o supervisor recebe o comando de confirmação para parar o projeto, através do botão “STOP”, essa anuência somente é permitida aos usuários autorizados. Todas as demais telas do sistema são abertas sobre a “Tela Principal do SAA”, sendo elas secundárias e correspondem à solicitação do operador.

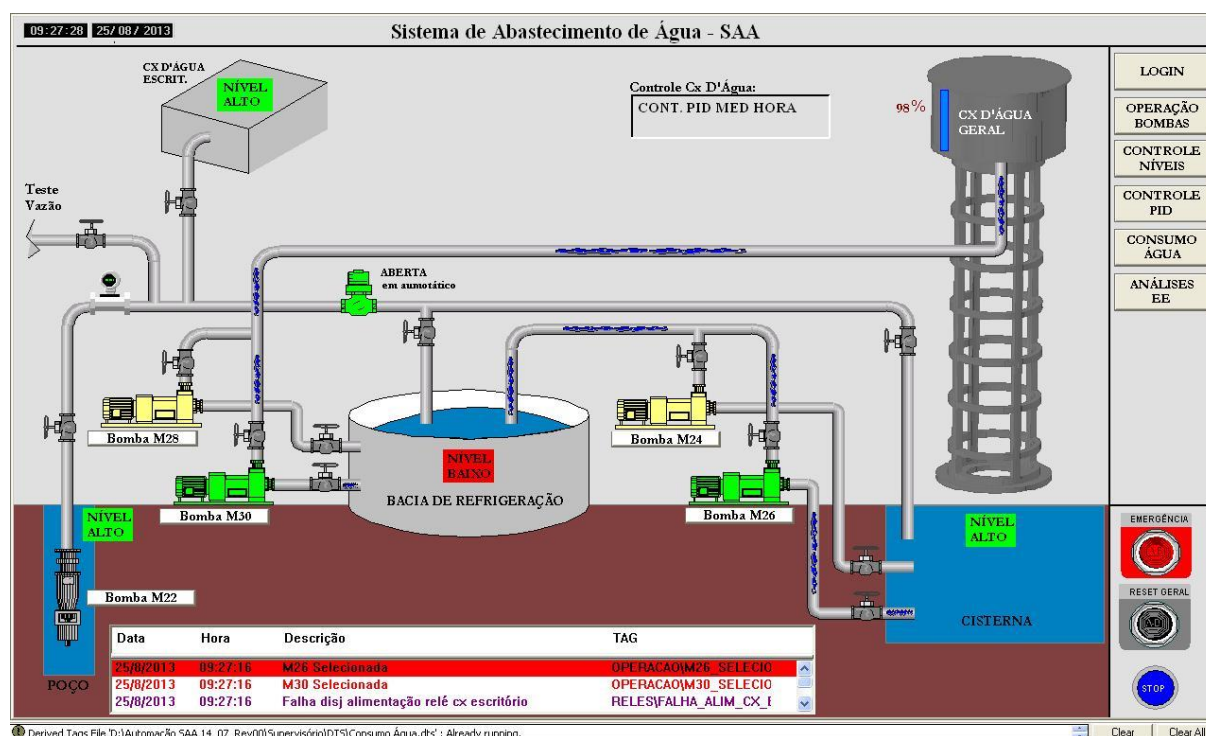


Figura 32 - Tela Principal do SAA.

Fonte: Autoria própria, 2013.

As telas “Operação M22”, “Operação M24”, “Operação M26”, “Operação M28”, e “Operação M30”, possuem a mesma formatação e são responsáveis pela indicação do modo de operação, tipo de partida e diagnóstico de defeitos das bombas, servindo de interface para os subprogramas LAD 6 a LAD 11. Cada uma apresenta um *link* para a tela “Operação Bombas” onde é possível à seleção do modo de operação das bombas. A Figura 33 mostra as telas de controle da bomba M26 para os modos de controle automático, manual-remoto e manual-local e os tipos de partida: inversor de frequência, direta e *soft-start*, respectivamente.



Figura 33 – Tela “Operação M26”. (1) Operação em automático com Inversor de Frequência; (2) Operação em manual-remoto com partida Direta, e (3) Operação em manual-local com partida *Soft-Start*.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A tela “Operação Bombas” é a geral para configuração do tipo de operação das bombas e realiza a *interface* das lógicas de controle dos subprogramas LAD 4, LAD 5, e LAD 18. No caso das bombas M26 e M30, existe a opção de seleção do tipo de partida e também definição de qual bomba operar, se a principal ou a reserva. A Figura 34 apresenta a tela “Operação Bombas”.

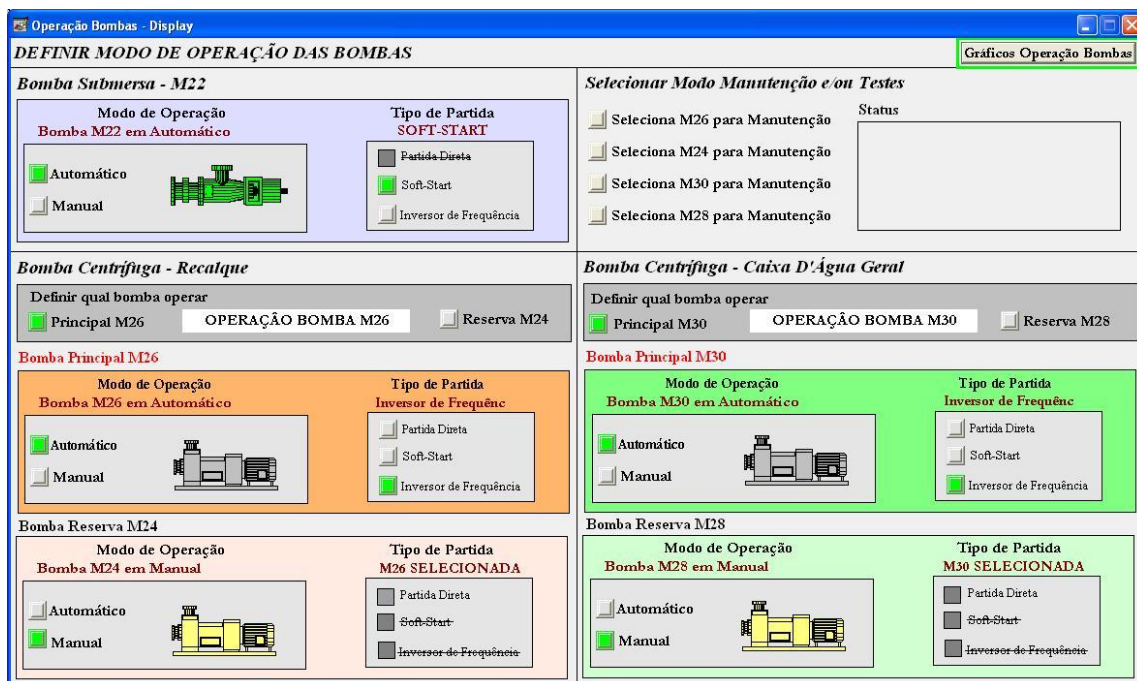


Figura 34 – Tela “Operação Bombas”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Outra tela de relevante importância para o controle do processo é a “Controle Níveis Reservatórios”, *interface* do subprograma LAD 20, e local onde o *Set Point* de nível máximo e mínimo da caixa geral é definido. A Figura 35 apresenta a referida tela.

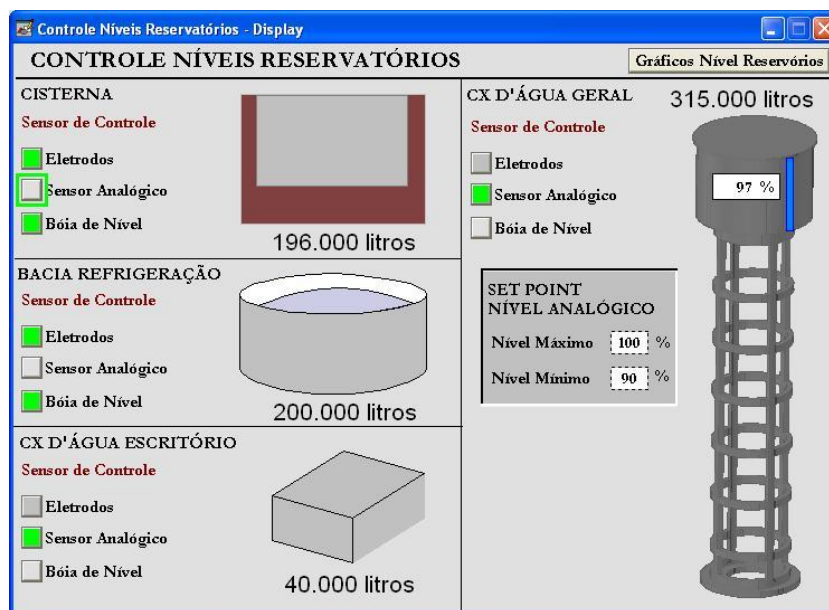


Figura 35 – Tela “Controle Níveis Reservatórios”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Para a realização do controle automático do consumo de água da fábrica foi criada a tela “Consumo Água”, onde são visualizados os consumos de água total (desde o início das medições), do dia corrente e do dia anterior. Cada totalização de consumo é dividida entre cisterna e caixa dos escritórios. A lógica de controle que alimenta esses dados está no subprograma LAD 26. A Figura 36 mostra a tela “Consumo Água”.



Figura 36 – Tela “Consumo Água”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A última tela de operação e controle do processo é a “Operação Válvula”, responsável pela seleção do modo de operação da válvula e o diagnóstico de defeitos, sendo *interface* do

subprograma LAD 15. A Figura 37 mostra duas telas “Operação Válvula”, uma selecionada para automático e a outra para manual.



Figura 37 – Tela Operação Válvula. (1) Operação em automático; (2) Operação em manual.

Fonte: Autoria própria, 2013.

As telas apresentadas nessa seção são interfaces homem-máquina que facilitam a operação do processo diminuindo as possibilidades de falhas.

3.4.3.2 Tela Controle Especial PID

A tela de controle especial “PID” é específica para a parametrização do controlador PID da bomba M30, apresentando o gráfico com a tendência das variáveis de processo (PV), controle (CV) e Set Point (SP) do nível da caixa geral. A Figura 38 mostra a tela “PID”.

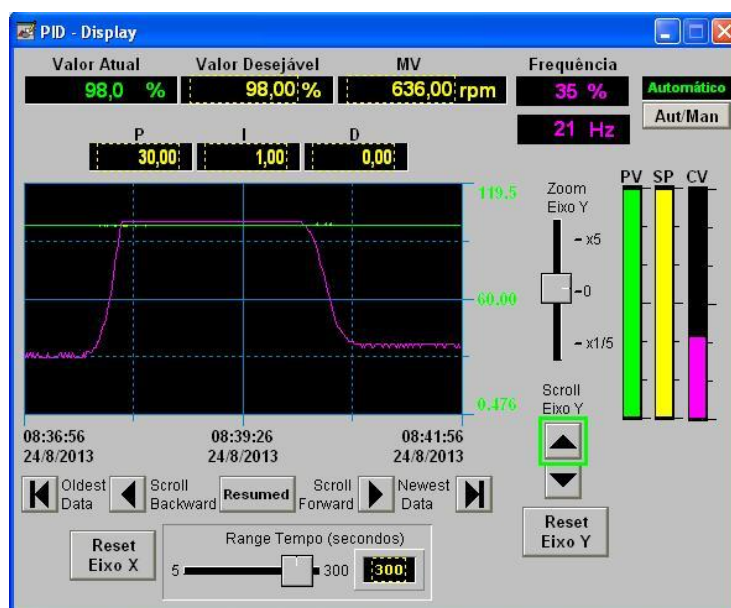


Figura 38 – Tela “PID”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Em “PID” também é possível configurar, a qualquer momento, os valores das constantes proporcional (P), integral (I) e derivativo (D), e também o valor do SP do nível da caixa geral. Existe o botão para seleção do controle PID em automático ou manual, que significa ativado ou desativado, respectivamente. Esses dados de configuração são enviados para o subprograma LAD 19.

3.4.3.3 Telas Gráficas

Para acompanhar as tendências e os históricos das variáveis do processo, foram criadas três telas gráficas que são: “Gráfico Consumo Água”; “Gráfico Nível Reservatório”; e “Gráfico Operação Bombas”. Essas *interfaces* possuem seus *links* nas telas de controle correspondentes.

Em “Gráfico Consumo Água” é apresentado os valores em m³ do consumo de água da cisterna, da caixa dos escritórios, e a totalização de ambos, conforme mostra a Figura 39.



Figura 39 – Tela “Gráfico Consumo Água”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Na Figura 40 tem-se a tela “Gráfico Nível Reservatórios” com a visualização das tendências de enchimento e esvaziamento dos quatro reservatórios de água do SAA.

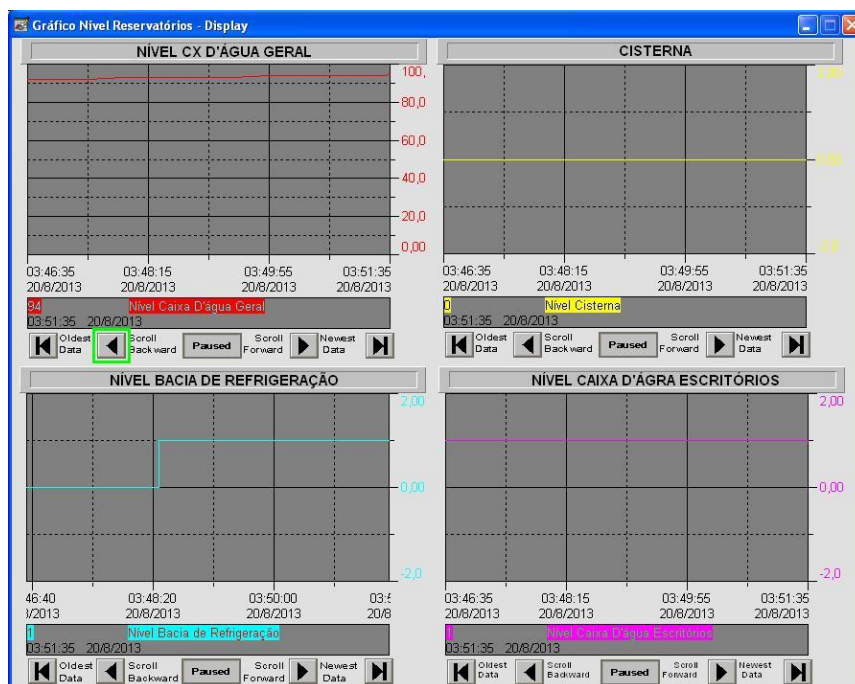


Figura 40 - Tela “Gráfico Nível Reservatórios”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Por fim, a tela “Gráfico Operação Bombas” que mostra as tendências e os históricos de funcionamento das bombas M30, M26 e M22. Sua formatação gráfica é semelhante às telas visualizadas nas Figura 39 e Figura 40.

3.4.3.4 Telas de Medições das Grandezas Elétricas

Para o acompanhamento e monitoração das grandezas elétricas foram criadas duas telas denominadas de “Medições Bomba M26” e “Medições Bomba M30”. Essas apresentam os valores de corrente, rotação e frequência em tempo real, que são enviados pelos inversores de frequência para o CLP através dos subprogramas LAD 15 e LAD 19. A Figura 41 mostra a tela de medições das grandezas elétricas da bomba M30.

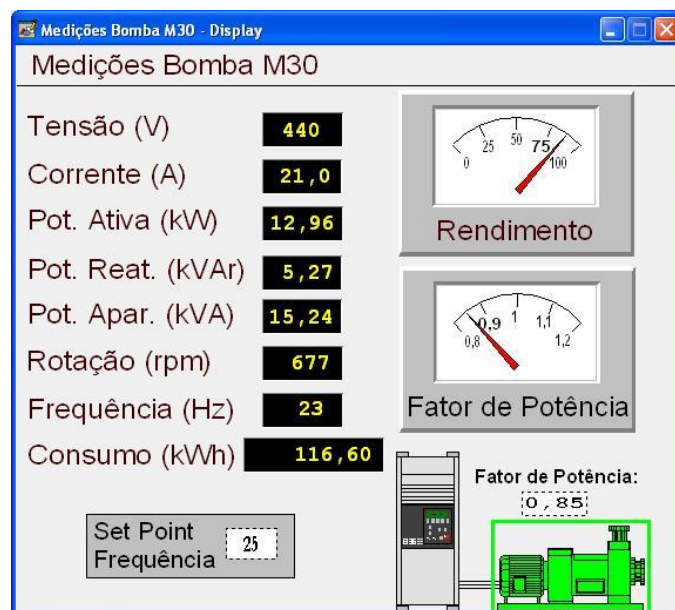


Figura 41 – Tela “Medições Bomba M30”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Entretanto, vale destacar que as referidas telas foram criadas somente para acompanhamento do sistema, pois os valores utilizados para análise de Eficiência Energética do SAA foram extraídos do *Smart 32*, conforme comentado na seção 2.3.4 (p. 53).

3.4.3.5 Telas de Medições e Resultados

Para a realização das medições de consumo de energia elétrica descritas na seção 3.5, foram criadas três telas: “Medições Variação Nível e Acionamento”; “Medições Variação Nível e Frequência”; e “Medições Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa Geral”.

Para a análise das medições foram criadas as telas de resultados: “Medição 6 horas”; “Medição 24 horas”; “Medição a definir”; e “Resultados Tempo Enchimento/Esvaziamento Cx Geral”. Essas, juntamente com as medições registradas pelos *Smart 32*, forneceram os dados necessários para a realização das análises de eficiência energética do sistema.

Na tela “Medições Variação Nível e Acionamento”, mostrada na Figura 42, são feitas as configurações necessárias para iniciar as medições de energia com variações dos níveis máximo e mínimo dos reservatórios, e o tipo de acionamento das bombas. A lógica de controle é realizada no subprograma LAD 21.



Figura 42 – Tela “Medições Variação Nível e Acionamento”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Basicamente, os resultados esperados com as medições realizadas na Figura 42 são: número de partidas das bombas, tempo de funcionamento (em horas) para cada partida e número de manobras da válvula. A Figura 43, mostra a tela de resultados para medições no período de 6 horas.

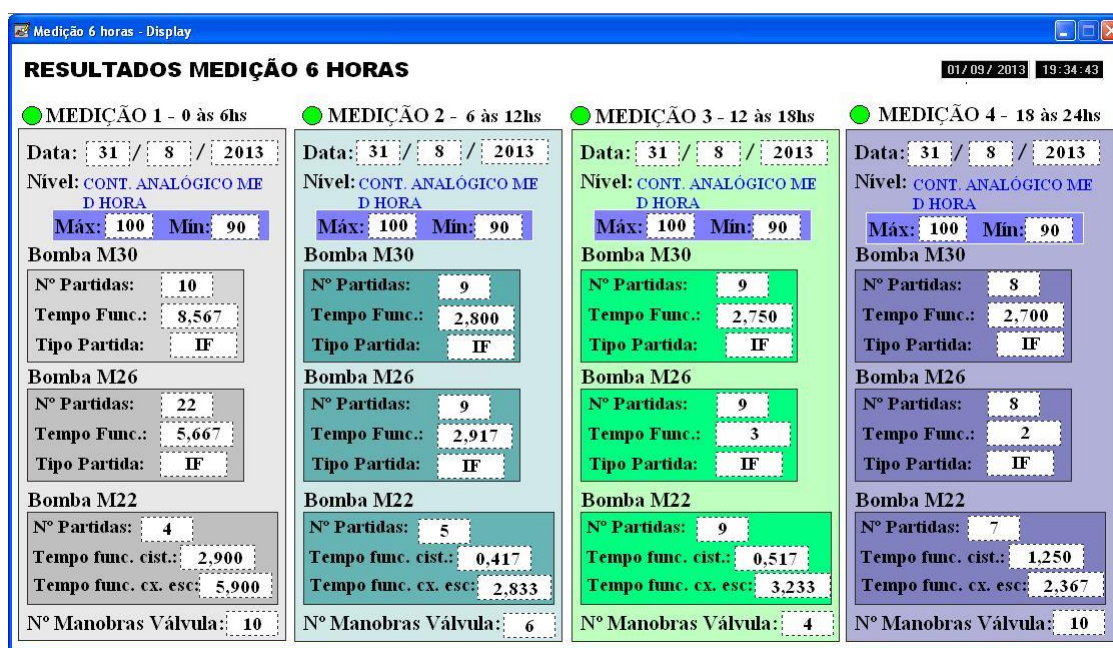


Figura 43 – Tela “Medição 6 horas”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A tela “Medições Variação Nível e Frequência” é a *interface* do subprograma LAD 27, e se destaca por ser toda parametrizável pelo operador do sistema. Possui completa configuração para a medição de consumo de energia elétrica e permite todas as possibilidades de análises. A referida tela não possui *link* com resultados, sendo os valores de consumo de

energia elétrica retirados diretamente do *Smart 32*. A Figura 44 apresenta a tela para as medições com variação de nível da caixa geral e frequência do motor da bomba M30.

