

TESE

1091

A FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*Oportunidades e Ganhos com a Conservação de
Energia na Indústria de Alimentos: Estudo de Caso*

MARCIO ZAMBOTI FORTES

ITAJUBÁ - MG
Dezembro de 2000

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



***OPORTUNIDADES E GANHOS COM A
CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA
DE ALIMENTOS : ESTUDO DE CASO***

por Marcio Zamboti Fortes

Dissertação apresentada à Escola Federal
de Engenharia de Itajubá, para obtenção do
título de mestre em Engenharia de Energia

Orientador : Prof. Dr. Jamil Haddad

Itajubá , Dezembro de 2000



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 359 de 20/12/00, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **“Oportunidade e Ganhos com a Conservação de Energia na Indústria de Alimentos: Estudo de Caso”** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia da Energia da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia da Energia, na Área de Concentração Uso Racional da Energia**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a **Márcio Zamboti Fortes**.

Itajubá, 21 de dezembro de 2000.

Prof. Durval Luiz Silva Ricciulli
1º Examinador - FEG - UNESP

Prof. Geraldo Lúcio Tiago Filho
2º Examinador - EFEI

Prof. Jamil Haddad
3º Examinador - (Orientador) - EFEI



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Oportunidades e Ganhos com a Conservação de Energia na Indústria de Alimentos: Estudo de Caso”**

Autor: **Márcio Zamboti Fortes**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A	
2º	A	
3º	A	

Resultado Médio: Conceito: A , ou seja, aprovado

Observações: _____

Itajubá, 21 de dezembro de 2000.

Prof. Durval Luiz Silva Ricciulli
1º Examinador - FEG - UNESP

Prof. Geraldo Lúcio Tiago Filho
2º Examinador - EFEI

Prof. Jamil Haddad
3º Examinador - (Orientador) - EFEI

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar forças nos momentos que necessitei e sabedoria para vencer as dificuldades encontradas no caminho.

Aos meus pais (Agostinho e Vanda) e irmãos (Fábio, Fernando e João Paulo) pelo apoio, amizade, motivação e incentivo.

A minha futura esposa Renata pela compreensão, apoio, motivação e carinho nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Jamil Haddad, por ter acreditado neste desafio, orientado, apoiado e incentivado com sua amizade a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Edson da Costa Bortoni, José Policarpo Gonçalves de Abreu e Jocélio de Souza Sá, pelo interesse, apoio, atenção desde o início do curso de Mestrado e nos trabalhos desenvolvidos.

Aos amigos da pós-graduação (Helder, João, Eli, Vladimir, Turato, Pitta e Guia), pela amizade, sugestões, incentivo e estima.

Aos colegas de trabalho (Clemente, David, Ferreto, Carlos Alberto, Charles, Cláudio, Rodrigo, Henrique, Mateolli, Ricardo, Antônio Marcos e Amaro) que me apoiaram nas medições, troca de idéias e desenvolvimento deste.

A Administração da Companhia Cervejaria Brahma – Filial Rio de Janeiro, pelo apoio para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos funcionários do Departamento de Registro Acadêmico e da Secretaria da pós-graduação, em especial Cristina, pela atenção dispensada durante todo o curso.

A todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Os meus mais sinceros agradecimentos

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar forças nos momentos que necessitei de sabedoria para vencer as dificuldades encontradas no caminho.

Aos meus pais (Agostinho e Vanda) e irmãos (Fábio, Fernando e João Paulo) pelo apoio, amizade, motivação e incentivo.

A minha futura esposa Renata pela compreensão, apoio, motivação e carinho nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Jamil Haddad, por ter acreditado neste desafio, orientado, apoiado e incentivado com sua amizade a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Edson da Costa Bortoni, José Policarpo Gonçalves de Abreu e Jocélio de Souza Sá, pelo interesse, apoio, atenção desde o início do curso de Mestrado e nos trabalhos desenvolvidos.