MEDIÇÕES VARIAÇÃO NÍVEL E FREQUÊNCIA

Início: 24 / 8 / 2013 18:13 24/08/2013 18:19:46
 Fim: 31 / 8 / 2013 24:00 Nível Real: 98 %

Legenda Controle:
 1 Controle Analógico
 2 Controle Digital
 3 Controle PID

Parametrizar Medições

	Controle	Hora Início	Hora Fim	Nível	PID	Frequência
Med 1	1	0:00	2:00	Min: 90 Máx: 100	SP	60
Med	1	2:00	4:00	Min: 90 Máx: 100	SP	50
Med 3	1	4:00	6:00	Min: 90 Máx: 100	SP	40
Med 4	1	6:00	8:00	Min: 91 Máx: 96	SP	30
Med 5	1	8:00	10:00	Min: 90 Máx: 100	SP	60
Med 6	1	10:00	12:00	Min: 70 Máx: 100	SP	60
Med 7	2	12:00	14:00	Min: Máx:	SP	60
Med 8	2	14:00	16:00	Min: Máx:	SP	0
Med 9	2	16:00	18:00	Min: Máx:	SP	40
Med 10	3	18:00	24:00	Min: Máx:	SP 98	

OBS: Valores do Consumo de Energia Elétrica, retirar do SMART 32.

MEDINDO Iniciar Medição Finalizar Medição

Figura 44 – Tela “Medições Variação Nível e Frequência”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A tela “Medições Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa Geral” é a *interface* do subprograma LAD 23, e permite a realização de seis medições para cada estado de enchimento ou esvaziamento da caixa geral. A Figura 45 mostra a imagem da mesma.

TEMPO ENCHIMENTO/ESVAZIAMENTO CX D'ÁGUA GERAL Nível Real: 98 %

Configuração do Nível Configuração da Frequência

☒ Nível Variável ☐ Nível Constante ☒ Freq. Variável ☐ Freq. Constante

Nível e Frequência Variável

CAIXA ENCHENDO				CAIXA ESVAZIANDO			
Med 1	Min: 70	Máx: 75	Freq: 60	Med 7	Máx: 100	Min: 95	Freq: 60
Med 2	Min: 75	Máx: 80	Freq: 58	Med 8	Máx: 95	Min: 90	Freq: 40
Med 3	Min: 80	Máx: 85	Freq: 55	Med 9	Máx: 90	Min: 85	Freq: 40
Med 4	Min: 85	Máx: 90	Freq: 45	Med 10	Máx: 85	Min: 80	Freq: 40
Med 5	Min: 90	Máx: 95	Freq: 48	Med 11	Máx: 80	Min: 75	Freq: 40
Med 6	Min: 95	Máx: 100	Freq: 45	Med 12	Máx: 75	Min: 70	Freq: 40

Iniciar Medição MEDIÇÃO DESATIVADA Finalizar Medição Resultados Medição

Figura 45 – Tela “Medições Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa Geral”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

A tela “Resultados Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa Geral” também faz a *interface* do subprograma LAD 23, porém a mesma está totalmente direcionada a visualização

dos tempos de enchimento e esvaziamento programados para cada medição configurada na Figura 45. A Figura 46 apresenta a referida tela de resultados.

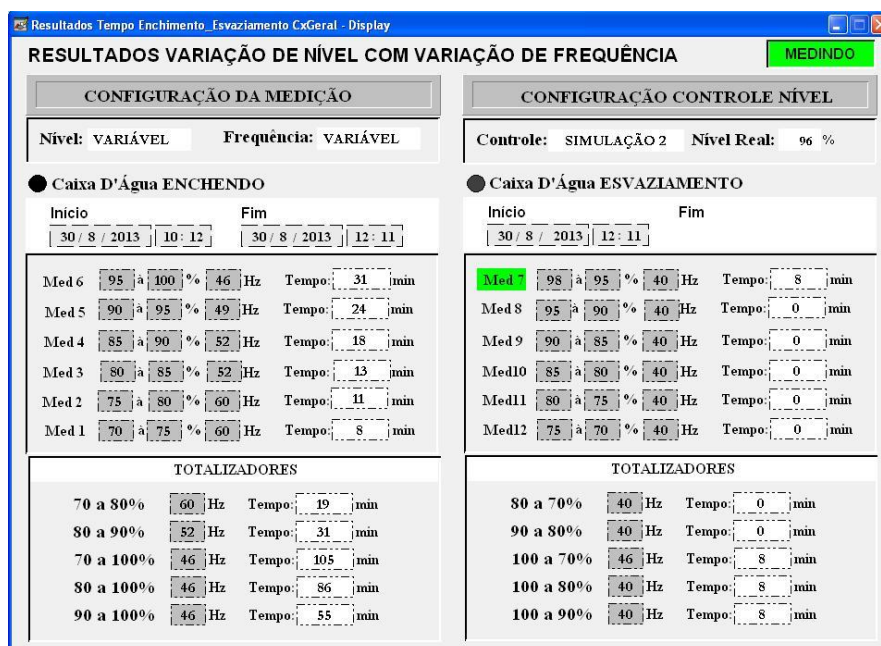


Figura 46 – Tela “Resultados Tempo Enchimento/Esvaziamento Caixa Geral”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Vale destacar que a tela da Figura 46 é somente de leitura, nada podendo ser alterado ou configurado na mesma.

As oitava e nona etapas do Projeto do Programa Supervisório consistiram no Planejamento do Sistema de Segurança, e na adequação ao Padrão Industrial de Desenvolvimento¹⁷.

A Tela Principal do SAA apresenta o botão “EMERGÊNCIA”, que realiza a parada das cinco bombas do sistema. O acionamento desse botão solicita confirmação antes de executar a ação de parada geral das bombas, evitando assim paradas equivocadas no processo.

Ainda na tela principal, é visualizado o histórico da operação do processo, e este sinaliza em cores pré-definidas os estados de alerta do sistema. Quanto ao funcionamento dos motores a padronizado existente seguiu o seguinte código de cores: “verde” funcionando normal; “cinza” parado normal; “amarelo” bomba na condição de reserva; e “vermelho” bomba em falha.

¹⁷ A automação do SAA seguiu os modelos implantados nos processos produtivos de ensacamento/carregamento, torre intercambiadora e moagem de CVP.

Para o caso de falhas gerais no sistema, tais como falta de energia, que provocará a falha em todas as bombas, foi previsto o botão “RESET GERAL” para facilitar o *reset* das falhas e acelerar a normalização do sistema. Esse botão também solicita confirmação para executar suas ações de *reset* ou cancelamento da operação.

Por fim, foi planejado o cadastramento dos operadores com *login* e senha por turno. Assim, sempre que o vigilante inicia seu horário de trabalho deve realizar o *logoff* referente ao turno de trabalho do dia. Essa ação foi realizada para restringir o acesso dos usuários as telas referentes às análises de eficiência energética, controle PID e consumo de água, ficando esse acesso liberado somente aos usuários cadastrados como responsáveis pelas medições de energia elétrica.

Concluído os Projetos do CLP e do Supervisório conforme descrito nessa seção, o sistema implantado ficou pronto para a realização das medições de eficiência energética. A metodologia das medições realizadas está descrita na seção 3.5.

3.5 METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES

Após a implantação do novo sistema automatizado, e estando o mesmo operando e sendo supervisionado pela portaria da fábrica, foram iniciadas as medições necessárias para as análises de eficiência energética propostas nesse trabalho.

Tais medições, à semelhança da implantação da automação, também foram divididas em duas etapas. A primeira etapa abrangeu a análises das três bombas principais e visou responder às duas perguntas referentes à eficiência energética do sistema: (1) Qual o melhor controle para o nível de água nos reservatório?, e (2) Qual o tipo de acionamento das bombas que proporciona menor consumo de energia elétrica?

A segunda etapa foi restritiva à bomba M30, visto que é a mesma que faz o controle da caixa geral onde foi instalado o sensor analógico, e nesta o foco foi responder quatro questionamentos visando eficiência energética: (3) Qual o melhor controle para a bomba consumir menos energia elétrica, mantendo-se a demanda e o uso? (4) Qual o ponto ótimo de vazão da bomba e como essa vazão interfere no consumo de energia elétrica? (5) Qual o melhor controle da bomba no horário sazonal de ponta a fim de diminuir o custo com

consumo de energia?, e (6) Como melhorar o fator de potência da bomba com os recursos de tipo de acionamento aplicados?

Para obter as respostas aos levantamentos feitos em cada etapa, foram desenvolvidas as lógicas de controle divididas nos subprogramas do CLP identificados como LAD 21, LAD 22, LAD 23, LAD 24 e LAD 27, tratados na seção 3.4.2 (p. 91). Para *interfacear* esses subprogramas, foram criadas as telas de medições e resultados, comentadas na seção 3.4.3.5 (p. 102). Os resultados das medições realizadas nos subprogramas em conjunto com os valores de consumo de energia, fator de potência, fator de carga e demanda registrados nos históricos do *Smart 32*, formam o conjunto de informações necessárias para as análises de eficiência energética que serão apresentadas no Capítulo 4.

De forma geral, as medições foram feitas considerando o período de uma a duas semanas para cada tipo de acionamento, e foram realizadas medições com variação de nível, variação de controle (analógico, digital e PID) e variação de frequência.

4 MEDIÇÕES VISANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Esse capítulo apresentará as medições realizadas através da nova automação implantada no SAA e seus respectivos resultados e análises, onde o principal objetivo é identificar os potenciais de eficiência energética para o sistema em estudo. Como informado na seção 3.5 (p. 106) os testes e simulações foram realizados em duas etapas, e para a realização de cada etapa foram desenvolvidos os subprogramas e criadas às telas de *interfaces* mostradas nas seções 3.4.2 (p. 91) e 3.4.3 (p. 94). A Figura 47 apresenta a tela onde se encontra os *links* para as análises de eficiência energética e resultados.

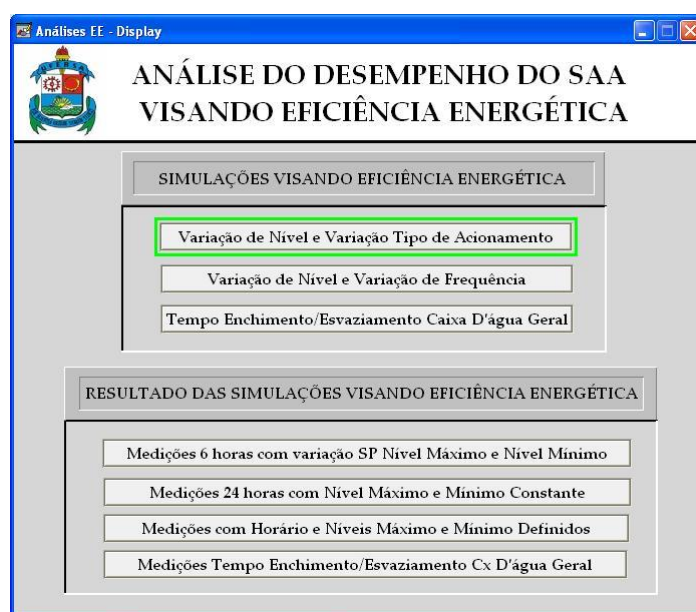


Figura 47 – Tela “Análises de Eficiência Energética”.

Fonte: Autoria própria, 2013.

De forma geral, o presente capítulo está dividido de acordo com as duas etapas que constituíram as medições, e na sequência de cada etapa, é apresentado os resultados com suas devidas análises e conclusões.

4.1 MEDIÇÕES COM VARIAÇÃO DE NÍVEL E TIPO DE PARTIDA

A primeira etapa consistiu nas medições com variação de níveis e tipo de partida das bombas M22, M26 e M30. Como já explanado nas seções anteriores, a bomba M22 não

sofreu variação no tipo de partida, pois manteve sempre a partida tipo *soft-start*, já instalada desde o princípio da concepção do sistema. Dessa forma, somente sofreram variação no tipo de partida as bombas M26 e M30.

Quanto à variação de nível de enchimento e esvaziamento dos reservatórios, somente o nível da caixa geral foi configurado, e então exclusivamente a bomba M30 teve modificações diretas em sua operação e consequentemente consumo de energia elétrica. Porém, as outras bombas também tiveram modificações de forma indireta, visto que o nível da caixa dos escritórios interfere diretamente no nível dos demais reservatórios d'água.

4.1.1 Resultados das medições com variação de nível e tipo de acionamento

Unindo os dados apresentados nas telas de resultados da Figura 43 (p. 103) correspondentes à 'quantidade de partidas', o 'tempo de funcionamento' e o 'tipo de partida' de cada bomba, com os valores de consumo de energia, registrados no *Smart 32*, obteve-se as informações necessárias para responder aos questionamentos apresentados na seção 3.5 (p. 106) referentes à Etapa 1 das medições.

Assim a presente seção será subdivida em duas subseções, uma voltada a descobrir qual o melhor nível de controle para a caixa geral, e como o resultado desse interfere diretamente no consumo da bomba M30 e indiretamente no consumo das bombas M26 e M22; e a outra seção será direcionada para constatar qual o tipo de partida que proporciona o menor consumo de energia elétrica para as bombas M30 e M26.

4.1.1.1 Análise do melhor controle de nível para a caixa geral

No sistema controlado pelo *LOGO*[®] o sensor de eletrodo possibilitava uma variação de nível na caixa geral muito pequena. Quando se instalou o sensor analógico verificou-se que o ajuste do eletrodo variava o nível em torno de 91 a 96%. Assim, para considerar o controle feito com o *LOGO*[®] adotou-se essa variação de nível para representar o nível digital. Porém, quando foram feitos os testes com o inversor de frequência essa consideração foi desnecessária, visto que com o inversor foi programado a medição da variação de nível real

realizada com o sensor de eletrodo, através da seleção do tipo de controle digital, realizado na tela “Medições Variação Nível e Frequência”, visualizada na Figura 44 (p. 104).

Foram realizadas medições diárias e a cada dia conservava-se o tipo de acionamento e variava-se o nível, posteriormente era mantida a variação do nível e modificava-se o tipo de acionamento. Cada configuração de medição foi repetida no mínimo duas vezes para que houvesse confirmação dos valores. Os resultados analisados foram referentes às médias dos valores registrados, considerando o número de repetições realizadas. A Tabela 14 mostra os valores referentes às medições realizadas no mês de agosto de 2013.

Tabela 14 – Valores das medições realizadas na bomba M30 com variação de nível e tipo de acionamento.

Nível	Tipo de Acionamento	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Partidas	Tempo Bomba Funcionando (hora)	Partidas/hora	Tempo func./partidas (min)	Tempo bomba parada (hora)	Tempo parada/partidas (min)	Consumo Energia (kWh)
Controle Digital	Inversor de Frequência	18:00	00:00	6	14	2,8	2,4	12,0	3,2	13,3	64,0
96 a 91%	Inversor de Frequência	18:00	00:00	6	19	2,9	3,1	9,4	3,1	10,1	61,9
96 a 91%	Partida Direta	18:00	00:00	6	19	2,7	3,2	8,6	3,3	10,3	152,2
96 a 91%	Soft-Start	18:00	00:00	6	19	2,9	3,2	9,1	3,1	9,8	148,2
100 a 90%	Inversor de Frequência	00:00	06:00	6	9	2,5	1,4	17,6	3,5	24,7	59,8
100 a 90%	Partida Direta	00:00	06:00	6	9	2,7	1,5	17,7	3,3	22,3	144,2
100 a 90%	Soft-Start	00:00	06:00	6	9	2,7	1,5	18,2	3,3	21,8	147,9
100 a 80%	Inversor de Frequência	06:00	12:00	6	5	2,3	0,8	28,0	3,7	44,0	56,5
100 a 80%	Partida Direta	06:00	12:00	6	5	2,5	0,8	30,5	3,5	41,5	153,2
100 a 80%	Soft-Start	06:00	12:00	6	5	2,6	0,8	34,9	3,4	45,1	152,2
100 a 70%	Inversor de Frequência	12:00	18:00	6	3	2,4	0,5	47,7	3,6	72,3	62,0
100 a 70%	Partida Direta	12:00	18:00	6	3	2,7	0,5	54,0	3,3	66,0	134,4
100 a 70%	Soft-Start	12:00	18:00	6	3	2,6	0,5	52,0	3,4	68,0	153,7

Fonte: Autoria própria, 2013.

A princípio foram analisados a ‘quantidade de partidas’ e o ‘número de partidas por hora’, em cada variação de nível. Verificou-se que quanto maior a variação de nível menor o ‘número de partidas’ e consequentemente menor o ‘número de partidas por hora’. Assim, a

variação de nível entre 100 a 70% apresentou média de 0,5 ‘partidas por hora’ contra o pior caso referente ao controle do nível, entre 96 a 91% com média de 3,1 ‘partidas por hora’. O controle com eletrodos apresentou média de 2,4 ‘partidas por hora’.

A diferença dos valores entre o controle real com eletrodos e o controle analógico simulado (variação de nível de 96 a 91%) ocorre devido ao sensor de eletrodos necessitar de um tempo para estabilização, logo a mudança de estado entre nível baixo e alto possui um “*delay*” ocasionado pela estabilização da água dentro do reservatório. Ao contrário, no controle analógico, no momento que o nível atinge os valores superior ou inferior configurados, a bomba imediatamente muda o seu estado de operação, independente do tempo de estabilização do nível. Por isso os valores foram diferentes, porém bem próximos uns dos outros.

Quanto aos tempos de ‘bomba funcionando’ e ‘bomba parada por partidas’, verificou-se que a variação do nível onde a bomba passa mais tempo parada corresponde à mesma variação do nível em que a bomba fica o maior tempo funcionando.

Fazendo a correlação dos resultados de tempos de ‘bomba funcionando’ e ‘bomba parada por partidas’, com o ‘número de partidas’, verificou-se que quanto menor o ‘número de partidas’ maior será o tempo de ‘bomba parada’, e ‘funcionando por partidas’, significando que o tempo total de ‘bomba funcionando’ e de ‘bomba parada’ terá pouca diferença na variação de um nível para o outro.

Analisando os valores do tempo total da ‘bomba funcionando’ e ‘bomba parada’, verificou-se que o nível entre 100 a 70% foi o que resultou no menor tempo de ‘bomba funcionando’ e maior tempo de ‘bomba parada’, e os níveis entre 96 a 91% e/ou digital apresentaram o maior tempo de ‘bomba funcionando’ e menor tempo de ‘bomba parada’. Porém, vale destacar que a diferença entre esses valores é pouco representativa, o que resulta num consumo de energia elétrica próximo entre um nível e outro. A Figura 48 mostra o consumo de energia elétrica da bomba M30 para os diferentes tipos de acionamentos e limites de nível para a caixa geral.