Aos amigos da pós-graduação (Helder, João, Eli, Vladimir, Turato, Pitta e Guia), pela amizade, sugestões, incentivo e estima.

Aos colegas de trabalho (Clemente, David, Ferreto, Carlos Alberto, Charles, Cláudio, Rodrigo, Henrique, Mateolli, Ricardo, Antônio Marcos e Amaro) que me apoiaram nas medições, troca de idéias e desenvolvimento deste.

A Administração da Companhia Cervejaria Brahma – Filial Rio de Janeiro, pelo apoio para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos funcionários do Departamento de Registro Acadêmico e da Secretaria da pós-graduação, em especial Cristina, pela atenção dispensada durante todo o curso.

A todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Os meus mais sinceros agradecimentos

ABSTRACT

Due to increasing market competitiveness and imported products, Brazilian companies are forced to reduce their prices in order to be competitive. Decreasing prices require the use of management strategies such as reducing and controlling production costs.

In relation to these costs, there is a portion known as indirect production expense. An example of which would be the electric energy. To reduce such expenses, there are actions like renegotiation of utilities contracts, arrangements of the work schedule and conservation procedures. This last group will be the focus of this research.

The main contribution of this work is to demonstrate, in the context of food factory, several conservative procedures and their impact. It also illustrates a real case of cogeneration system, opportunities for increased earning, using adjustable speed drive, soft starters, capacitors banks, transformers operation, lightning, high efficiency motors, steam system, automation and maintenance techniques. It is concluded with a vision of the conservative procedures impacts on the “power quality”.

SOMÁRIO

RESUMO

Com o aumento da competitividade no mercado e a entrada de produtos importados , as empresas nacionais muitas vezes são obrigadas a reduzir o preço de seus produtos para se manter. Esta redução de preços se utiliza de estratégias gerenciais, dentre elas, um forte trabalho na diminuição e controle dos custos de produção.

Com relação aos custos de produção, há uma parcela denominada despesa indireta de fabricação, onde se encontram entre outros gastos aquele referente à energia elétrica. Na redução dessas despesas , existem medidas como renegociação de contrato de fornecimento, adequação de horários de trabalho e medidas de conservação que serão o foco deste trabalho.

A principal contribuição deste trabalho é demonstrar dentro de uma indústria de alimentos , diversas ações de conservação e seus impactos . Ilustra um caso real de implantação de sistema de cogeração, oportunidades de ganho com inversores, soft-starters, banco de capacitores, operação de transformadores , iluminação, motores de alto rendimento, sistemas de vapor, automação e trabalhos com técnicas de manutenção. Finaliza-se com uma visão do impacto das medidas de conservação na qualidade de energia .

SUMÁRIO

Agradecimentos	ii
Abstract	iii
Resumo	iv
Sumário	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Simbologia	xiii
APRESENTAÇÃO	1
CAPÍTULO I – VANTAGENS DA COGERAÇÃO E HISTÓRICO DA PLANTA	
I.1 – Introdução	5
I.2 – Comparando as Tecnologias	5
I.3 – Dados em Análise	12
I.3.1 – Viabilidade Econômica	12
I.4 – Contrato de Fornecimento	15
CAPÍTULO II – APLICAÇÃO DE INVERSORES E “SOFT-STARTERS”	
II.1 – Introdução	17
II.2 – Características dos “Soft-starters”	17
II.2.1 – Funções Importantes dos “Soft-starters”	21
II.3 – Aplicação da Função “ECONOMIZER”	23
II.4 – Tecnologias dos Inversores de Frequência	24
II.5 – Avaliação dos Harmônicos nos Inversores	25
II.6 – Caso de Aplicação de Inversores e Tempo de Retorno de Investimento	30
CAPÍTULO III – ADEQUAÇÃO DA OPERAÇÃO DE TRANSFORMADORES E APLICAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES	
III.1 – Introdução	33
III.2 – Características dos Transformadores	33