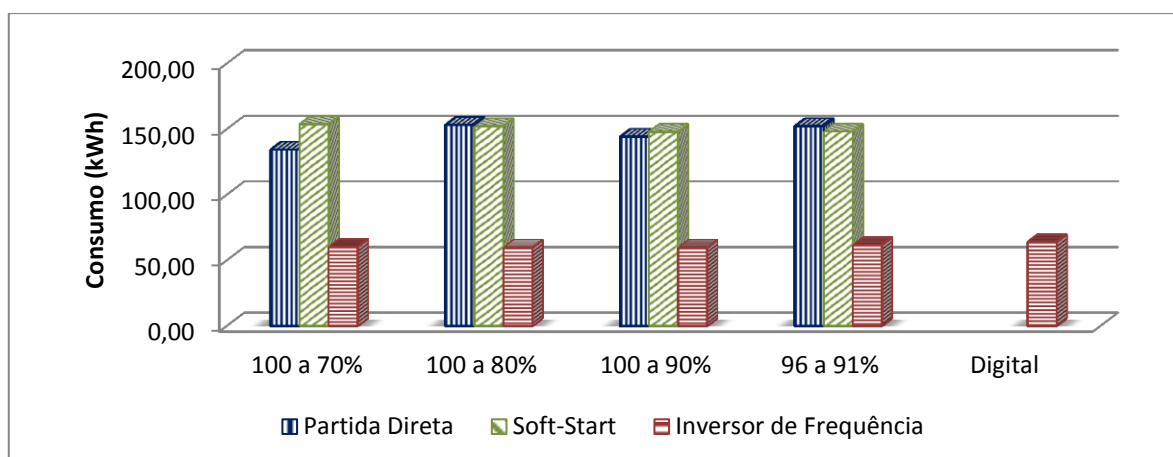


Figura 48 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 com variação de nível e tipo de acionamento.
Fonte: Autoria própria, 2013.

Na Figura 48 é visualizado que o acionamento com inversor de frequência atingiu o melhor resultado em termos de eficiência energética. No entanto, comparando entre si, o consumo de energia elétrica para cada tipo de acionamento, em suas respectivas variações de controle de nível, verificou-se pouca diferença.

Os resultados de consumo de energia elétrica foram coerentes com o tempo de funcionamento da bomba, sendo o nível de 100 a 90%, aquele que apresentou o menor consumo com o inversor de frequência e/ou partida tipo *soft-start*. Já com a partida direta, o menor consumo de energia elétrica ocorreu no nível de 100 a 70%, que se trata do nível com o menor ‘número de partidas’. Esses resultados mostraram que o melhor nível para se alcançar o menor consumo de energia elétrica, dependerá do tipo de acionamento da bomba. E, sendo o acionamento com inversor de frequência o mais eficiente, uma boa escolha para o nível de controle da caixa geral é o nível entre 100 a 90%.

Porém, deve-se salientar que não é somente o consumo de energia elétrica que deve ser analisado para definição do melhor controle de enchimento da caixa geral, também é necessário avaliar o ‘número de partidas’ da bomba, na condição de que quanto menor, melhor, evitando assim desgastes na partida e aumentando o tempo entre as manutenções. Também deve ser estudado o nível que garante maior segurança para o processo, pois em caso de falha, quanto mais cheia a caixa estiver, maior será o tempo disponível para a resolução do problema.

Dessa forma, para atender o requisito de menor ‘número de partidas por hora’, o nível 100 a 70% é a melhor opção, porém este não atende o requisito de nível mínimo de segurança. Para essa situação, a melhor opção é o nível de 100 a 90%. Entretanto, com o foco

no ‘número de partidas’, ele não atenderia como melhor opção, exceto se o acionamento da bomba fosse *soft-start* ou inversor de frequência.

Contribuindo para a análise do melhor nível de controle da caixa geral, foram realizadas as mesmas medições para a bomba M26, que é diretamente afetada com o ciclo de trabalho da M30. Então, para a M26, foram registrados os valores apresentados na Tabela 15, que correspondem às medições realizadas utilizando a mesma metodologia aplicada para a bomba M30 e acompanhando as mesmas datas de medições e variação no tipo de acionamento e níveis, em períodos de seis horas.

Tabela 15 - Valores das medições realizadas na bomba M26 com variação de nível e tipo de acionamento.

Nível	Tipo de Acionamento	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Partidas	Tempo Bomba Funcionando (hora)	Partidas/hora	Tempo func./partidas (min)	Tempo bomba parada (hora)	Tempo parada/partidas (min)	Consumo Energia (kWh)
Controle Digital	Inversor de Frequência	18:00	00:00	6	15	2,38	2,42	9,84	3,62	14,99	21,63
96 a 91%	Inversor de Frequência	18:00	00:00	6	19	2,50	3,17	7,89	3,50	11,05	21,00
96 a 91%	Partida Direta	18:00	00:00	6	19	2,00	3,17	6,32	4,00	12,63	46,50
96 a 91%	Soft-Start	18:00	00:00	6	19	2,50	3,17	7,89	3,50	11,05	59,55
100 a 90%	Inversor de Frequência	00:00	06:00	6	9	3,24	1,50	21,61	2,76	18,39	19,15
100 a 90%	Partida Direta	00:00	06:00	6	9	2,73	1,50	18,17	3,28	21,83	44,40
100 a 90%	Soft-Start	00:00	06:00	6	9	2,93	1,50	19,50	3,08	20,50	56,75
100 a 80%	Inversor de Frequência	06:00	12:00	6	5	1,82	0,75	24,23	4,18	55,77	11,85
100 a 80%	Partida Direta	06:00	12:00	6	5	2,70	0,83	32,40	3,30	39,60	44,40
100 a 80%	Soft-Start	06:00	12:00	6	5	2,78	0,83	33,30	3,23	38,70	60,55
100 a 70%	Inversor de Frequência	12:00	18:00	6	3	2,00	0,50	40,00	4,00	80,00	20,90
100 a 70%	Partida Direta	12:00	18:00	6	3	2,50	0,50	50,00	3,50	70,00	40,25
100 a 70%	Soft-Start	12:00	18:00	6	3	2,50	0,50	50,00	3,50	70,00	56,35

Fonte: Autoria própria, 2013.

Os resultados obtidos para a bomba M26 foram similares aos apresentados para a M30. Em resumo, o nível de 100 a 70% foi o que apresentou o menor ‘número de partidas’ e ‘quantidade de partidas por hora’. O ‘tempo de funcionamento e de parada por partida’ é

coerente com o ‘número de partidas’. Assim, o nível que possui menor ‘número de partidas’ é o que apresenta o maior ‘tempo de bomba em funcionamento e bomba parada por partida’, e em consequência, o tempo total de ‘bomba em funcionamento’ e ‘bomba parada’, ficam muito próximos entre um nível e outro.

Por fim, verificou-se também que para a bomba M26 o consumo de energia elétrica variou de acordo com o tipo de acionamento, sendo o menor consumo referente ao nível de 100 a 70%. A Figura 49 mostra o consumo de energia elétrica da bomba M26 para diferentes tipos de acionamentos e limites de nível para a caixa geral.

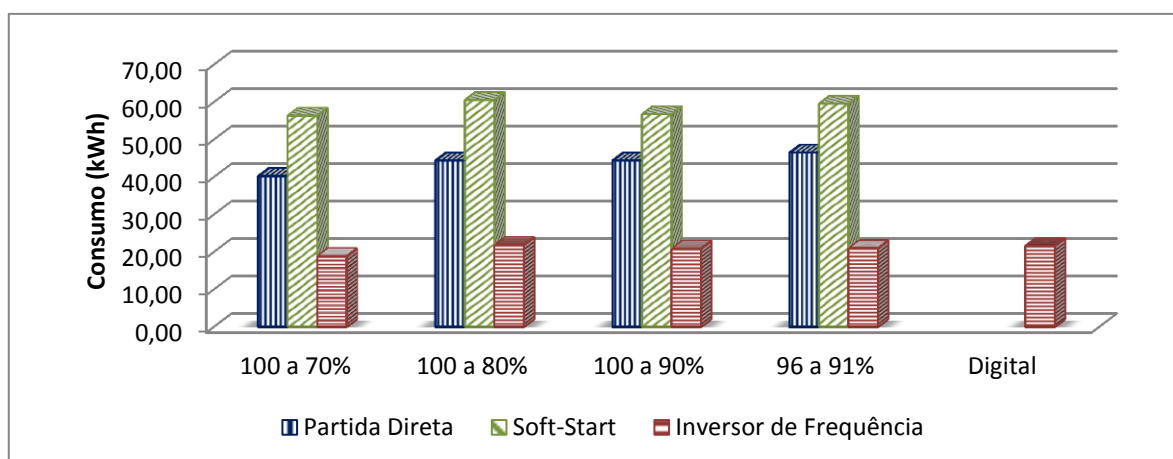


Figura 49 - Consumo de energia elétrica da bomba M26 com variação de nível e tipo de acionamento.

Fonte: Autoria própria, 2013.

De acordo com os resultados de consumo obtidos para a bomba M26, tem-se que apesar do menor consumo ter sido destinado a variação do nível de 100 a 70%, os valores para o nível de 100 a 90% ficaram muito próximos, o que significa que a escolha pelo nível de 100 a 90% permanece sendo a melhor opção para o controle de nível da caixa geral, desde que a bomba seja acionada com inversor de frequência ou *soft-start*, onde este último se destaca no sentido de minimizar o impacto da partida devido à quantidade das mesmas.

A última análise foi direcionada para o comportamento da bomba submersa com a variação dos limites de controle de nível da caixa geral. Esta foi necessária, devido o sistema ser interdependente, ou seja, para manter o nível da caixa geral é necessário manter o da bacia de refrigeração e também o da cisterna e do poço, pois qualquer alteração no ciclo de trabalho de uma das bombas, o ciclo de trabalho das outras duas será afetado, e vice-versa.

Porém, em se tratando da bomba submersa, vale lembrar que a mesma não mantém somente o nível da cisterna, mas também o da caixa dos escritórios que é totalmente independente dos demais reservatórios. Assim, por conta dessa situação, não foi possível analisar as variáveis quanto ao ‘número de partidas’, ‘partidas por hora’, e ‘tempo de bomba

funcionando e parada por partida', pois a lógica do CLP não foi programada para contar de forma separada o número de partidas para abastecer a cisterna e a caixa dos escritórios, principalmente porque existem situações onde a bomba não é acionada, mas somente a manobra da válvula é realizada.

Dessa forma, as únicas variáveis possíveis de ser analisadas foram o 'tempo total de funcionamento da bomba' para a cisterna, o 'consumo d'água para a cisterna', e considerando o tempo de funcionamento da bomba para abastecer a cisterna, foi calculado de forma proporcional ao consumo total da bomba e o consumo de energia elétrica para o abastecimento da cisterna. A Tabela 16 mostra os valores registrados para a bomba M22, no mesmo período das medições realizadas nas M26 e M30.

Tabela 16 - Valores das medições realizadas na bomba M22 com variação de nível e tipo de acionamento das bombas M26 e M30.

Nível	Tipo de Acionamento das Bombas M26 e M30	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Part.	Tempo Bomba Func. (hora)	Tempo Bomba Parada (hora)	Consumo Energia (kWh)
Controle Digital	Inversor de Frequência	18:00	00:00	6	3	0,75	5,25	22,40
96 a 91%	Inversor de Frequência	18:00	00:00	6	4	1,59	4,41	50,16
96 a 91%	Partida Direta	18:00	00:00	6	3	1,28	4,73	38,44
96 a 91%	Soft-Start	18:00	00:00	6	3	1,10	4,90	31,08
100 a 90%	Inversor de Frequência	00:00	06:00	6	4	0,68	5,33	18,29
100 a 90%	Partida Direta	00:00	06:00	6	4	0,69	5,31	21,71
100 a 90%	Soft-Start	00:00	06:00	6	4	0,47	5,53	14,72
100 a 80%	Inversor de Frequência	06:00	12:00	6	3	2,42	3,58	65,88
100 a 80%	Partida Direta	06:00	12:00	6	5	1,18	4,82	32,09
100 a 80%	Soft-Start	06:00	12:00	6	6	1,03	4,97	25,43
100 a 70%	Inversor de Frequência	12:00	18:00	6	2	2,12	3,88	62,18
100 a 70%	Partida Direta	12:00	18:00	6	6	2,02	3,98	56,16
100 a 70%	Soft-Start	12:00	18:00	6	7	2,07	3,93	48,68

Fonte: Autoria própria, 2013.

Os valores apresentados na Tabela 16 diferem dos resultados apresentados anteriormente para as bombas M26 (Tabela 15, p. 113) e M30 (Tabela 14, p. 110). O nível de

100 a 90% foi aquele onde a M22 passou o menor ‘tempo em funcionamento’ e consequentemente, o maior ‘tempo parada’.

Dessa forma, o resultado referente aos ‘tempos de bomba em funcionamento e parada’, proporciona um consumo de energia elétrica menor para o nível onde a bomba obteve o menor ‘tempo em funcionamento’. Logo, o nível 100 a 90% é o nível de controle onde a bomba submersa consome menos energia elétrica. A Figura 50 mostra o consumo de energia elétrica da bomba submersa devido à variação do nível da caixa geral.

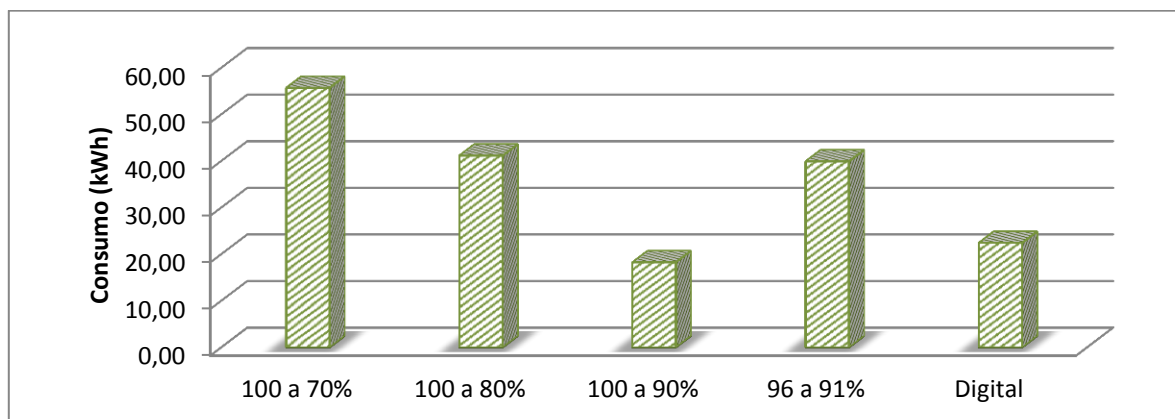


Figura 50 - Consumo de energia elétrica da bomba M22 com variação do nível da caixa geral.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Os resultados mostrados na Figura 50 ocorrem devido à cisterna ser abastecida tanto pela bomba submersa como também pela água de retorno do processo. Assim, no caso do nível de 100 a 70%, que proporcionou o menor consumo de energia elétrica para a bomba M26, para a M22 o resultado foi inverso. Isso ocorreu porque para esse nível, a M26 fica um longo período parada, e então a água de retorno do processo enche a cisterna ocasionando o transbordo e o desperdício de água. E, quando a M26 inicia sua operação, o nível da cisterna começa a diminuir e a submersa tem que ficar operando na mesma proporção, a fim de conseguir recuperar o nível da cisterna, ficando prolongado o período de tempo de abastecimento da bacia de refrigeração.

Este ciclo operacional da bomba M22 resulta em desperdício de água. Sendo assim, foi adotado o nível de 100 a 90% para o controle da caixa geral. Porém é importante destacar que essa situação somente ocorre porque os reservatórios da cisterna e da bacia de refrigeração possuem ajustes de controle de nível fixo através dos relés de eletrodo. Na medida em que nesses reservatórios forem instalados os sensores analógicos, será possível regular o melhor nível de controle de forma isolada, tornando-os independentes um do outro.

4.1.1.2 Análise do tipo de acionamento que proporciona melhor eficiência energética para as bombas centrífugas M30 e M26

Aceitando os resultados apresentados na seção anterior, adotou-se o nível de 100 a 90% fixo para a realização do consumo diário de energia elétrica das bombas M30 e M26 com variação do tipo de acionamento. Os resultados obtidos confirmaram os valores apresentados nas análises de 6 horas apresentadas nas Figura 48 e Figura 49.

Assim sendo, tanto para a M30 como também para a M26 foram realizadas medições durante o período de sete dias, sendo repetidas no mínimo duas vezes para a confirmação dos resultados. Para cada tipo de acionamento foi calculado a média de consumo dos dias. A Tabela 17 mostra os valores registrados através dos subprogramas LAD 21, LAD 22 e LAD 24, como também os dados de consumo de energia elétrica retirados do *Smart 32*, para as bombas M30 e M26.

Tabela 17 - Valores das medições realizadas nas bombas M30 e M26 com variação do tipo de acionamento e nível de controle da caixa geral constante em 100 a 90%.

Nível	Tipo de Acionamento	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Partidas	Tempo Bomba Funcionando (hora)	Partidas/hora	Tempo func./partidas (min)	Tempo bomba parada (hora)	Tempo parada/partidas (min)	Consumo Energia (kWh)
BOMBA M30											
100 a 90%	Inversor de Frequência	00:00	24:00	24	35	10,6	1,5	18,2	13,4	23,1	251,5
100 a 90%	Partida Direta	00:00	24:00	24	35	10,9	1,4	18,8	13,1	22,7	610,8
100 a 90%	<i>Soft-Start</i>	00:00	24:00	24	35	10,9	1,4	18,9	13,1	22,7	604,1
BOMBA M26											
100 a 90%	Inversor de Frequência	00:00	24:00	24	35	10,1	1,5	17,3	13,9	23,8	87,2
100 a 90%	Partida Direta	00:00	24:00	24	35	10,4	1,5	17,8	13,6	23,3	183,1
100 a 90%	<i>Soft-Start</i>	00:00	24:00	24	35	10,1	1,5	17,2	13,9	23,9	236,2

Fonte: Autoria própria, 2013.

Analisando os valores da Tabela 17 verifica-se que mantendo o nível de controle da caixa geral constante e variando o tipo de acionamento, as variáveis relacionadas à ‘quantidade de partidas’ dos motores das bombas, ‘tempo de funcionamento/parada por

partida' e 'tempo de funcionamento/parada total' se mantêm aproximadamente inalteradas, porém o consumo de energia elétrica é bem diferenciado em relação aos tipos de partida.

A Tabela 17 mostra que para ambas as bombas M30 e M26 a utilização do inversor de frequência proporciona redução no consumo de energia elétrica pouco maior que 50%. A Figura 51 mostra graficamente a variação do consumo de energia elétrica para a M30.

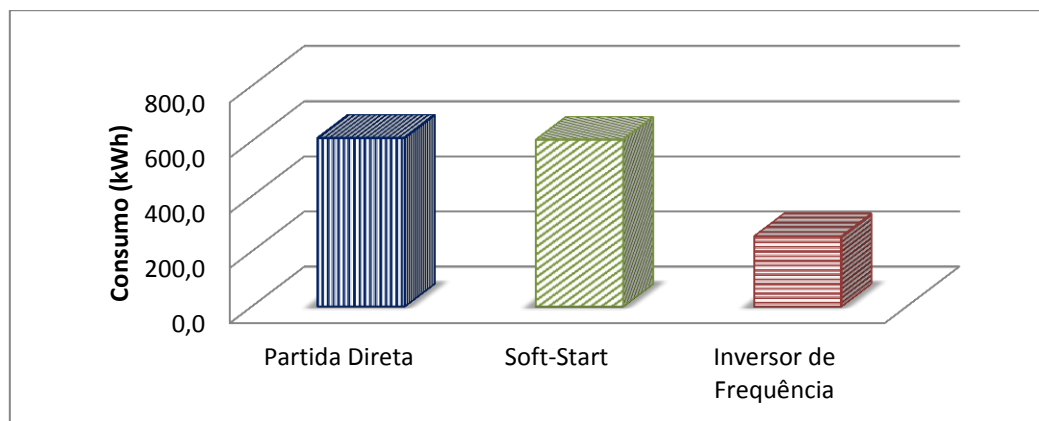


Figura 51 – Consumo médio diário de energia elétrica da bomba M30 com variação do tipo de acionamento.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Com esses resultados fica constatado que a melhor opção para a redução do consumo de energia elétrica, mantendo-se a demanda e o uso, é através do acionamento com inversor de frequência, que apresentou redução de 59% em relação à partida direta.

Para a bomba M26, os resultados se conservaram e o acionamento através do inversor de frequência proporcionou economia de 52% em relação à partida direta. Quanto ao acionamento com *soft-start*, o resultado visando redução de energia elétrica foi pouco significativo para ambas às bombas.

4.2 MEDIÇÕES COM VARIAÇÃO DE CONTROLE E VAZÃO DA BOMBA M30 E TEMPO DE ENCHIMENTO/ESVAZIAMENTO DA CAIXA GERAL

A segunda etapa das medições foi direcionada à variação do tipo de controle e vazão (frequência) da bomba M30. Como já mencionado, o processo de controle da caixa geral é o único possível de regular os valores percentuais de nível do reservatório. E, como a M30 possui a opção de acionamento com inversor de frequência, tornou-se possível também variar

o tipo de controle, sendo as opções: controle digital, controle analógico e controle PID. A seleção desses tipos de controle foi aplicada na lógica de controle da bomba M30 descrita no subprograma LAD 13 (Tabela 13, p. 91). Quanto às medições de tempo de enchimento e esvaziamento da caixa geral, o objetivo principal foi reduzir o consumo de energia elétrica no horário sazonal de ponta e diminuição geral do consumo de energia elétrica com a operação da bomba constante.

4.2.1 Resultados das medições com variação de controle e vazão da bomba M30 e tempo de enchimento/esvaziamento do nível da caixa geral

O objetivo principal dessa seção é responder aos questionamentos apresentados na seção 3.5 (p. 106), onde a análise fundamental se refere à definição do melhor ciclo de funcionamento da bomba M30. Como já explanado na seção 2.2.2 (p. 42), as bombas que constituem o SAA estão classificadas no regime de trabalho do tipo contínuo, porém, todas trabalhavam de forma intermitente com controle liga/desliga realizando várias partidas e paradas por dia. Então, para eliminar essa operação não adequada, aplicou-se o controle contínuo com o foco de atender ao regime de trabalho do motor das bombas sem se despreocupar com a eficiência energética. Dessa forma, algumas das análises realizadas buscaram responder em qual ciclo de operação das bombas o consumo de energia elétrica é mais econômico: ligar e desligar a bomba várias vezes ao dia, ou manter seu funcionamento contínuo durante as 24 horas do dia.

A resposta a esse questionamento e a outros relacionados à aplicação do inversor de frequência para o acionamento da bomba M30 e controle PID da caixa geral, visando eficiência energética, serão respondidas nas seções 4.2.1.1, 4.2.1.2, 4.2.1.3 e 4.2.1.4.

4.2.1.1 Análise do melhor controle para a bomba M30, visando eficiência energética e mantendo-se a demanda e o uso.

Semelhante à metodologia aplicada para as medições apresentadas na seção 4.1.1, foram realizadas medições diárias com variação do tipo de controle da bomba M30. Assim,

foram realizadas medições com controle digital, analógico mantendo o nível entre 100 a 90%, e PID com *Set Point* do nível fixo em 98%. Cada dia correspondeu a um tipo de controle sendo os mesmos repetidos no mínimo duas vezes para a confirmação dos resultados.

Além desses, foram realizadas medições diárias com a simulação do Horário Sazonal de Ponta (HZIP), variação de frequência em períodos de seis horas, e controle através da variação do nível e frequência. Tais controles serão detalhados nas próximas seções, porém, nessa seção, aproveitou-se para realizar um comparativo do consumo de energia elétrica para todas as simulações realizadas. A Tabela 18 apresenta os valores de consumo de energia elétrica e as outras variáveis analisadas na seção 4.1.1 abrangendo todos os tipos de controles realizados: analógico, digital, PID, PID com horário sazonal de ponta, variação de frequência de rotação da bomba com variação do nível da caixa geral e variação de frequência de rotação da bomba sem variação do nível da caixa geral.

Tabela 18 - Medições diárias com variação do tipo de controle da bomba M30.

Controle	Nível	Tipo de Partida	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Partidas	Tempo Bomba Funcionando (hora)	Partidas/hora	Tempo func./partidas (min)	Tempo bomba parada (hora)	Tempo parada/partidas (min)	Consumo Energia (kWh)
Analógico	100 a 90%	IF	00:00	24:00	24	35	10,6	3,3	18,2	13,4	23,1	253,5
Digital	Eletrodos	IF	00:00	24:00	24	57	11,4	5	12	12,6	13,3	262,8
PID	98%	IF	00:00	24:00	24	1	24	0	1440	0	0	257,4
PID – Horário Ponta	98% - 100 a 75%	IF	00:00	24:00	24	1	21	0	1260	3	180	256,5
Nível Cx Geral	100 a 75%	IF	00:00	24:00	24	1	24	0	1440	0	0	222,5
Variação Frequência	100 a 90% (60/55/50/45 Hz)	IF	00:00	24:00	24	30	14,1	2,1	28,1	9,9	19,9	214,7

Fonte: Autoria própria, 2013.

Analisando os três primeiros e principais tipos de controle mostrados na Tabela 18, e comparando-os entre si quanto à eficiência energética, o que apresentou menor consumo de energia foi o controle analógico. Em seguida, com valores próximos, ficou o PID, e por fim, o digital. A Figura 52 mostra graficamente esses resultados.

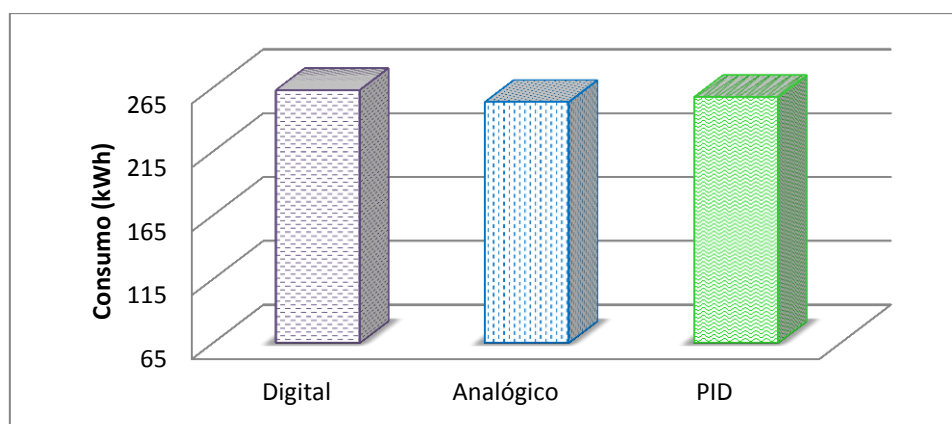


Figura 52 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 para os tipos de controle digital, analógico e PID.
Fonte: Autoria própria, 2013.

Apesar de o controle analógico ter apresentado o melhor resultado quanto ao consumo de energia elétrica, antes de defini-lo como o controle mais adequado, deve ser considerado o número de partidas que o mesmo provoca na bomba. Com esse foco, o controle digital permanece em última opção, visto que provoca 57 partidas/dia na bomba. Em seguida, tem-se o analógico com 35 partidas/dia, e por fim, o PID que mantém a bomba em funcionamento contínuo com variação de frequência a fim de manter o nível do reservatório constante.

Como o inversor de frequência não foi desenvolvido para uma operação frequente de energização e desenergização pode-se indicar como melhor controle o tipo PID. Vale considerar que é possível ajustar as constantes proporcional, integral e derivada de tal forma que o controle mantenha a bomba M30 a maior parte do tempo com frequências inferiores a 60 Hz, o que proporcionaria uma redução no consumo de energia elétrica, conforme será demonstrado na seção 4.2.1.2. Outra vantagem do controle PID está na manutenção do nível da caixa sempre cheio, não ocorrendo à situação de níveis alto ou baixo. Inclusive, se desejável, é possível ajustar o *Set Point* para manter constantemente a caixa geral 100% cheia.

Analisando os outros controles simulados e apresentados na Tabela 18 (PID-Horário Ponta, Nível Caixa Geral e Variação Frequência), verificou-se que o menor consumo de energia elétrica ocorreu com a aplicação das variações de frequência em 60 Hz, 55 Hz, 50 Hz e 45 Hz. Em seguida, foi o controle com variação de nível da caixa geral, sendo este regulado para máximo de 100% e mínimo de 75%, e por último, a simulação da operação da bomba durante o HZP através da redução da frequência de operação da bomba para 40 Hz durante o estado de esvaziamento da caixa geral.

Em comparação com os resultados dos três principais controles, o controle analógico teve resultado melhor que o PID simulando o HZP, e em relação aos demais, a eficiência energética foi menor. Entretanto, vale ressaltar que as diferenças de consumo de energia

elétrica entre os vários tipos de controle para o nível da caixa geral são aproximadas, o que significa resultados de eficiência energética pouco significativos. A Figura 53 representa graficamente o consumo de energia elétrica para cada tipo de controle simulado.

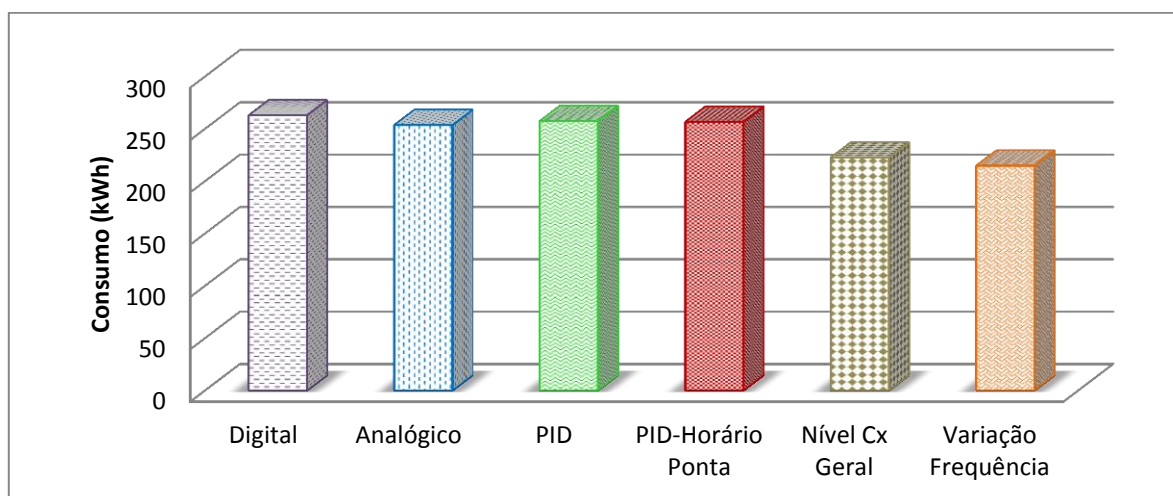


Figura 53 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 para os controles digital, analógico, PID, PID simulando o HZP, nível caixa geral entre 100% a 75%, e variação de frequência.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Novamente, focando na quantidade de partidas que a bomba é submetida diariamente, tem-se que nos controles PID-horário ponta e nível da caixa geral, a bomba permanece em operação contínua, o que significa 1 (uma) partida por ciclo de operação, porém no controle com variação de frequência, a bomba registra o número de 30 partidas por dia.

Tendo em vista o resultado de todos os possíveis tipos de controle da caixa geral e com o foco voltado para o menor consumo de energia elétrica, menor número de partidas na bomba, e nível mínimo de controle seguro, identifica-se como melhor opção para controle o tipo PID-horário ponta, pois durante as três horas do horário sazonal de ponta, o consumo de energia elétrica apresentou uma redução em torno de 46%.

Os resultados apresentados na Figura 53 apontaram os controles através do nível da caixa geral e variação de frequência sendo àqueles que proporcionam os melhores resultados de eficiência energética, porém foi comprovado que estes não o são. Pois, para o controle através do nível da caixa geral, o nível mínimo atingido de 75% representa um risco para o processo, tanto em relação à possível ocorrência de uma falha no sistema, como também pelo tempo maior de funcionamento da bomba M30, o que provocará desequilíbrio nos outros reservatórios.

No caso do controle com variação de frequência, a menor frequência de enchimento requer um tempo maior para recuperação do nível da caixa geral, provocando desequilíbrio nos outros reservatórios. Assim, devido às alterações nos tempos de enchimento que esses

dois tipos de controle provocam no sistema, e mesmo apresentando o menor consumo de energia elétrica, ambos não são adequados. Vales ressaltar que durante os testes desses tipos de controle ocorreram transbordos de água na cisterna, aumentando o consumo de água do SAA.

4.2.1.2 Análise do ponto ótimo de vazão da bomba M30 e interferência do mesmo no consumo da energia elétrica

Essa análise buscou encontrar um ponto ótimo de vazão para a bomba M30, onde a mesma tanto suprisse o nível de controle desejado, como também operasse com maior eficiência energética. Para esses testes foi conservado o nível de controle analógico com ajuste entre 100 a 90% e variou-se a frequência da bomba M30 entre os valores de 60 Hz, 55 Hz, 50 Hz e 45 Hz em cada período de um quarto de hora.

A frequência mínima foi de 45 Hz, devido constatação (apresentada na seção 4.2.1.3), que para valores menores que esse, a vazão da bomba não é capaz de superar a força da gravidade correspondente à altura da caixa geral. Assim, com frequência inferior a 45 Hz não é possível manter o nível da caixa geral. Na Tabela 19 segue os resultados das variáveis medidas durante o controle com variação de frequência.

Tabela 19 - Medições de seis horas com variação de frequência da bomba M30

Controle de Frequência	Nível	Tipo de Partida	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Partidas	Tempo Bomba Funcionando (hora)	Partidas/hora	Tempo func./partidas (min)	Tempo bomba parada (hora)	Tempo parada/partidas (min)	Consumo Energia (kWh)
60 Hz	100 a 90%	IF	00:00	06:00	6	9	2,8	3,3	18,3	3,3	21,7	61,5
55 Hz	100 a 90%	IF	06:00	12:00	6	9	2,9	3,1	19,1	3,1	20,9	60,4
50 Hz	100 a 90%	IF	12:00	18:00	6	8	3,7	2,2	27,6	2,3	17,4	51,1
45 Hz	100 a 90%	IF	18:00	24:00	6	4	4,8	0,8	71,5	1,2	18,5	41,7

Fonte: Autoria própria, 2013.

Com foco na eficiência energética observou-se que, quanto menor a frequência de rotação do motor da bomba, menor o consumo de energia elétrica, conforme mostrado graficamente na Figura 54.

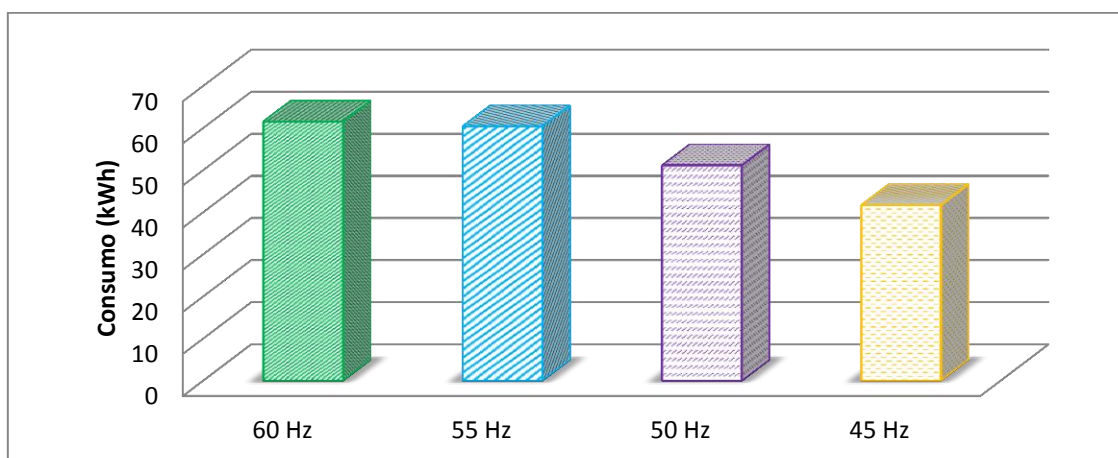


Figura 54 – Consumo de energia elétrica da bomba M30 com variação de frequência.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Porém, vale ressaltar que além do menor consumo de energia elétrica, quanto menor a frequência de operação da bomba M30, menor também o número de partidas, e consequentemente maior o tempo de funcionamento da bomba por partida para manter o nível entre 100 a 90%. Essa situação constitui um paradoxo, pois a bomba de maior tempo em operação possui o menor consumo de energia elétrica. Tal fato pode ser explicado pelas equações que constituem as Leis de Similaridade da bomba centrífuga e a equação de rendimento (Equação 8) apresentadas na seção 2.2.1.1 (p. 41).

Logo, conclui-se que o ponto ótimo de vazão da bomba M30 ocorre com a frequência de rotação em 45 Hz, e essa redução da rotação interfere diretamente no consumo de energia elétrica do motor de acionamento da bomba.

4.2.1.3 Análise do funcionamento da bomba M30 durante o período do Horário Sazonal de Ponta

Essa análise tem como foco a redução do uso da energia elétrica durante o Horário Sazonal de Ponta, devido o valor da tarifa nesse horário ser mais elevado (atender a solução proposta na seção 3.3.3, p. 70). De acordo com o contrato de fornecimento de energia da concessionária o HZP definido para a fábrica de cimento em estudo compreende o horário das

18 às 21 horas. O ideal seria que nesse horário, a bomba M30 ficasse totalmente parada, o que contabilizaria consumo zero de energia elétrica. Porém, utilizando o subprograma LAD 23, verificou-se que com a bomba totalmente parada, o consumo da água pelo processo atinge o nível de 100% até 70% em 1 hora e 20 minutos, o que não compreende às 3 horas do HZP. Caso a bomba ficasse parada durante todo o horário sazonal de ponta, o nível da caixa geral baixaria até 36%, o que corresponderia uma situação de risco iminente para o processo.

Dessa forma, eliminada a hipótese de manter a bomba parada durante o HZP, a solução seria encontrar uma frequência de rotação do motor onde fosse possível manter um equilíbrio entre a vazão de consumo de água para o processo e a vazão de enchimento da caixa geral. Sabendo-se que a vazão de consumo é sempre constante, foram feitos vários testes com a variação de frequência até encontrar o ponto ótimo.

Utilizando a medição do tempo de enchimento e esvaziamento da caixa geral com variações de nível e frequência da bomba M30, apresentada na Figura 45 (p. 104), identificou-se na frequência de 40 Hz um equilíbrio entre as vazões de saída e de entrada, pelo qual com o tempo o nível iria baixando lentamente.

O tempo necessário para baixar 5% do nível com a frequência de 40 Hz foi em média 36 minutos. Nesse ritmo, considerando uma média de 30 minutos para cada variação de 5%, ao final das 3 horas do HZP, o nível estaria aproximadamente em 75%, o que representa um limite inferior tolerável, onde a recuperação do nível com frequência de 60 Hz ocorre em média de 50 minutos.

Acima de 45 Hz verificou-se que a vazão de enchimento é maior que a vazão de consumo, e o nível aumenta não atingindo o seu valor mínimo. Portanto, a frequência de 40 Hz é a ideal, visto que com essa frequência, a vazão de enchimento se equilibra com a vazão de consumo, de tal forma que ela não mantém o nível constante, mas torna o esvaziamento da caixa geral mais lento.

Verificou-se que com a variação do nível entre 100 a 70% e frequência de 40 Hz, o tempo total foi de 3 horas e 57 minutos, o que ultrapassa às 3 horas necessárias. Assim, decidiu-se fazer o controle por nível até o mínimo de 75%, ou até completar o final do HZP, obedecendo prioritariamente aquele que fosse atingido primeiro.

Dessa forma, ficou decidido que a bomba iria manter o controle PID com nível em 98% e, iniciado o HZP, a bomba M30 assumiria a rotação referente à frequência de 40 Hz, e manteria essa rotação durante as 3 horas de duração do horário. Finalizado o HZP, a bomba voltaria ao controle PID com SP em 98%. Os resultados dessa medição encontram-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Medições da bomba M30 com controle PID e Nível durante os horários sazonais de ponta e fora ponta.