Sumário

III.3 – Operação em Paralelo de Transformadores	37
III.3.1 – Avaliação do Melhor Ponto de Operação	38
III.4 – Correção do Fator de Potência em Baixa Tensão	42
III.4.1 – Correção para Transformadores	45
III.5 – Exemplos de Aplicação	46
CAPÍTULO IV – TRABALHOS DE LUMINOTÉCNICA	
IV.1 – Introdução	50
IV.2 – Práticas para Conservação com Iluminação	50
IV.3 – Tipos de Lâmpadas no Mercado	52
IV.3.1 – Lâmpadas incandescentes	52
IV.3.2 – Lâmpadas de descarga	53
IV.4 – Comparação de Reatores para Lâmpadas Fluorescentes	57
IV.5 – Substituição de Lâmpadas Vapor de Mercúrio	62
IV.6 – Rebaixamento de Luminárias	65
CAPÍTULO V – MOTORES DE ALTO RENDIMENTO – APLICAÇÕES	
V.1 – Introdução	69
V.2 – Tecnologia do Motor de Alto Rendimento	69
V.3 – Avaliação de Perdas Usando o Circuito Equivalente	75
V.4 – Análise de Viabilidade de Aplicação de Motores de Alto Rendimento	76
V.5 – Outras Considerações	79
CAPÍTULO VI - ECONOMIA DE ENERGIA COM ADEQUAÇÃO DE SISTEMAS DE VAPOR E FRIO	
VI.1 – Introdução	82
VI.2 – Geradores de Vapor	82
VI.3 – Rendimento das Caldeiras	85
VI.4 – Otimizando a Utilização do Condensado	87
VI.4.1 – Linha de Retorno de Condensado	88
VI.5 – Sistema de Bombeamento de Condensado	88
VI.5.1 – Conservação de Calor nas Tubulações	91
VI.6 – A Importância do Isolamento Térmico	92
VI.7 – Trabalhos de Manutenção	93

Sumário

VI.8 – Adequação no Sistema de Água Gelada	95
CAPÍTULO VII –AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE CARREGAMENTO DE COMPRESSORES	
VII.1 – Introdução	98
VII.2 – CASO I – Compressor de Amônia para Sistema de Condensação da Planta de CO ₂	98
VII.3 – CASO II – Compressores Parafuso para Sistema de Amônia	100
VII.4 – CASO III – Compressores de Ar	104
CAPÍTULO VIII – A IMPORTÂNCIA DA MANUTENÇÃO NA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. TRABALHOS COMPORTAMENTAIS DAS EQUIPES	
VIII.1 - Introdução	107
VIII.2 – Conceituação da Manutenção	107
VIII.3 – Conhecendo e Avaliando a Importância da Termografia	110
VIII.4 – Manutenção Autônoma e Monitoramento por Rotas	118
CAPÍTULO IX – AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS	
IX.1 – Introdução	121
IX.2 – História e Conceituação	121
IX.3 – O Efeito “Harmônicos”	126
IX.3.1 – Problemas Causados pelos Harmônicos	128
IX.4 – Medidas Preventivas	129
IX.5 – Impacto Econômico dos Harmônicos	131
CAPÍTULO X –CONCLUSÕES	134
BIBLIOGRAFIA	137
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	143