Controle	Nível	Tipo de Partida	Hora Início	Hora Fim	Duração (h)	Nº Partidas	Tempo Bomba Funcionando (hora)	Partidas/hora	Tempo func./partidas (min)	Tempo bomba parada (hora)	Tempo parada/partidas (min)	Consumo Energia (kWh)
PID	98%	IF	00:00	06:00	6	1	6	0,2	359	0	0	66,9
PID	98%	IF	0600	12:00	6	1	6	0,2	359	0	0	66,2
PID	98%	IF	12:00	18:00	6	1	6	0,2	359	0	0	65,4
Nível	100 a 75% (40Hz)	IF	18:00	21:00	3	1	3	0,3	180	0	0	17,4
PID	98%	IF	21:00	24:00	3	1	3	0,3	180	0	0	40,6

Fonte: Autoria própria, 2013.

Na Figura 55 tem-se a visualização gráfica do consumo de energia elétrica durante os horários sazonais de ponta e fora ponta.

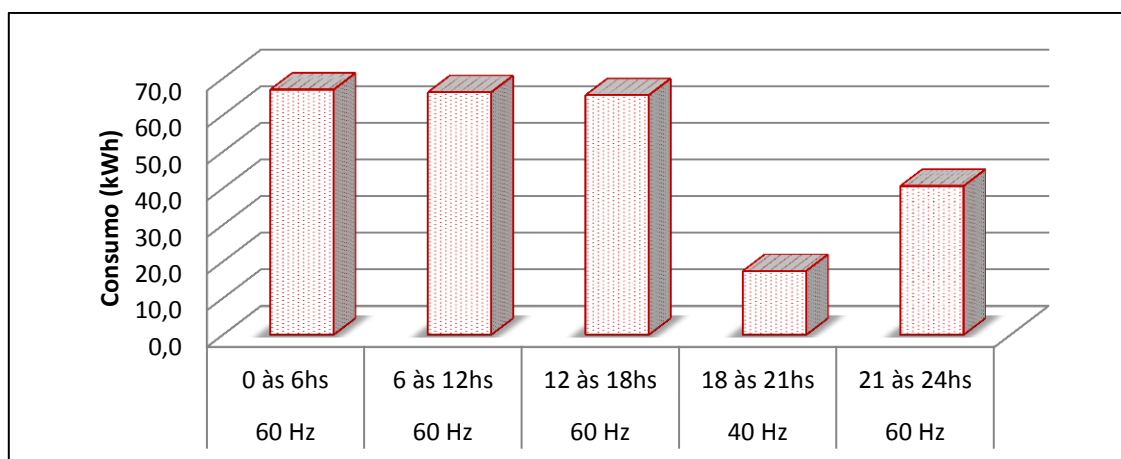


Figura 55 – Consumo de energia elétrica com controle PID e Nível durante os horários sazonais de ponta e fora ponta.

Fonte: Autoria própria, 2013.

Os valores de consumo de energia elétrica registrados atendem o objetivo dessa simulação, pois com o menor consumo de energia elétrica durante as 3 horas correspondentes ao HZP, a indústria consegue diminuir o seu custo diário.

Então, ficou comprovado que mesmo não sendo possível parar totalmente o equipamento durante o HZP, é viável diminuir a rotação de operação e obter um resultado favorável quanto à redução do consumo de energia elétrica, em torno de 47%.

4.2.1.4 Análise do fator de potência e sua interferência na eficiência energética

Apesar da Tabela 10 da seção 3.3.5 (p. 74) ter apresentado o valor do fator de potência de 0,87 para a bomba M30, o valor registrado pelo *Smart 32* foi de 0,93 com a bomba acionada por partida direta. Esse resultado significa que o motor da bomba está com bom desempenho e baixo desperdício de energia elétrica.

Com as mudanças no tipo de acionamento, foi constatado alteração no fator de potência para o tipo de partida com inversor de frequência, porém, com o *soft-start* o fator de potência permaneceu inalterado. A Figura 56 apresenta os valores registrados pelo *Smart 32* durante o mês de agosto de 2013, quando as medições foram validadas.

Fat.Pot. Dia	Ponta (FP)	FPontaInd (FP)	FPontaCap (FP)	Média (FP)	Fat.Pot. Dia	Ponta (FP)	FPontaInd (FP)	FPontaCap (FP)	Média (FP)
01 qui	-0.739	-0.738	-0.739	-0.739	17 sáb	-	0.929	0.927	0.928
02 sex	-0.950	-0.842	-0.722	-0.843	18 dom	-	0.615	0.925	0.733
03 sáb	-	-0.942	-0.943	-0.942	19 seg	0.479	0.464	0.478	0.468
04 dom	-	-0.942	-0.943	-0.943	20 ter	0.500	0.500	0.458	0.489
05 seg	0.928	-0.986	-0.943	-0.992	21 qua	0.463	0.503	0.498	0.495
06 ter	0.927	0.926	0.928	0.927	22 qui	0.458	0.483	0.472	0.477
07 qua	0.927	0.926	0.926	0.926	23 sex	0.492	0.485	0.500	0.489
08 qui	0.928	0.930	0.925	0.928	24 sáb	-	0.483	0.487	0.484
09 sex	0.929	0.927	0.924	0.926	25 dom	-	0.477	0.478	0.477
10 sáb	-	0.927	0.925	0.927	26 seg	0.496	0.477	0.469	0.477
11 dom	-	0.929	0.930	0.929	27 ter	0.413	0.481	0.501	0.481
12 seg	0.930	0.927	0.924	0.927	28 qua	0.546	0.497	0.493	0.501
13 ter	0.928	0.929	0.922	0.928	29 qui	0.724	0.483	0.472	0.498
14 qua	0.933	0.926	0.925	0.927	30 sex	0.427	0.494	0.499	0.489
15 qui	0.931	0.929	0.929	0.930	31 sáb	-	0.481	0.463	0.477
16 sex	0.936	0.929	0.926	0.929					

Figura 56 – Fator de Potência da bomba M30 durante o mês de agosto de 2013.

Fonte: Relatório Mensal Fator de Potência do *Smart 32*, 2013.

Os valores compreendidos do dia 1 ao dia 5 de agosto de 2013 devem ser desconsiderados, pois nesse período o sistema estava registrando medições negativas, provocadas por erro na instalação do TC, conforme explicado no Capítulo 3 na seção 3.3.1 (p. 68). Os valores registrados do dia 5 ao dia 12 são referentes à operação da bomba com partida tipo *soft-start*; do dia 12 ao dia 18 a bomba funcionou com partida direta; e do dia 18 até o dia 31 a bomba teve seu acionamento através do inversor de frequência.

Em resumo o fator de potência para cada tipo de partida apresentou em média os valores apresentados na Figura 57. Esses resultados mostram o quanto o fator de potência baixou com a mudança do acionamento para inversor de frequência, isso significa que, apesar da potência ativa ter diminuído pela metade, a potência reativa aumentou na mesma proporção.

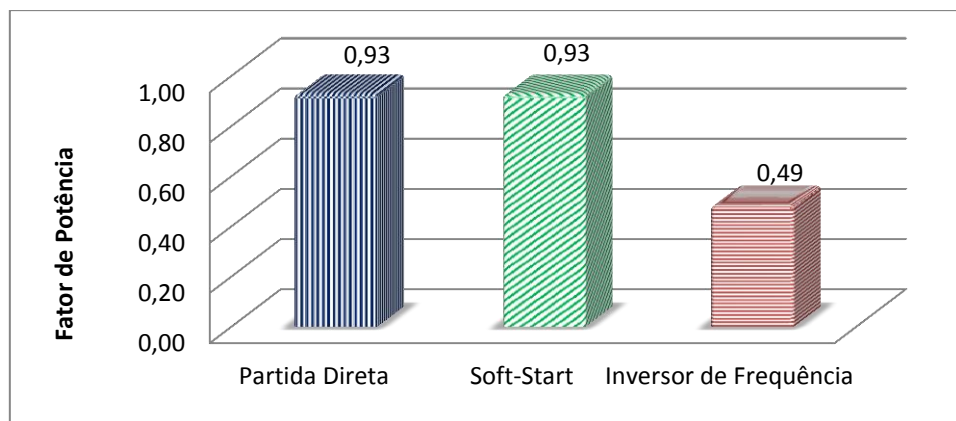


Figura 57 – Valores médios do Fator de Potência para cada tipo de acionamento da Bomba M30.
Fonte: Autoria própria, 2013.

O gráfico da Figura 58 apresenta o comportamento da demanda ativa da bomba M30 com a variação referente ao tipo de acionamento.

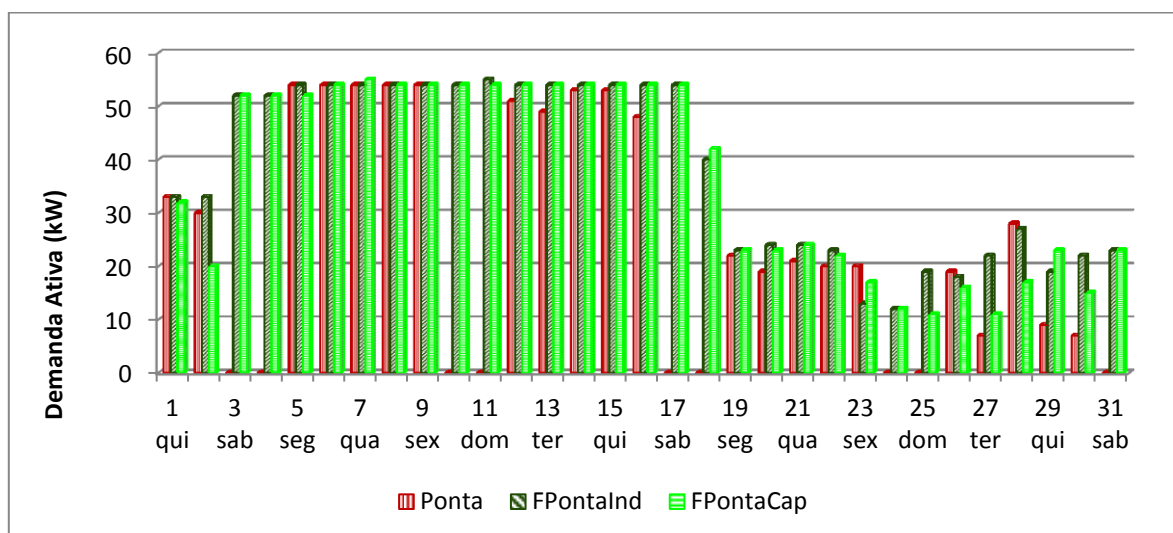


Figura 58 - Gráfico de demanda da bomba M30 durante o mês de agosto de 2013.
Fonte: Relatório Mensal de Demanda Ativa do Smart 32, 2013.

Como o consumo de energia elétrica é baseado na demanda ativa do equipamento, significa que quanto menor a demanda ativa, menor o consumo de energia elétrica e maior a eficiência energética, conforme consolidado no gráfico de consumo mensal da bomba M30 apresentado na Figura 59. Porém, o fator de potência registra um aumento considerável da potência reativa, logo, energia elétrica não utilizada e que estará presente no sistema de distribuição elétrica na qual a bomba está inserida, influenciando diretamente na qualidade da energia elétrica em uso pelos demais equipamentos da fábrica e da rede da concessionária.

Assim, a escolha do inversor de frequência visando eficiência energética é a melhor solução segundo os testes realizados, porém essa ação precisa de uma criteriosa avaliação para que o uso do inversor não comprometa a qualidade da energia elétrica do sistema de

distribuição elétrica da fábrica, podendo, inclusive, ocasionar multas com a concessionária, devido baixo fator de potência.

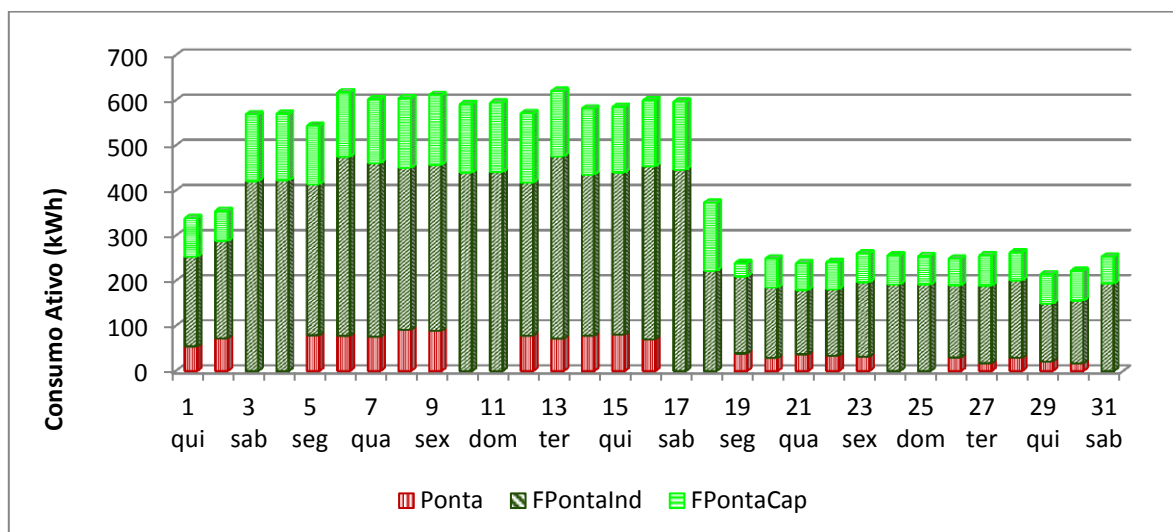


Figura 59 - Gráfico do consumo ativo de energia elétrica da bomba M30 durante o mês de Agosto de 2013.
Fonte: Relatório Mensal de Consumo Ativo do Smart 32, 2013.

Uma boa alternativa é o estudo e cálculo da aplicação de banco de capacitores tanto no acionamento dos motores com inversor de frequência como também no painel de distribuição elétrica ou painel CCM, com o objetivo de corrigir o baixo fator de potência, caso ele seja comprovado.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, o presente capítulo mostrou os resultados para correção de algumas fragilidades encontradas no antigo controle do Sistema de Abastecimento de Água da fábrica, provando e contrariando as teorias apresentadas no Capítulo 2, e apresentando novas hipóteses para alcançar eficiência energética em sistemas de abastecimento de água controlados por CLP, sensores de nível analógico e bombas centrífugas. O Capítulo 5 irá resumir as análises visando eficiência energética expostas nesse capítulo e recomendará outras pesquisas para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões técnicas-científicas obtidas no desenvolvimento deste trabalho, tanto com relação à implantação do novo projeto de automação, quanto às aplicações de novas tecnologias e controle visando à eficiência energética do Sistema de Abastecimento de Água da indústria cimenteira, cenário do estudo.

Ao final do capítulo serão sugeridas recomendações para trabalhos futuros que possam tanto complementar as análises realizadas nessa pesquisa, como também, inovar com outras teorias não abordadas neste trabalho.

5.1 CONCLUSÕES

Com o foco no objetivo principal desse trabalho, que se trata da análise do desempenho de um sistema de abastecimento de água de uma indústria cimenteira visando eficiência energética, foi desenvolvido e implantado um novo projeto de automação que tanto possibilitou a aplicação de novos controles para o sistema, como também proporcionou as medições de consumo e qualidade da energia elétrica advindas das tecnologias empregadas para a operação do sistema.

Através da aplicação do projeto da automação e os testes e medições realizados durante o desenvolvimento dessa pesquisa, comprovou-se que a automação consiste em uma modernização que além de proporcionar maior confiabilidade no controle e na operação dos processos produtivos, também se enquadra como uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de controles automáticos capazes de promover eficiência energética para os equipamentos industriais.

Durante o levantamento das fragilidades do SAA da fábrica, foram apresentadas condições desfavoráveis no funcionamento do sistema que, por sua vez, provocavam desperdício tanto de energia elétrica como também de água. Quanto ao problema do desperdício de água, ocasionado principalmente pelo controle manual da válvula de seleção para o abastecimento dos reservatórios de água, o mesmo foi solucionado através da instalação de uma válvula eletropneumática e o desenvolvimento da lógica de controle no

CLP, capaz de eliminar as falhas humanas, e os frequentes eventos de transbordo e/ou falta d'água nos reservatórios.

Com relação à falta de registro do consumo de água, foi realizada a comunicação do hidrômetro existente com o CLP, e desse com o supervisor do SAA. Desse modo, a medição do consumo da água passou a ser feita automaticamente pelo supervisor, facilitando o acompanhamento diário e a prevenção de falhas geradoras de desperdícios.

Quanto ao consumo ineficiente de energia elétrica, várias foram as soluções com base na arquitetura da automação. Um dos pontos tratados foi à ausência de registro das medições do consumo e da qualidade da energia elétrica das bombas constituintes do SAA. Para isso foi feita à inclusão da supervisão das grandezas elétricas de demanda, consumo, fator de potência e fator de carga, dos motores das bombas do SAA no sistema supervisor de Gerenciamento de Energia Elétrica e Utilidades já existente na fábrica, o *Smart 32*. Através dessa aplicação, as análises de eficiência energética necessárias, foram possibilitadas.

Em sequência, o sistema ora controlado pelo relé de controle *LOGO*[®], foi migrado para uma nova automação. Deste modo, com o SAA automatizado, as situações classificadas como fragilidades do sistema foram sendo eliminadas através de novas tecnologias e desenvolvimento de lógicas de controle utilizando a estrutura da automação implantada.

Entre as novas tecnologias instaladas destacaram-se os acionamentos eletrônicos (*soft-start* e inversores de frequência), que foram fundamentais para as análises de eficiência do consumo da energia elétrica das bombas; e como elemento diferencial e estratégico para a realização das análises, destaca-se o sensor de nível de pressão submersível, que foi essencial para a aplicação dos controles experimentados nos reservatórios de água e nas bombas centrífugas do sistema.

A automação implantada trata-se de uma configuração básica com arquitetura composta por CLP, Sistema Supervisor e Rede de Automação, sendo sua aplicação simples, que proporciona o desenvolvimento de ações com potencial de melhoria no desempenho dos processos produtivos e alcance de eficiência energética para a indústria.

Comparando a automação implantada com sistemas de automação dedicados, desenvolvidos em linguagens de programação de alto nível, tais como C++, *Matlab*, *Delphi*, *Visual Basic*, entre outros, a vantagem do CLP é que as alterações na lógica de programação e a implementação de novos controles podem ser feitas a qualquer tempo sem necessitar da parada do processo produtivo, pois qualquer mudança na lógica de controle, pode ser realizada com o programa em execução e em tempo real.

Quanto aos resultados dos testes e das medições realizadas sobre a plataforma da automação instalada no SAA, os mesmos foram eficientes e eficazes, sendo suficientes para responder aos questionamentos de eficiência energética propostos nesse trabalho.

Assim sendo, a resposta à melhor faixa de valores para o controle do nível da caixa geral foram níveis máximo e mínimo entre 100% a 90%, respectivamente. Essa faixa de controle proporcionou um consumo de energia elétrica menor do que o pior caso (entre 96 a 91%) e pouco maior do que o melhor caso (entre 100 a 70%). Por conta desse resultado, o ajuste de 100 a 90% foi definido como o melhor nível devido não somente ao consumo de energia elétrica, mas também, por decorrência do equilíbrio que esse ajuste de nível proporciona no sistema, e ainda na redução do número de partidas das bombas.

Quanto ao tipo de acionamento mais eficiente para as bombas centrífugas, os resultados apresentados pelos inversores de frequência foram os que proporcionaram maior redução no consumo de energia elétrica. Estes apresentaram uma diminuição de consumo de energia elétrica pouco maior a 50% quando comparados com os *soft-start* e partida direta.

Tais resultados confirmaram as análises realizadas em outras pesquisas científicas de eficiência energética em sistemas de bombeamento de água, já citadas no Capítulo 1 (p. 20). Nesses outros trabalhos científicos, simulações em bancadas de testes e protótipos já haviam apontado o inversor de frequência como o tipo de acionamento de bombas centrífugas de maior eficiência energética. Assim, os resultados aqui expostos e realizados para um sistema real, confirmaram as teorias existentes.

Com relação à problemática do elevado número de partidas e consumo de energia elétrica da bomba centrífuga da caixa geral, concluiu-se que o controle PID é a melhor opção de controle. Este tanto elimina o ciclo de trabalho intermitente, mantendo a bomba em operação contínua, como também reduz o consumo de energia elétrica em 2% em relação ao controle digital. Porém, quando comparado com o controle analógico com nível entre 100 a 90%, o controle PID apresenta consumo de energia elétrica 1,5% maior. Em contrapartida, o PID proporciona um aumento no tempo de vida útil do motor e mantém o nível do reservatório de água sempre cheio.

Com o acionamento da bomba M30 através do inversor de frequência, foi realizada a variação na vazão da bomba e concluiu-se que a vazão ótima de trabalho para o enchimento da caixa geral do SAA é o ajuste da frequência do motor em 45 Hz. Com essa frequência, a bomba mantém o nível do reservatório nos limites de 100 a 90%, porém necessita de tempo maior para o enchimento do mesmo. Vale destacar que para essa situação, apesar da bomba passar um tempo maior em funcionamento, o consumo de energia elétrica é 32% menor. Tais

medições demonstraram que quanto menor a frequência de rotação do motor, menor o consumo de energia elétrica.

No que diz respeito à importância de suprimir o uso de energia elétrica no horário sazonal de ponta, onde a tarifa de energia elétrica é mais elevada, não foi possível manter a bomba parada, pois o esvaziamento da caixa geral é mais rápido que a duração do HZP. Porém, apesar de não ser possível eliminar o uso, foi viável diminuir o consumo de energia elétrica, significando vantagem para empresa, uma vez que os custos podem ser reduzidos.

Dessa feita, durante o HZP foi realizado a redução da rotação do motor da bomba, mantendo o mesmo em 40 Hz até atingir o nível mínimo de 75% ou finalizar o HZP. Dessa forma o consumo de energia elétrica durante o horário sazonal de ponta foi reduzido em 47%.

Diante destes testes e implantações de novas tecnologias, bem como modificações no controle do processo, foi necessário analisar a afetação da qualidade da energia elétrica do sistema, então, constatou-se que a qualidade da energia elétrica é diretamente afetada com a inserção do inversor de frequência. O fator de potência de 0,93 quando o acionamento das bombas é feito através da partida direta e/ou *soft-start* cai para 0,49 com a aplicação do inversor de frequência.

Essa situação faz com que a opção pelo emprego do inversor de frequência seja planejada em paralelo com a instalação de outros recursos elétricos que possam compensar a interferência do mesmo na qualidade da energia elétrica. Caso contrário, a qualidade da energia do sistema de distribuição elétrica da fábrica pode apresentar uma situação crítica que implique em multa pela concessionária à empresa, devido ao não atendimento do limite mínimo de 0,92 para o fator de potência.

Por fim, comprovou-se que o ciclo de trabalho que proporciona maior eficiência ao consumo de energia elétrica das bombas centrífugas do SAA é o regime de operação contínua, onde as bombas funcionam de acordo com o controle PID, e ainda, para proporcionar eficiência energética e redução do custo da energia, sem diminuir a demanda, pode-se associar ao controle PID, o controle através do nível do reservatório durante o horário sazonal de ponta. Quando iniciado o HZP, o controle PID é paralisado e a bomba assume a rotação correspondente aos 40 Hz, aplicados ao motor pelo inversor de frequência; finalizado o HZP e/ou atingido o nível de 75% na caixa geral, a bomba volta a ser controlada pelo PID.

Com a finalização desta pesquisa, o SAA da fábrica recebeu uma nova automação, teve suas fragilidades eliminadas e atualmente possui meios de controle que permitem seu funcionamento, operação, supervisão e comando de forma mais eficiente e consequentemente, mais econômico para a empresa. Além dessas vantagens, vale destacar que os vigilantes e os

eletricistas da fábrica foram beneficiados através de treinamentos para operação e supervisão de um sistema automatizado, o que significa melhoria na qualidade da mão-de-obra da empresa.

5.1.1 Contribuições Técnico-Científicas

Em resumo, a presente pesquisa apresentou contribuições técnicas-científicas tanto de comprovações de pesquisas científicas já realizadas anteriormente, como também de negações e novas contribuições científicas. Segue as contribuições que esse trabalho se propôs:

- **Comprovações Científicas:** o inversor de frequência é o tipo de acionamento que proporciona maior eficiência no consumo de energia elétrica de bombas centrífugas; o inversor de frequência interfere na qualidade da energia elétrica e por conta disso sua aplicação deve ser avaliada criteriosamente e ser acompanhado de medidas de correção do fator de potência do sistema de distribuição elétrica da instalação; e quanto menor a frequência de rotação do motor, menor o consumo de energia elétrica do mesmo.

- **Negações Científicas:** ficou comprovado que é possível alcançar eficiência energética com a aplicação de inversores de frequência em sistemas com característica de consumo contínuo.

- **Novas Contribuições Científicas:** o ciclo de trabalho contínuo através do controle PID consome energia elétrica equiparada com o controle analógico, porém, mantém o regime de trabalho da bomba ininterrupto, proporcionando maior vida útil ao conjunto motor-bomba e mantendo o nível dos reservatórios constantes; a variação da faixa de valores entre os ajustes de nível máximo e nível mínimo durante o controle analógico ou digital do reservatório de água geral possui pouca diferença em termos de consumo de energia elétrica, e dessa feita o ajuste do nível deve ser feito com referência no número de partidas/hora da bomba e o equilíbrio geral do sistema; e através da variação da frequência de rotação é possível manter o motor da bomba em uma rotação mínima pela qual mantém o nível de segurança do reservatório de água durante o Horário Sazonal de Ponta e diminui o consumo de energia elétrica sem necessitar parar completamente o sistema.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa foram levantados pontos de melhorias que não se enquadravam no escopo do trabalho, desta feita, tais observações aplicam-se como sugestões para trabalhos futuros. Seguem de forma enumerada as possibilidades de novos estudos:

1. **Análise da eficiência energética do inversor de frequência em outros equipamentos industriais:** estudo de eficiência energética com inversor de frequência para outros equipamentos industriais, tais como: exaustores, ventiladores, correias transportadoras, elevadores de caçamba e de corrente, compressores, e etc. Ao final, verificar se o inversor permanece sendo o acionamento mais eficiente para os equipamentos analisados;

2. **Análise do consumo de energia elétrica em cargas que funcionam com frequência superior a 60 Hz:** estudo da eficiência energética do inversor quando a carga está operando em uma rotação superior à frequência nominal de 60 Hz;

3. **Análise das consequências à vida útil dos motores quando acionados com inversor de frequência:** estudo dos pontos desfavoráveis à motorização quando esta fica submetida continuamente a variação de frequência;

4. **Análise de eficiência energética no SAA focando meios de minimizar o desperdício de água:** estudo de métodos de controle de água de forma a diminuir seus desperdícios e consequentemente consumo de energia elétrica;

5. **Análise da automação como ferramenta de diagnóstico e controle da manutenção preditiva nos equipamentos industriais:** estudo do sistema supervisor como uma ferramenta para o gerenciamento da manutenção preditiva;

6. **Ajuste das constantes do PID de forma a torná-lo mais eficiente:** desenvolvimento da função de transferência do SAA e determinação das constantes proporcional, integral e derivativa do PID que proporcione melhor eficiência energética para o sistema;

7. **Análise da aplicação de inversores de frequência em bombas submersa:** estudo das vantagens e desvantagens da aplicação de inversores de frequência em bombas submersas.

8. **Aplicação de técnicas de otimização do SAA:** estudo para aplicação de técnicas de otimização (lógica *Fuzzy*, Inteligência Artificial, entre outros) para o controle do *SetPoint* do nível da caixa geral durante o Horário Sazonal de Ponta.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAHAMSOHN, Paulo. **Redação Científica**. [Reimp.]. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009.

ALBUQUERQUE, P. U; B. de; ALEXANDRIA, A. R. de **Redes Industriais**: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído: protocolos industriais, aplicações SCADA. 2 ed. São Paulo: Ensino Profissional, 2009.

ALMEIDA, W. P. **Contribuições ao estudo das tensões de eixo e correntes de modo comum em motores de indução acionados por conversores PWM**. 211. 170 f. Dissertação em Engenharia Elétrica. – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

ARAÚJO, W. R. **Aplicação de técnicas de inteligência artificial visando eficiência energética e estimação de parâmetros em sistemas motrizes industriais**. 2008. 98 f. Dissertação em Engenharia Elétrica. (Área de concentração em Energia) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande.

BAJAY, Sergio Valdir, GOLLA, Filipe Debonji; DORILEO, Ivo Leandro (Coord.). **Oportunidade de eficiência energética para a indústria**: relatório setorial, setor cimento. Brasília: CNI, 2010.

Brasília (Estado). MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. ELETROBRÁS/PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento**: manual prático. [Brasília], 2010?

COGO, J. R. et al. Análise do desempenho dos motores trifásicos nacionais. **Revista Eletricidade Moderna**, [São Paulo], v. 21, n. 227, p. 26-39, fev. 1993.

DUTRA. J. B. A. **Eficiência energética no controle da vazão em sistemas de bombeamento de água**: uso de válvula e controle de velocidade. Paraíba do Sul: Engenharia Elétrica – Consultoria & Treinamento, 2005.

ELEOTERO. B. C. **Redução de custos com energia elétrica em sistemas de bombeamento**: estudo de caso sistema de abastecimento de água em Capinzal/Ouro – (SC). 2008. 84 f. Monografia em Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

ELETROBRÁS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS (MME). PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro, 2005.

_____/PROCEL EDUCAÇÃO (MME). **Conservação de Energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3 ed. Itajubá, 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (MME). **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007

_____. **Balanço Energético Nacional 2013**: ano base 2012. Rio de Janeiro, 2013.

FITZGERAL, A. E.; KINGSLEY, C. Jr.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.

FRANCHI, Claiton Moro. **Inversores de Frequência**: Teoria e Aplicações. 2 ed. [Reimpr. 6]. São Paulo: Érica, 2012.

_____; CAMARGO, Valter Luís Arlindo de. **Controladores Lógicos Programáveis**: Sistemas Discretos. 2 ed. [Reimpr. 7]. São Paulo: Érica, 2012.

GARCIA, A. G. P. **Impacto da Lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. 127 f. Dissertação em Planejamento Energético – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

GEORGINI, Marcelo. **Automação Aplicada**: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLC's. 9 ed. [Reimpr. 7] São Paulo: Érica, 2012.

Germany. IFM Eletronic. *New submersible pressure transmitter for hydrostatic level measurement*: article. Germany, 2008, 2 p.

GESTÃO DE ENERGIA E UTILIDADES LTDA. **GESTAL**. Disponível em: <www.gestal.com>. Acesso em: 28 jul. 2013.

GOLDEMBERGUE, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. 2 ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 mai. 2012.

_____. **Produto Interno Bruto dos Municípios 2010**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pibmunicipios/2010>. Acesso em: 15 jul. 2012.

Jaraguá do Sul (Santa Catarina). WEG. **Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM**: guia técnico. Jaraguá do Sul, 2009, 36 p.

_____. **Motores Elétricos**: guia de especificação. Jaraguá do Sul, 2012, 68 p.

MACHADO, F. V. P. Eficiência energética de conjuntos moto-bomba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2, 2007, Vitória. **Anais...** Vitória: ABEE, 2007. p. 6.

MACINTYRE, A. J. **Equipamentos Industriais e de Processo**. [Reimpr.] Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. [Reimpr.] Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Plano Nacional de Eficiência Energética**: premissas e diretrizes básicas. [Brasília], 2011.

Mossoró (Rio Grande do Norte). HALLIBURTON. **Relatório de recuperação do poço P-35**. Mossoró, 1989, 28 p.

MOURA, G. N. P. **A relação entre água e energia**: gestão energética nos sistemas de abastecimento de água das companhias de saneamento básico no Brasil. 2010. 203 f. Dissertação em Ciências em Planejamento Energético – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

_____. _____. 2 ed. [Reimpr.] Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MOREIRA, S. G. **Estratégias de simulação para análise em sistemas de bombeamento monitorado via supervisorio**. 2008. 92 f. Dissertação em Engenharia Elétrica. (Área de concentração em Energia) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande.

RAMOS, M. C. E. S. **Implementação de motores de alto rendimento em uma indústria de alimentos**: estudo de caso. 2005. 91 f. Dissertação em Energia - Universidade de São Paulo. São Paulo.

REGIS, R. L. **Eficiência energética em processos de bombeamento d'água**. 2010. 90 f. Monografia em Engenharia Elétrica – Universidade Federal da Bahia. Salvador.

SANTOS, A. L. **Avaliação do potencial de conservação de energia em motores elétricos no Brasil**. 2005. 110 f. Dissertação em Ciência em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.

[São Paulo] (Estado). Gestão de Energia e Utilidades Ltda. **Sistema de Gerenciamento de Energia Elétrica e Utilidades Smart Energy**: manual do usuário. [São Paulo], 2003. 90 p.

_____. GE-GEVISA S.A. **Motor de indução de corrente alternada**: notas técnicas motores: NT-01. [São Paulo], 2000, 6 p.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Sindicato Nacional da Indústria do Cimento 2010**. São Paulo, 2010.

SOLA, A. V. H. Eficiência energética nas industriais: cenários & oportunidades. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 24, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ENEGEP, 2004.

SOUZA, H. M; et al. Reflexões sobre os principais programas de eficiência energética existentes no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, [São Paulo], v. 15, n. 1, p. 7-26, set. 2009.

TREINAMENTO ROCKWELL AUTOMATION, 2004, Mossoró. **Programação e operação do RSLogix500**. São Paulo: Rockwell Automation, 1998.

_____, 2003, Mossoró. **SLC-500**: manual de montagem e instalação. São Paulo: Rockwell Automation, [2000?].

_____, 2010, Mossoró. **Redes Industriais: Ethernet e Hart**. São Paulo: Rockwell Automation, 2010.

_____, 2012, São Paulo. **RSView32: programação I e II**. São Paulo: Rockwell Automation, 2012.

TROJAN, Flavio; KOVALESKI, João Luiz. Automação no abastecimento de água: uma ferramenta para redução de perdas e melhoria nas condições de trabalho. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 12, 2005, Bauru. **Anais...** Bauru:SIMPEP, 2005.

TSUTIYA, M. T. Redução do custo de energia elétrica em estações de água e esgoto. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 19, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABES, 2011.

UM, DESA, CLASP. **Avaliação dos índices de eficiência energética para motores trifásicos de indução**. Rio de Janeiro, 2005.

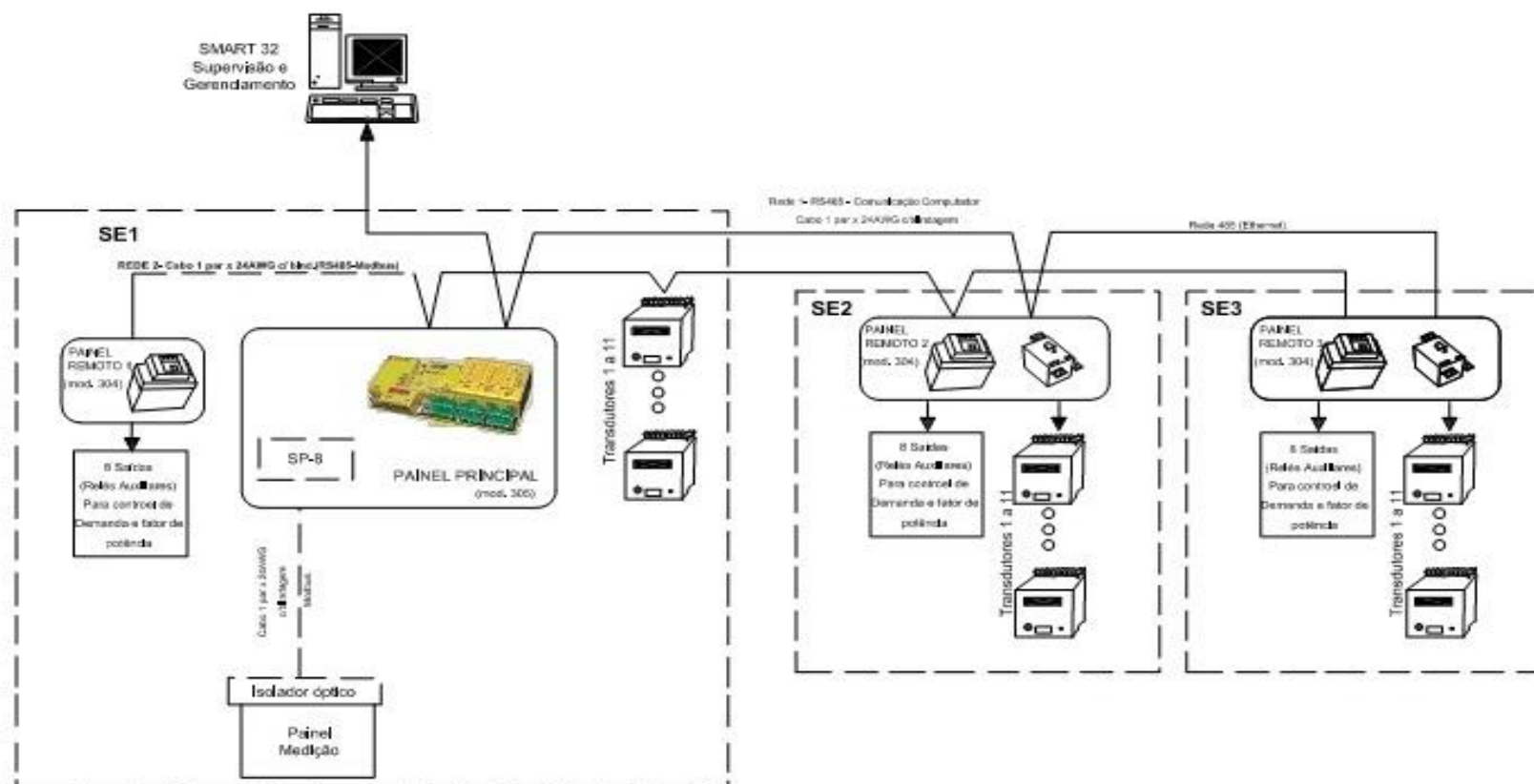
WEG. Considerações sobre redimensionamento de motores elétricos de indução. **Revista Lumiere Eletric**. [Porto Alegre], n. 166, [entre 2006 a 2012]. Disponível em <<http://www.weg.net>>. Acesso em: 12 jun. 2012.

ANEXOS

Anexo A – Arquitetura do Sistema GESTAL

- Anexo A -

Arquitetura do Sistema GESTAL



APÊNDICES

Apêndice A - Lista de equipamentos e instrumentos de entrada e saída

Apêndice B - Lista de entradas e saídas do CLP

Apêndice C - *Layout* do painel *Smart 2.2*.