LISTA DE FIGURAS

Figura A.1 – Consumo por áreas agosto / 2000	3
Figura 1.1 - Distribuição das fontes de geração de energia elétrica mundial	6
Figura 1.2 – Fontes de geração de energia elétrica no Brasil	6
Figura 1.3 a) – Turbina a vapor (TOPPING)	7
Figura 1.3 b) – Turbina a gás com caldeira de recuperação	8
Figura 1.3 c) – Motor a gás	8
Figura 1.3 d) – Turbina a vapor (BOTTOMING)	8
Figura 1.4 – Esquema simplificado do sistema de cogeração em análise	10
Figura 1.5 – Ciclo de absorção	11
Figura 2.1 – Torque boost	22
Figura 2.2 – Controle do fator de potência	23
Figura 2.3 – Formato dos campos girantes	26
Figura 2.4 – Eficiências elétricas do sistema conversor-motor	27
Figura 2.5 a) – Eficiência do conversor em 100% e 25% da carga	27
Figura 2.5 b) – Eficiência típica para um motor em 100% e 25% quando alimentado por conversor de frequência	28
Figura 2.5 c) Eficiência para motor e inversor em 100% e 25% de carga	28
Figura 2.6 – Fator de potência típico para diversas potências com rotações diferentes	29
Figura 3.1 – Diagrama esquemático simplificado da distribuição do sistema em análise	34
Figura 3.2 – Diagrama trifilar da distribuição em um painel de baixa tensão	42
Figura 3.3 – Redução percentual das perdas em função do fator de potência	45
Figura 3.4 – Controlador do fator de potência da barra alimentadora da área processo	48

Lista de Figuras

Figura 3.5 – Banco de capacitores com dez estágios na área de processo	48
Figura 4.1 – Forma de onda corrente – caso A	59
Figura 4.2 – Forma de onda corrente – caso B	60
Figura 4.3 – Forma de onda corrente – caso C	60
Figura 4.4 – Distribuição dos harmônicos – caso A	61
Figura 4.5 – Distribuição dos harmônicos – caso B	61
Figura 4.6 – Distribuição dos harmônicos – caso C	61
Figura 4.7 – Forma de onda corrente – caso D	63
Figura 4.8 – Forma de onda corrente – caso E	64
Figura 4.9 – Distribuição de harmônicos – caso D	64
Figura 4.10 – Distribuição de harmônicos – caso E	65
Figura 5.1 – Fluxo de potência no motor de indução trifásico	71
Figura 5.2 – Curva característica $\cos \phi$ x potência	74
Figura 5.3 – Circuito equivalente completo do MIT	75
Figura 5.4 – Possíveis fontes de conservação de energia em equipamentos elétricos	79
Figura 6.1 – Caldeira de recuperação	82
Figura 6.2 – Efeito da pressão em um gerador de vapor	83
Figura 6.3 – Processo de aquecimento da caldeira	84
Figura 6.4 – Nível de ruído em vazamentos de vapor	85
Figura 6.5 – Rendimento da caldeira em função de sua utilização	86
Figura 6.6 – Sistema de recuperação de condensado	90
Figura 6.7 – Tipos de purgadores	94
Figura 6.8 – Instalação de purgador para final de linha	95
Figura 6.9 – Trocador de placas para sistema de água gelada	96
Figura 7.1 – Curva de carga e fator de potência para compressor de amônia do sistema de CO ₂	99
Figura 7.2 – Compressor de amônia para sistema de condensação de CO ₂	100
Figura 7.3 – Unidade de compressão sistema de amônia	101
Figura 7.4 – Curva de carga e fator de potência para compressor de amônia	102
Figura 7.5 – Compressor tipo parafuso com controlador local	103
Figura 7.6 – Unidade de compressão de ar	104
Figura 7.7 – Curvas de carga e fator de potência para compressor de ar	105
Figura 8.1 – Espectro de Newton	111

Lista de Figuras

Figura 8.2 – Zonas de contato	113
Figura 8.3 – Modelo de relatório para termografia	115
Figuras 8.4 a) , b) , c) ,d) , e) , f) , g) e h) – Termogramas	116/117
Figura 9.1 – Efeito Notch	123
Figura 9.2 – Efeito Sags	123
Figura 9.3 – Efeito Swells	124
Figura 9.4 – Interrupção momentânea	124
Figura 9.5 – Interrupção temporária	124
Figura 9.6 – Flutuação de tensão	125
Figura 9.7 – Ruído de um sinal elétrico	126
Figura 9.8 – Forma de onda de corrente saída de um conversor de frequência	127
Figura 9.9 – Forma de onda de corrente típica de lâmpada 40W com reator de baixo fator de potência	127
Figura 9.10 – Forma de onda de corrente típica na saída de uma UPS	128
Figura 9.11 – Desbalanceamento x Aumento de perdas	129
Figura 9.12 – Aumento no custo do consumo devido a vários valores de distorção harmônica total de corrente (THDi)	132