Apêndice D - *Layout* do painel de acionamento dos drivers eletrônicos

Apêndice E - *Layout* do painel de comando e controle do SAA

Apêndice F - *Layout* das bombas de captação de água e disposição física dos painéis de acionamento, comando, controle e medição do SAA

Apêndice G - Lista de material utilizado na automação

- Apêndice A -

Lista de equipamentos e instrumentos de entrada e saída

LISTA DE EQUIPAMENTOS						
TAG EQUIP.	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	REMOTA	COMENTARIOS AUTOMAÇÃO	TIPO	DISPOSITIVO	DESCRIÇÃO DETALHADA
V01MT01_1	MOTOR BOMBA SUBMERSA M22	I:6/0	Botoeira seletora painel D-20	ED	<i>Soft-start</i> / inversor	Liga local M22
		I:6/1	Botoeira seletora painel D-20	ED	<i>Soft-start</i> / inversor	Desliga local/emergência M22
		I:1/0	Sinal <i>soft-start</i>	ED	<i>Soft-start</i>	Funcionando <i>soft start</i> M22
		I:1/1	Sinal contator <i>by-pass</i>	ED	<i>Soft-start</i>	<i>By-pass soft start</i> M22
		I:1/2	Sinal <i>soft-start</i>	ED	<i>Soft-start</i>	Defeito <i>soft-start</i> M22
		O:2/0	Sinal <i>soft-start</i>	SD	<i>Soft-start</i>	Liga <i>soft-start</i> M22
		I:1/3	Sinal IF	ED	Inversor de frequência	Funcionando inversor M22
		I:1/4	Sinal IF	ED	Inversor de frequência	Defeito inversor M22
		O:2/1	Sinal IF	SD	Inversor de frequência	Liga/desliga inversor M22
V02MT01_1	MOTOR BOMBA D'ÁGUA 1 CISTERNA P/ BACIA REFRIGERAÇÃO M26	I:6/2	Botoeira seletora painel D-20	ED	Partida direta / <i>soft-start</i> / inversor	Liga local M26
		I:6/3	Botoeira seletora painel D-20	ED	Partida direta / <i>soft-start</i> / inversor	Desliga local/emergência M26
		I:1/5	Sinal contator C1	ED	Partida direta	Funcionando partida direta M26
		I:1/6	Sinal disjuntor Q1	ED	Partida direta	Defeito partida direta M26
		O:2/2	Sinal disjuntor Q2	SD	Partida direta	Liga/desliga partida direta M26

LISTA DE EQUIPAMENTOS						
TAG EQUIP.	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	REMOTA	COMENTARIOS AUTOMAÇÃO	TIPO	DISPOSITIVO	DESCRIÇÃO DETALHADA
		I:1/7	Sinal <i>soft-start</i>	ED	<i>Soft-start</i>	Funcionando <i>soft start</i> M26
		I:1/8	Sinal contator <i>by-pass</i>	ED	<i>Soft-start</i>	<i>By-pass soft start</i> M26
		I:1/9	Sinal <i>soft-start</i>	ED	<i>Soft-start</i>	Defeito <i>soft-start</i> M26
		O:2/3	Sinal <i>soft-start</i>	SD	<i>Soft-start</i>	Liga/desliga <i>soft-start</i> M26
		I:1/10	Sinal IF	ED	Inversor de frequência	Funcionando inversor M26
		I:1/11	Sinal IF	ED	Inversor de frequência	Defeito inversor M26
		O:2/4	Sinal IF	SD	Inversor de frequência	Liga/desliga inversor M26
V03MT01_1	MOTOR BOMBA D'ÁGUA 1 BACIA REFRIG P/ CAIXA D'ÁGUA GERAL M30	I:6/4	Botoeira seletora painel D-20	ED	Partida direta / <i>soft-start</i> / inversor	Liga local M30
		I:6/5	Botoeira seletora painel D-20	ED	Partida direta / <i>soft-start</i> / inversor	Desliga local/emergência M30
		I:1/12	Sinal contator C1	ED	Partida direta	Funcionando partida direta M30
		I:1/13	Sinal disjuntor Q1	ED	Partida direta	Defeito partida direta M30
		O:2/5	Sinal disjuntor Q2	SD	Partida direta	Liga/desliga partida direta M30
		I:1/14	Sinal <i>soft-start</i>	ED	<i>Soft-start</i>	Funcionando <i>soft start</i> M30
		I:1/15	Sinal contator <i>by-pass</i>	ED	<i>Soft-start</i>	<i>By-pass soft start</i> M30
		I:5/0	Sinal <i>soft-start</i>	ED	<i>Soft-start</i>	Defeito <i>soft-start</i> M30
		O:2/6	Sinal <i>soft-start</i>	SD	<i>Soft-start</i>	Liga/desliga <i>soft-start</i> M30
		I:5/1	Sinal IF	ED	Inversor de frequência	Funcionando inversor M30
		I:5/2	Sinal IF	ED	Inversor de frequência	Defeito inversor M30
		O:2/7	Sinal IF	SD	Inversor de frequência	Liga/desliga inversor M30
V05EV01_1	VÁLVULA PNEUMÁTICA MANOBRA CX D'ÁGUA ESCRITÓRIO.	O:2/8	Sinal válvula pneumática	SD	Simples solenoide	Abre/fecha válvula pneumática de desvio caixa d'água escritório

LISTA DE INSTRUMENTOS					
TIPO	INSTRUM.	TAG	REMOTA	DESCRIÇÃO P/ AUTOMAÇÃO	DESCRIÇÃO DETALHADA
ED	V01L01_1	LL_LH_POÇO	I:5/3	Nível alto-baixo poço	Nível trabalho poço
ED	V01C01_1	CONS_AGUA_POÇO	I:5/4	Consumo água bomba submersa	Vazão água bomba submersa
EA	V01S01_1	RPM_M22	I:3.0	Indicação rotação bomba submersa M22	Rotação real bomba submersa M22
SA	V01S02_1	SP_RPM_M22	O:4.0	Referência rotação bomba submersa M22	Referência rotação bomba submersa M22
ED	V02L01_1	LL_LH_CISTERNA	I:5/5	Nível alto-baixo cisterna	Nível liga-desliga bomba submersa M22
ED	V02L02_1	LLL_CISTERNA	I:5/6	Nível super baixo cisterna	Nível emergência-liga bomba submersa
EA	V02L03_1	NÍVEL_CISTERNA	I:3.4	Nível cisterna	Nível controle cisterna
EA	V02S01_1	RPM_M26	I:3.1	Indicação rotação bomba recalque M26	Rotação real bomba recalque M26
SA	V02S03_1	SP_RPM_M26	O:4.1	Referência rotação bomba recalque M26	Referência rotação bomba recalque M26
ED	V03L01_1	LL_LH_BACIA	I:5/7	Nível alto-baixo bacia de refrigeração	Nível liga-desliga bomba recalque M26
ED	V03L02_1	LLL_BACIA	I:5/8	Nível super baixo bacia de refrigeração	Nível emergência-liga bomba recalque M26
EA	V03L03_1	NÍVEL_BACIA	I:3.5	Nível bacia de refrigeração	Nível controle bacia de refrigeração
EA	V03S01_1	RPM_M30	I:3.2	Indicação rotação bomba caixa d'água M30	Rotação real bomba caixa d'água M30
SA	V03S03_1	SP_RPM_M30	O:4.2	Referência rotação bomba caixa d'água M30	Referência rotação bomba caixa d'água M30
ED	V04L01_1	LL_LH_CX_GERAL	I:5/9	Nível alto-baixo caixa d'água geral	Nível liga-desliga bomba caixa d'água geral
ED	V04L02_1	LLL_CX_GERAL	I:5/10	Nível super baixo caixa d'água geral	Nível emergência-liga bomba caixa d'água M30
EA	V04L03_1	NÍVEL_CX_GERAL	I:3.6	Nível caixa d'água geral	Nível controle caixa d'água geral
ED	V05L01_1	LL_LH_CX_ESC	I:5/11	Nível alto-baixo caixa d'água escritório	Nível fecha-abre válvula caixa d'água esc.
ED	V05L02_1	LLL_CX_ESC	I:5/12	Nível super baixo caixa d'água escritório	Nível emergência-abre válvula caixa d'água esc.
EA	V05L03_1	NÍVEL_CX_ESC	I:3.7	Nível caixa d'água escritório	Nível controle caixa d'água escritório
ED	V05X01_1	ABERTA_VÁLV	I:5/13	Posição aberta válvula caixa d'água esc.	Válvula caixa d'água escritório aberta
ED	V05X02_1	FECHADA_VÁLV	I:5/14	Posição fechada válvula caixa d'água esc.	Válvula caixa d'água escritório fechada
ED	V11P01_1	DEMANDA	I:5/15	Demanda liberada	Demanda liberada
ED	V06L01_1	RELÉ_NÍVEL_POÇO	I:6/6	Funcionando relé de nível poço, cisterna e bacia de refrigeração.	Falha relé nível poço, cisterna e bacia de refrigeração.
ED	V10L01_1	RELÉ_NÍVEL_CX_ESC	I:6/7	Funcionando relé de nível caixa d'água esc.	Falha relé nível caixa d'água escritórios

- Apêndice B -

Lista de entradas e saídas do CLP

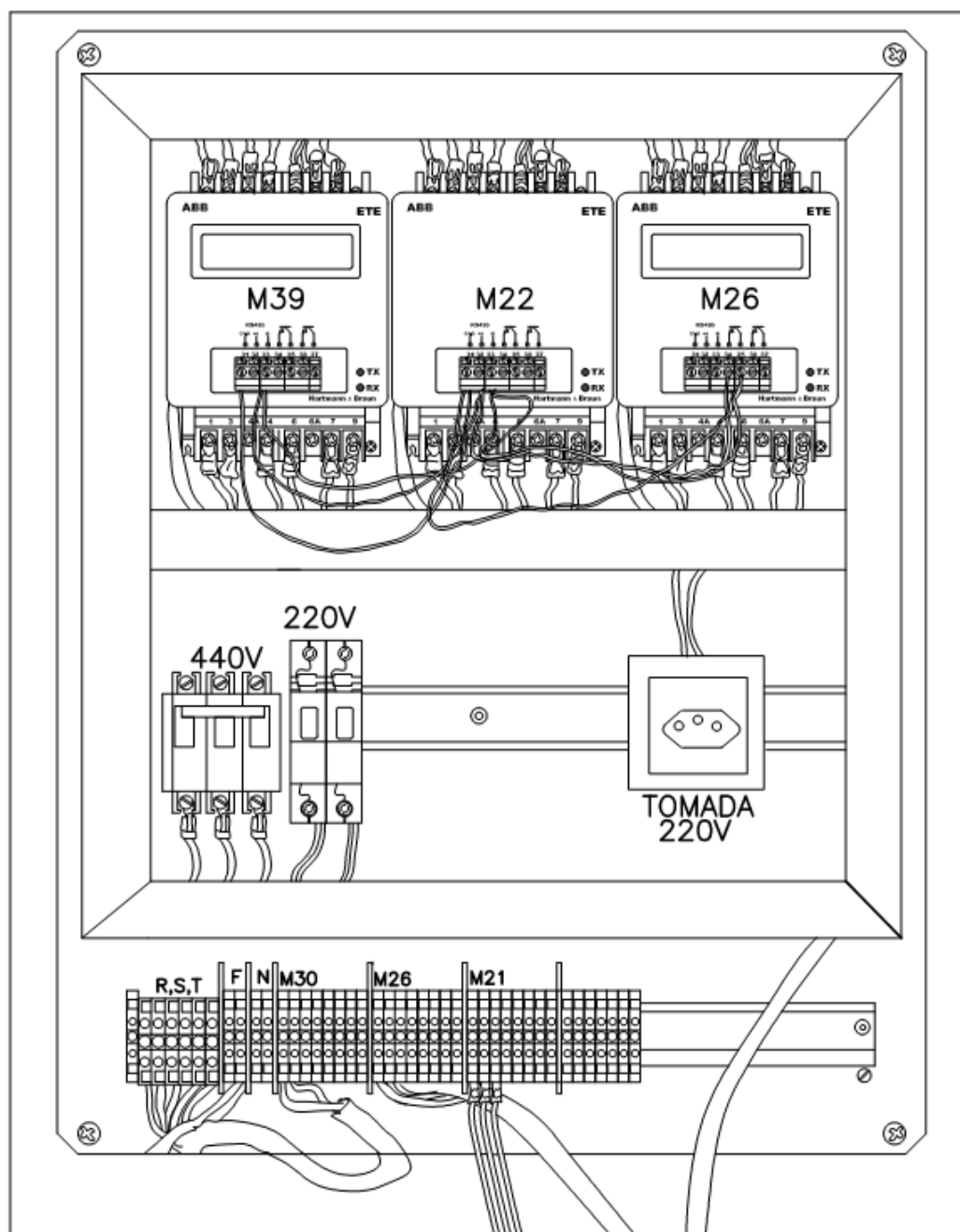
SLOT 1			SLOT 2		
ENTRADA DIGITAL - ED			SAÍDA DIGITAL – SD		
Cartão	1746-IM16		Cartão	1746-OW16	
Remota	TAG	Descrição Detalhada	Remota	TAG	Descrição Detalhada
I:1/0	FUNC_SS_M22	Funcionando <i>soft start</i> M22	O:2/0	LIGA_DESL_SS_M22	Liga/desliga <i>soft-start</i> M22
I:1/1	BY-PASS_SS_M22	<i>By-pass soft start</i> M22	O:2/1	LIGA_DESL_IF_M22	Liga/desliga inversor M22
I:1/2	DEFEITO_SS_M22	Defeito <i>soft-start</i> M22	O:2/2	LIGA_DESL_PD_M26	Liga/desliga partida direta M26
I:1/3	FUNC_IF_M22	Funcionando inversor M22	O:2/3	LIGA_DESL_SS_M26	Liga/desliga <i>soft-start</i> M26
I:1/4	DEFEITO_IF_M22	Defeito inversor de frequência M22	O:2/4	LIGA_DESL_IF_M26	Liga/desliga inversor M26
I:1/5	FUNC_PD_M26	Funcionando partida direta M26	O:2/5	LIGA_DESL_PD_M30	Liga/desliga partida direta M30
I:1/6	DEFEITO_PD_M26	Defeito partida direta M26	O:2/6	LIGA_DESL_SS_M30	Liga/desliga <i>soft-start</i> M30
I:1/7	FUNC_SS_M26	Funcionando <i>soft start</i> M26	O:2/7	LIGA_DESL_IF_M30	Liga/desliga inversor M30
I:1/8	BY-PASS_SS_M26	<i>By-pass soft start</i> M26	O:2/8	ABRE_FECHA_VÁLV	Abre/fecha válvula pneumática de desvio caixa d'água escritórios
I:1/9	DEFEITO_SS_M26	Defeito <i>soft-start</i> M26	O:2/9	LIGA_BY_PASS_SS_M22	Liga <i>by-pass soft-start</i> M22
I:1/10	FUNC_IF_M26	Funcionando inversor M26	O:2/10	LIGA_BY_PASS_SS_M26	Liga <i>by-pass soft-start</i> M26
I:1/11	DEFEITO_IF_M26	Defeito inversor de frequência M26	O:2/11	LIGA_BY_PASS_SS_M30	Liga <i>by-pass soft-start</i> M30
I:1/12	FUNC_PD_M30	Funcionando partida direta M30	O:2/12	LIGA_DESL_PD_M24	Liga/desliga partida direta M24
I:1/13	DEFEITO_PD_M30	Defeito partida direta M30	O:2/13	LIGA_DESL_PD_M28	Liga/desliga partida direta M28
I:1/14	FUNC_SS_M30	Funcionando <i>soft start</i> M30	O:2/14	Vazio	Vazio
I:1/15	BY-PASS_SS_M30	<i>By-pass soft start</i> M30	O:2/15	Vazio	Vazio

SLOT 3			SLOT 4		
ENTRADA ANALÓGICA - EA			SAÍDA ANALÓGICA - SA		
Cartão	1746-NI8		Cartão	1746-NO8I	
Remota	TAG	Descrição Detalhada	Remota	TAG	Descrição Detalhada
I:3.0	RPM_M22	Indicação rotação bomba submersa M22	O:4.0	SP_RPM_M22	Referência rotação bomba submersa M22
I:3.1	RPM_M26	Indicação rotação bomba M26	O:4.1	SP_RPM_M26	Referência rotação bomba recalque M26
I:3.2	RPM_M30	Indicação rotação bomba M30	O:4.2	SP_RPM_M30	Referência rotação bomba caixa d'água geral M30
I:3.3	Vazio	Vazio	O:4.3	Vazio	Vazio
I:3.4	NÍVEL_CISTERNA	Nível analógico cisterna	O:4.4	Vazio	Vazio
I:3.5	NÍVEL_BACIA	Nível analógico bacia de refrigeração	O:4.5	Vazio	Vazio
I:3.6	NÍVEL_CX_GERAL	Nível analógico caixa d'água geral	O:4.6	Vazio	Vazio
I:3.7	NÍVEL_CX_ESC	Nível analógico caixa d'água escritórios	O:4.7	Vazio	Vazio
I:3.8	CORRENTE_M22	Indicação corrente bomba M22	xxx	xxx	xxx
I:3.9	CORRENTE_M26	Indicação corrente bomba M26	xxx	xxx	xxx
I:3.10	CORRENTE_M30	Indicação corrente bomba M30	xxx	xxx	xxx
I:3.11	Vazio	Vazio	xxx	xxx	xxx
I:3.12	Vazio	Vazio	xxx	xxx	xxx
I:3.13	Vazio	Vazio	xxx	xxx	xxx
I:3.14	Vazio	Vazio	xxx	xxx	xxx
I:3.15	Vazio	Vazio	xxx	xxx	xxx

SLOT 5			SLOT 6		
ENTRADA DIGITAL – ED			ENTRADA DIGITAL – ED		
Cartão	1746-IM16		Cartão	1746-IM16	
Remota	TAG	Descrição Detalhada	Remota	TAG	Descrição Detalhada
I:5/0	DEFEITO_SS_M30	Defeito <i>soft-start</i> M30	I:6/0	LIGA_LOCAL_M22	Liga local M22
I:5/1	FUNC_IF_M30	Funcionando inversor de frequência M30	I:6/1	DESL_LOCAL_M22	Desliga local/emergência M22
I:5/2	DEFEITO_IF_M30	Defeito inversor de frequência M30	I:6/2	LIGA_LOCAL_M26	Liga local M26
I:5/3	LL_LH_POÇO	Nível alto-baixo do poço	I:6/3	DESL_LOCAL_M26	Desliga local/emergência M26
I:5/4	HIDROMETRO	Medição consumo água	I:6/4	LIGA_LOCAL_M30	Liga local M30
I:5/5	LL_LH_CISTERNA	Nível alto-baixo cisterna	I:6/5	DESL_LOCAL_M30	Desliga local/emergência M30
I:5/6	LLL_CISTERNA	Nível super baixo cisterna	I:6/6	FALHA_ALIM_RELES	Falha alim relé nível poço, cisterna, bacia e cx. geral
I:5/7	LL_LH_BACIA	Nível alto-baixo bacia de refrigeração	I:6/7	FALHA_ALIMT_CX_ESC	Falha alimentação relé nível cx escritórios
I:5/8	LLL_BACIA	Nível super baixo bacia de refrigeração	I:6/8	FUNC_PD_M24	Funcionando partida direta M24
I:5/9	LL_LH_CX_GERAL	Nível alto-baixo caixa d'água geral	I:6/9	DEFEITO_PD_M24	Defeito partida direta M24
I:5/10	LLL_CX_GERAL	Nível super baixo caixa d'água geral	I:6/10	FUNC_PD_M28	Funcionando partida direta M28
I:5/11	LL_LH_CX_ESC	Nível alto-baixo caixa d'água escritórios	I:6/11	DEFEITO_PD_M28	Defeito partida direta M28
I:5/12	LLL_CX_ESC	Nível super baixo caixa d'água escritórios	I:6/12	LIGA_LOCAL_M24	Liga local M24
I:5/13	ABERTA_VÁLV	Posição aberta válvula caixa d'água escritórios	I:6/13	DESL_LOCAL_M24	Desliga local/emergência M24
I:5/14	FECHADA_VÁLV	Posição fechada válvula caixa d'água escritórios	I:6/14	LIGA_LOCAL_M28	Liga local M28
I:5/15	DEMANDA_LIBERADA	Demanda liberada	I:6/15	DESL_LOCAL_M28	Desliga local/emergência M28

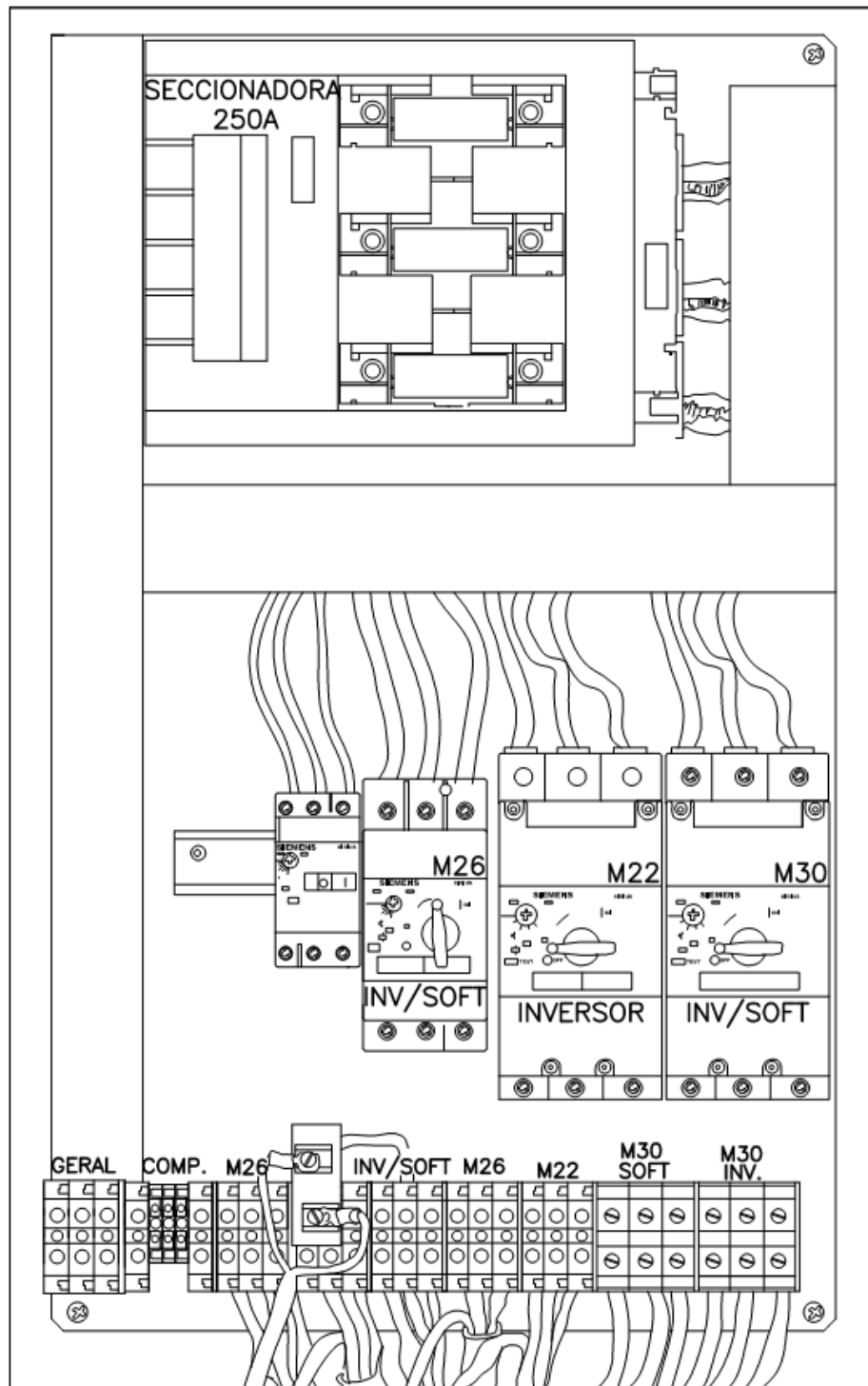
- Apêndice C -

Layout do painel Smart 2.2.



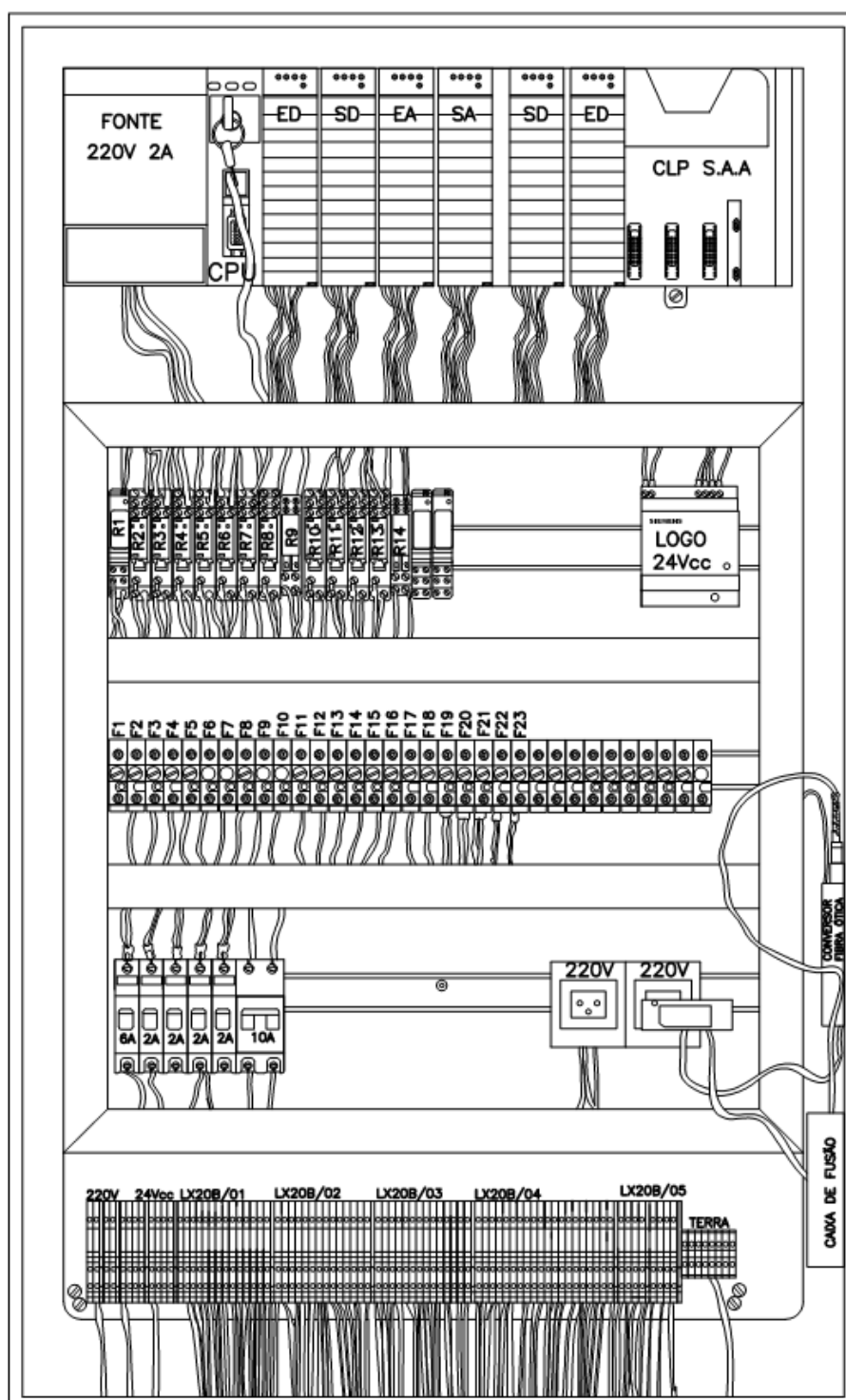
- Apêndice D -

Layout do painel de acionamento dos drivers eletrônicos



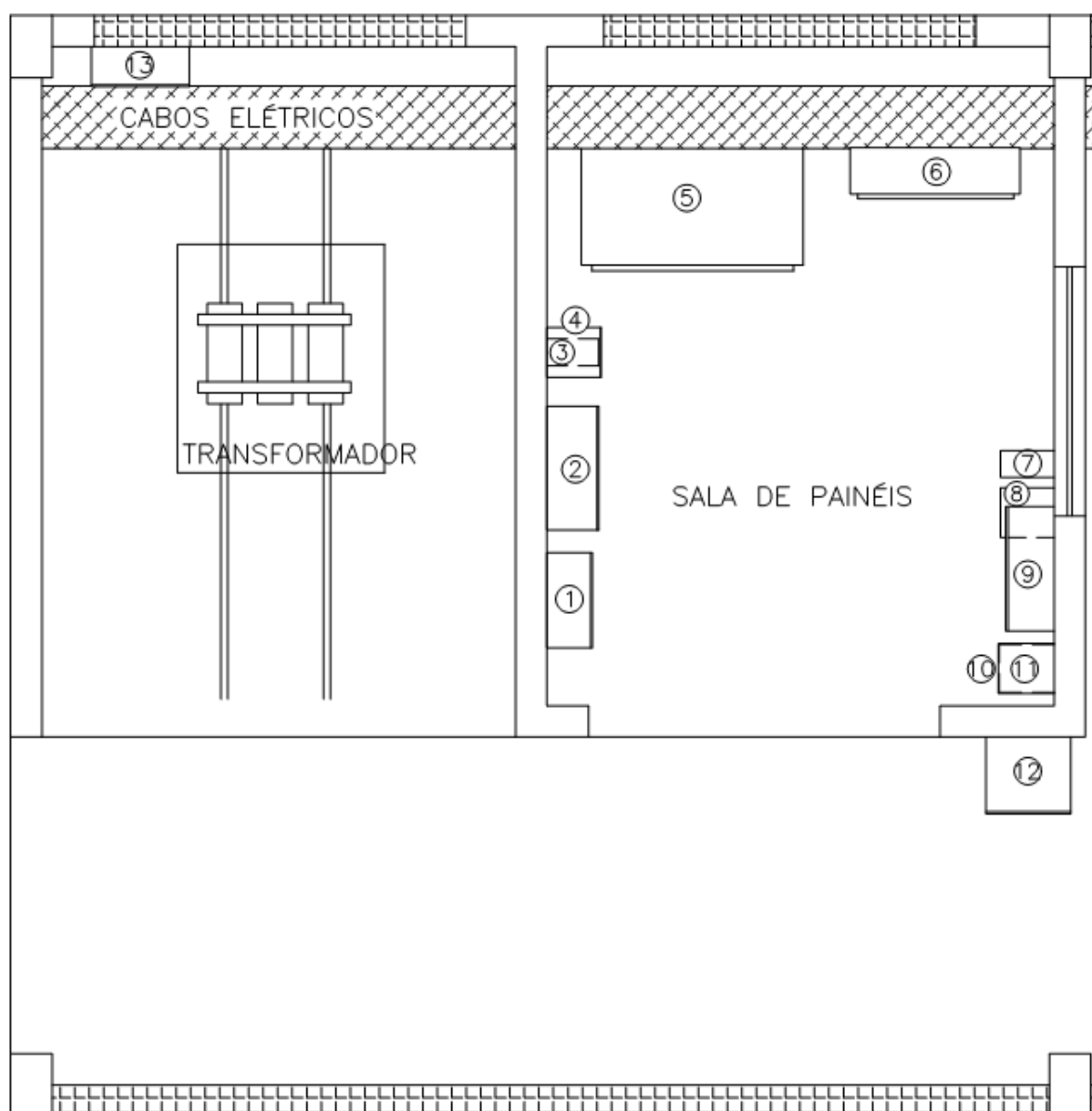
- Apêndice E -

Layout do painel de controle do SAA



- Apêndice F -

Layout da disposição física dos painéis de acionamento, comando e controle do SAA.



Legenda:

1. Painei <i>SMART</i> 2.2	5. Painei D20	9. Painei D20B
2. Painei Controle SAA	6. Painei D20A (Incêndio)	10 e 11. Disjuntores e Contatores
3. <i>Soft-Start</i> M26	7. <i>Soft-Start</i> M30	12. Inversor de Frequência M30
4. Inversor de Frequência M26	8. <i>By-pass Soft-Start</i> M30	13. Painei D20.1

- Apêndice G -

Lista de materiais utilizados na automação.

Material para Montagem do Painel de Controle SAA			
Item	Descrição do Material	Quant.	Und.
1	Painel de comando tipo CE. Com flange de montagem 1000x600x250mm Ref.901129. Fab. CEMAR	1	pç
2	Chassi para 10 slot Fab. Allen Bradley-Rockwell. Ref.1756-A10 Alen Bradley	1	pç
3	Módulo eletrônico de entrada digital 16ED/170-265V. Ref.1746-IM16 Alen Bradley	3	pç
4	Modulo eletrônico de saída digital 16SD/170-265V. Ref.1746-OW16 Alen Bradley	1	pç
5	Módulo eletrônico de entrada analógica 8EA-10Vcc/4-20ma/24Vcc. Ref.1746-NI8 Alen Bradley	1	pç
6	Módulo eletrônico de saída analógica 8SA-4-20ma/24Vcc. Ref.1746-NO8I Alen Bradley	1	pç
7	Módulo eletrônico CPU SLC 5/05 Memória 16kx16bit. Ref.1747-l551 Alen Bradley	1	pç
8	Fonte de Alimentação aplicação SLC-500 120/220vac Ref.1746-P2 Rockwell	1	pç
9	Fonte de Alimentação 24V/2,5A. Ref.6EP1332-1SH42 para LOGO Siemens	1	pç
10	Base relé ind. Série 700-HK montagem em trilho DIN plug-in 8 pinos Alen Bradley 700HN122	13	pç
11	Relé industrial plug-in 8 pinos 220V/2 contatos reversíveis 8A. Ref:700-HK32A2 Allen Bradley	13	pç
12	Relé modular de interface 24Vcc 6A 2NAF Ref.2967060 Phoenix Contact	3	pç
13	Conector borne de dois andares Ref. UKK B3/2,5mm² Fab. Phoenix Contact	100	pç
14	Conector passagem melamina 750V 27A Ref. Sak 2,5 Krg Conexel	15	pç
15	Canaleta para cabos de comando 30x50x2000 cor cinza Fab. Hellermann	2	pç
16	Cabo de controle 1x1,0mm² flex.4 preto PVC/750V	200	mt
17	Conector fusível 220V com led sinalização tipo Sak 10mm² Fab. Conexel	25	pç
18	Conector fusível 24Vcc com led sinalização tipo Sak 10mm² Fab. Conexel	6	pç
19	Terminal pré-isolado tipo Rocket Fin 1,50mm² cod. Rp-150 Hollingsworth	350	pç
20	Trilho suporte aço p/ conector Sak comp.2 mt Ref.Ts-32 Conexel	1	mt
21	Perfil montagem elétrica Din 35x7,5x2000mm aço carb. galv. Siemens 5ST0 141	3	mt
22	Rebite de alumínio 3/16"x3/4"	60	pç
23	Disjuntor monopolar 2A Ref.SSX1 102-7 Siemens	2	pç
24	Disjuntor monopolar 1A Ref.SSX1 101-7 Siemens	3	pç
25	Disjuntor monopolar 6A Ref.SSX1 106-7 Siemens	1	pç
26	Conjunto de tomadas sistema X2 2P+T 10A. Ref.675062 Fab. Pial Legrand	1	pç
27	Fusível base de vidro 1,5A	20	pç

Material de Componentes Periféricos do SAA			
Item	Descrição do Material	Quant.	Und.
1	Inversor de frequência trifásico 45kW Danfoss 131H5614 Mod. VLT FC-302	1	pç
2	Inversor de frequência trifásico 22kW Danfoss 131G6467 Mod. VLT FC-302	1	pç
3	Inversor de frequência trifásico 110kW Danfoss Mod.VLT 5122 Ref.176F0144	1	pç
4	Soft-Start 50/60Hz 200-525V 93A 45kW Danfoss 175G5532 Mod. MCD 3045	1	pç
5	Soft-Start 50/60Hz 200-525V 105A 55kW Danfoss 175G5532 Mod. MCD 5000	1	pç
6	Painel de comando tipo CE com flange de montagem 760x480x220mm Ref.902136 Fab. CEMAR	1	pç
7	Chave Seccionadora tipo basculante 250A Ref.3NP4270-0CA01 Siemens	1	pç
8	Disjuntor tripolar 45-63A 690V Classe10 Ref.3RV10 41-4JA10 Siemens	1	pç
9	Disjuntor tripolar 70-90A 690V Classe10 Ref.3RV10 41-4LA10 Siemens	1	pç
10	Disjuntor tripolar 45-63A 690V Classe10 Ref.3RV10 41-4JA10 Siemens	1	pç
11	Disjuntor tripolar 36-45A 690V Classe12 Ref.3RV10 31-4GA10 Siemens	1	pç
12	Terminal de compressão 50,00mm ² Intelli Tm-50-10	6	pç
13	Terminal de compressão 70,00mm ² Intelli Tm-50-10	4	pç
14	Conector de passagem melanina 750V 143A Ref.Sak 35 Krg Conexel	6	pç
15	Conector de passagem melanina 750V 87A Ref.Sak 16 Krg Conexel	17	pç
16	Conector de passagem melamina 750V 27A Ref.Sak 2,5 Krg Conexel	40	pç
17	Placa final p/ conector Sak 35 Krg Ref. 3036.2 Blindex	5	pç
18	Placa final p/ conector Sak 16 Ref.Ap Krg 87 Conexel	5	pç
19	Placa final p/ conector Sak 2,5 Ref.Ap Krg 27 Conexel	5	pç
20	Trilho com suporte de aço p/ conector Sak Comp.2 mt Ref.Ts-32 Conexel	1	mt
21	Perfil de montagem elétrica Din 35x7,5x2000mt aço galv. Siemens 5ST0 141	1	mt
22	Canaleta para cabos de comando 30x50x2000 Fab.Hellermann	2	pç
23	Leito p/ cabo 200x75x3000mm Ref.154-0200-Z Mopa	5	pç
24	Disco de corte reforço 2 telas aplicação aço inoxidável diam. externo 115mm	3	pç
25	Bucha de nylon para parede D10 Fab.Fischer	50	pç
26	Parafuso rosca soberba 1/4"x3" cabeça sextavada aço galv. D10	50	pç
27	Curva 90° galvanizada 1,1/2" Tigre	3	pç
28	Eletroduto rígido de aço galv. 1.1/2"x3000mm Bsp c/ luva NBR 5598	3	pç
29	Daiet liga de alumínio tam. N 1.1/2" Pos. Lr Cod.Dn 1500c-Lr Daisa	2	pç
30	Daiet liga de alumínio tam.N 1.1/2" Pos. T Cod.Dn 1500c-T Daisa	1	pç
31	Abraçadeira com garra de aço galv. 35-38mm Ref.Srs-681 1. 7 Sisa	4	pç
32	Abraçadeira de cinta de Poliamida 6.6 Natural Capacidade 55Mm Hellermann	100	pç
33	Abraçadeira de cinta poliamida 6.6 Natural Capacidade 146Mm Hellermann	20	pç
34	Transdutor digital multigrandeza ETE N00386242432c ABB	3	pç
35	Painel de comando tipo CE. com flange de montagem 600x480x220mm Ref.902134 Fab CEMAR	1	pç
36	Terminal pré-isolado forquilha 1,02- 2,64mm ² Ref.130531 AMP	200	pç
37	Terminal de compressão tipo pino PVC Azul 1,30-2,60 mm ² Hollingsworth	100	pç

Material de cabos elétricos do SAA			
Item	Descrição do Material	Quant.	Und.
1	Cabo de potência flex.4 1x50mm ²	3	mt
2	Cabo de potência flex.4 1x25mm ²	3	mt
3	Cabo de potência flex.4 1x16mm ²	3	mt
4	Cabo de potência flex.4 1x4mm ²	5	mt
5	Cabo de potência flex.2 4x50mm ² 750V veias coloridas PVC/PVC Ficap	10	mt
6	Cabo de potência flex.2 4x160mm ² 1000V veias numeradas PVC/PVC Ficap	40	mt
7	Cabo de controle flex.4 4x10mm ² 750V veias coloridas PVC/PVC Pirelli	97	mt
8	Cabo de potência flex.2 4x2,5mm ² 1000V veias coloridas PVC/PVC	38	mt
9	Cabo de controle flex.4 4x1,5mm ² 750V blindado veias numeradas PVC/PVC	120	mt
10	Cabo de controle flex.4 12x1,5mm ² 750V veias numeradas PVC/PVC	138	mt
11	Cabo de controle flex.4 2x1,5mm ² 750V veias coloridas PVC/PVC	168	mt
12	Cabo de comunicação par trançado 12 veias coloridas com alma de aço	178	mt
13	Cabo de controle flex.4 4x1,5mm ² 750V veias coloridas PVC/PVC	813	mt
14	Cabo de comunicação fibra ótica com revestimento em PVC	465	mt