Tabela 1.1 – Comparativo de vários elementos entre fontes	7
Tabela 1.2 – Comparação paridade térmica	9
Tabela 1.3 – Comparação paridade elétrica	9
Tabela 1.4 – Outras comparações entre diferentes tecnologias	10
Tabela 1.5 – Comparação sistema convencional com cogeração	13
Tabela 1.6 – Comparação de números da cogeração	14
Tabela 2.1 – Compensação de temperatura em “soft-starters” para corrente nominal	19
Tabela 2.2 – Correntes de partida típicas por aplicação	19/20
Tabela 2.3 – Valores obtidos na aplicação do “Economizer”	24
Tabela 2.4 – Condições de carga da bomba em análise	30
Tabela 3.1 – Valores garantidos obtidos nos testes do fornecedor para transformadores trifásicos de tensão máxima de 15 kV	35
Tabela 3.2 – Rendimentos para fator de potência médio de 0,95	38
Tabela 3.3 – Potências indicativas para manobras e colocação de transformador alimentando duas cargas	40
Tabela 3.4 – Economias obtidas no período de maio 1999/abril 2000	41
Tabela 3.5 – Dados da conta de energia área de captação	46
Tabela 3.6 – Comparação consumos antes e depois reposicionamento de capacitores	47
Tabela 4.1 – Valores médios típicos para lâmpadas fluorescentes em 127 V	55
Tabela 4.2 – Rendimento luminoso por tipo de lâmpada	56
Tabela 4.3 – Ganhos com lâmpadas alternativas	57
Tabela 4.4 – Tabela comparativa de consumos I	59

Lista de Tabelas

Tabela 4.5 – Tabela comparativa de consumos II	63
Tabela 4.6 – Nível de iluminamento	67
Tabela 5.1 – Limites de elevação de temperatura	70
Tabela 5.2 – Comparação de rendimentos e fator de potência	74
Tabela 5.3 – Dados e potência do motor standard e AR	77
Tabela 5.4 – Dados comparativos entre o motor standard e motor reserva	78
Tabela 6.1 – Dimensionamento de linha de retorno de condensado – considerando-se carga máxima	89
Tabela 6.2 – Quantidade de calor para produção de 1 kg de vapor	91
Tabela 6.3 – Emissão teórica de calor em uma tubulação de aço inoxidável sem isolamento, considerando temperatura ambiente entre 10-20 °C	91
Tabela 6.4 – Espessura mínima de isolamento recomendada	93
Tabela 6.5 – Perdas causadas por vazamentos	94
Tabela 8.1 – Tempos de diagnose e reparo em função da natureza	108
Tabela 8.2 – Cores características ao olho humano de comprimentos de onda	112
Tabela 8.3 – Consumo de energia para suprir vazamentos	119
Tabela 9.1 – Características das variações de tensão	123
Tabela 9.2 – Desempenho de motores de indução em função da tensão aplicada	130

SIMBOLOGIA

A	- Fator de transmissão de calor ao ambiente
b	- Fator de carga
$\cos\theta$	- Fator de potência na carga
c	- Calor específico do material
C	- Capacitância [μF]
CkWh	- Custo do kWh
CT	- Capacidade térmica do motor
CV	- Potência do motor [CV]
E_1	- Força contra eletromotriz induzida
F	- Frequência [Hz]
FLT	- Porcentagem de torque a plena carga
i_0	- Corrente em vazio do transformador [p.u.]
I_0	- Corrente à vazio
I_1	- Corrente do estator
I_2	- Corrente do rotor
I_n	- Corrente nominal
$I_{rt(\%)}$	- Corrente de rotor travado [%]
I_{rt}	- Corrente de rotor travado [A]
I_{ST}	- Corrente mínima exigida na partida [A]
K	- Coeficiente relacionado ao combustível
M	- Conjugado nominal [N.m]
n	- Velocidade do motor [rpm]
n'	- Velocidade do campo girante em [rpm]
N	- Número de transformadores em paralelo
N_C	- Rendimento da combustão
P	- Potência ativa [W]
Nh	- Número de horas de operação em um ano
P_C	- Perdas no material dos enrolamentos [kW]

Simbologia

P_1	- Potência consumida
P_2	- Perdas no circuito externo do rotor
P_E	- Potência transferida do estator para o rotor pelo entreferro
Perdas	- Perdas pela chaminé
P_M	- Potência mecânica
P'_M	- Potência mecânica disponível no eixo da máquina
P_2	- Potência de saída do conversor
P_3	- Potência de saída do sistema
Q_0	- Potência reativa do transformador [kVAR]
Q_C	- Potência reativa a ser corrigida [kVA]
r_1	- Resistência estatórica
r_2	- Resistência rotórica
r_c	- Resistência fictícia que representa a resistência de carga
R_{m}	- Resistência que representa perdas no ferro
n_{pmplena}	- Rotação a plena carga
S^*	- Potência ideal para operação do transformador [kVA]
S_n	- Potência nominal em [kVA]
S_g	- Carga a ser submetida ao grupo, a partir do qual é econômico operar mais de um transformador [kVA]
t	- Temperatura dos gases de escape
t_0	- Temperatura ambiente
T_Λ	- Constante de tempo de aquecimento da máquina
TR	- Tempo de retorno de investimento [ano]
T_r	- Torque do rotor travado
T_{ST}	- Torque necessário na partida
T_{SUP}	- Tempo que o motor suporta corrente de linha
V_{0N}	- Perdas no motor a vazio e em tensão nominal
V_1	- Perdas no estator
V_{1b}	- Tensão aplicada ao estator
V_2	- Perdas no circuito interno do rotor
V_3	- Perdas por atrito e ventilação
V_4	- Perdas suplementares
V_{FF}	- Tensão fase-fase [V]

Simbologia

X_m	- Reatância do ramo magnetizante
X_1	- Reatância de dispersão bobinas estator
X_{2P}	- Reatância do rotor na partida
$\%(CO_2)$	- Porcentagem em volume de CO_2 nos gases de escape
η	- Rendimento
η_S	- Rendimento do motor standard
η_{AR}	- Rendimento do motor de alto rendimento
τ	- Temperatura da máquina no instante t
τ_f	- Temperatura da máquina para um tempo bastante grande
ΔC	- Diferença entre os custos de aquisição dos motores
Δi	- Elevação da temperatura do componente em relação ao fluido envolvente

APRESENTAÇÃO

Esta sede trabalha uma produção industrial localizada no estado do Rio de Janeiro, com produtos diversos e variados. Esta unidade representa um compromisso de produção de 17.000 toneladas de produtos. O número médio de pessoas que trabalham aqui é de 100 funcionários e como uma fábrica trabalha em 24 horas.

Esta unidade trabalha com uma produção de 100% de produtos em conformidade com a norma ISO 9001. Trabalha dentro de princípios de qualidade total e utiliza processos...

Esta unidade trabalha com uma produção de 100% de produtos em conformidade com a norma ISO 9001. Trabalha dentro de princípios de qualidade total e utiliza processos...

Apresentação



APRESENTAÇÃO

Analisa-se neste trabalho uma instalação industrial localizada na cidade do Rio de Janeiro, que têm como produtos alimentos e bebidas. Esta unidade inaugurada em 1996, possui capacidade de produção de 17.000.000 hl de bebidas/ano. O número médio de funcionários próprios gira em torno de 600 funcionários e como apoio em serviços terceirizados trabalham 400 colaboradores.

Esta unidade participa em torno de 20% do volume de produção da empresa e possui certificação ISO 9002. Trabalha dentro da filosofia de qualidade total e controle estatístico de processos.

Possui uma estação de captação de águas localizada a oito quilômetros da planta, com sistema de controle automatizado comandado via rádio. Possui estação de tratamento de águas própria com capacidade para tratar 1600 m³/h e estação de tratamento de efluentes com capacidade de 1.200 m³/h.

Construiu-se a fábrica em duas fases, sendo que o projeto completo hoje possui : duas salas de Processo com capacidade de fabricação de doze fabricos/dia de 1.360 hl/sala, sendo o tempo médio de cada ciclo de seis horas, sessenta e quatro tanques de fermentação/maturação com capacidade de 7.835/9.640 hl, mais oito tanques de 3.918/4.818 hl, três linhas de filtração com capacidade de 2.600 hl/h e outros tanques diversos como: seis tanques de coleta de fermento, um tanque propagador de fermento residual e dois tanques de fermento residual rejeitado.

Toda a planta possui dezesseis linhas distribuídas em três galpões de envasamento, sendo:

- sete linhas de garrafas retornáveis : 60.000 garrafas/hora
- uma linha de chopp : 400 barris/hora
- duas linhas de lata : 120.000 latas/hora
- duas linhas de garrafas plásticas descartáveis : 40.000 garrafas/hora
- uma linha de lata : 35.000 latas/hora
- uma linha garrafas descartáveis 350 ml: 45.000 garrafas/hora

Apresentação

- uma linha mista: garrafa vidro/plástica descartável 600 ml : 60.000 garrafas/hora

Construiu-se prédio administrativo com banheiros, refeitório, salas de treinamento, apoio a terceiros, centro médico e odontológico e bancos. Expandiu-se o centro de distribuição para área externa a planta industrial, mas alimentada pelo sistema de energia da unidade, junto a enlonação e portaria.

A Central de Utilidades possui usina de beneficiamento de CO₂ com capacidade de processamento de seis ton/h com tanques de armazenamento de CO₂ líquido para enchimento de cilindros se necessário, garantindo pureza do gás de 99,95% por sistema próprio de limpeza. Sistema de geração de frio com amônia tendo base em seis compressores parafusos de 1.900 CV, 3.600.000 kcal/h. O Sistema de ar comprimido para diversas áreas de processo e sistema de cogeração possui capacidade de 11.100 Nm³/h com quatro compressores.

A central de geração de vapor construída com sistema de cogeração, possui quatro caldeiras, sendo três com reaproveitamento de gases com capacidade de 35 ton/h e com uma reserva aquotubular de capacidade 70 ton/h. Gera-se vapor saturado com pressão de 10 kgf/cm² e temperatura entre 120-180 °C.

Acompanha este sistema todo um conjunto de equipamentos auxiliares para reaproveitamento de todos os subprodutos gerados nos processos, como : bagaço, fermento, vidro, latas de alumínio, papéis, plástico, óleos lubrificantes e isolantes, baterias, etc.

Tem-se uma área construída de aproximadamente 700.000 m², com alimentação de energia elétrica por duas linhas de 138 kV, em uma subestação principal. Sendo, abaixada para 13,2 kV, conectando-se sistema de cogeração em paralelo neste barramento, e distribuindo para um total de treze subestações secundárias que alimentam diversas salas elétricas e Centro de Controle de Motores (CCM's) em 4,16 kV e 380 V.

Têm-se quarenta e nove transformadores de diversas potências, perfazendo um total de 71,5 MVA em transformadores. A partir deste cenário, executaram-se diversas atividades de conservação que serão abordadas neste trabalho.

A distribuição energética da planta comporta-se como a divisão mostrada na figura A.1 a seguir.

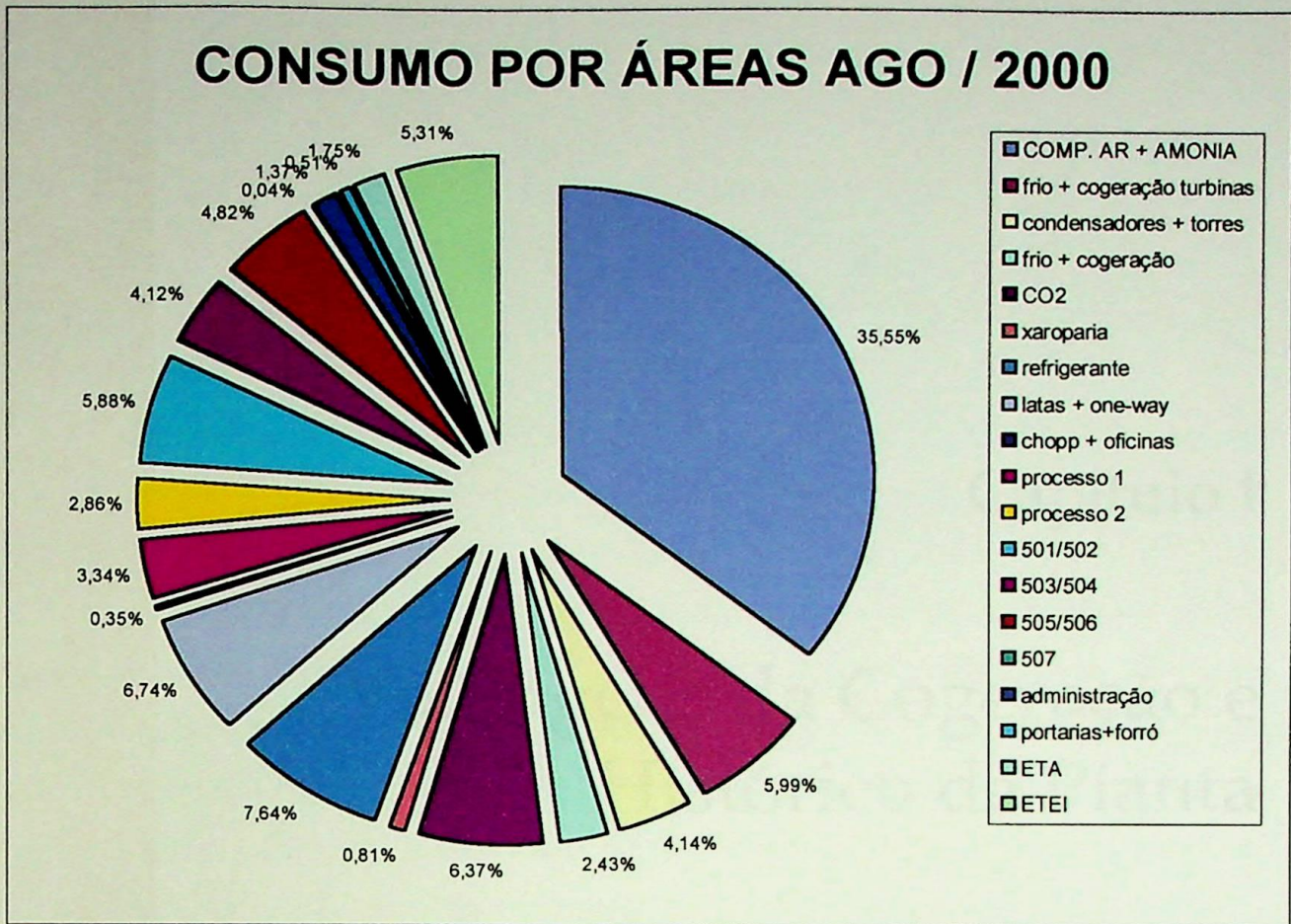


Figura A. 1 – Consumo por Áreas Agosto/2000

Trabalha-se no grupo de eficiência energética com metas por setores, como ilustrado na tabela A.1 a seguir, todos os valores indicados se relaciona a unidade kwh/hl:

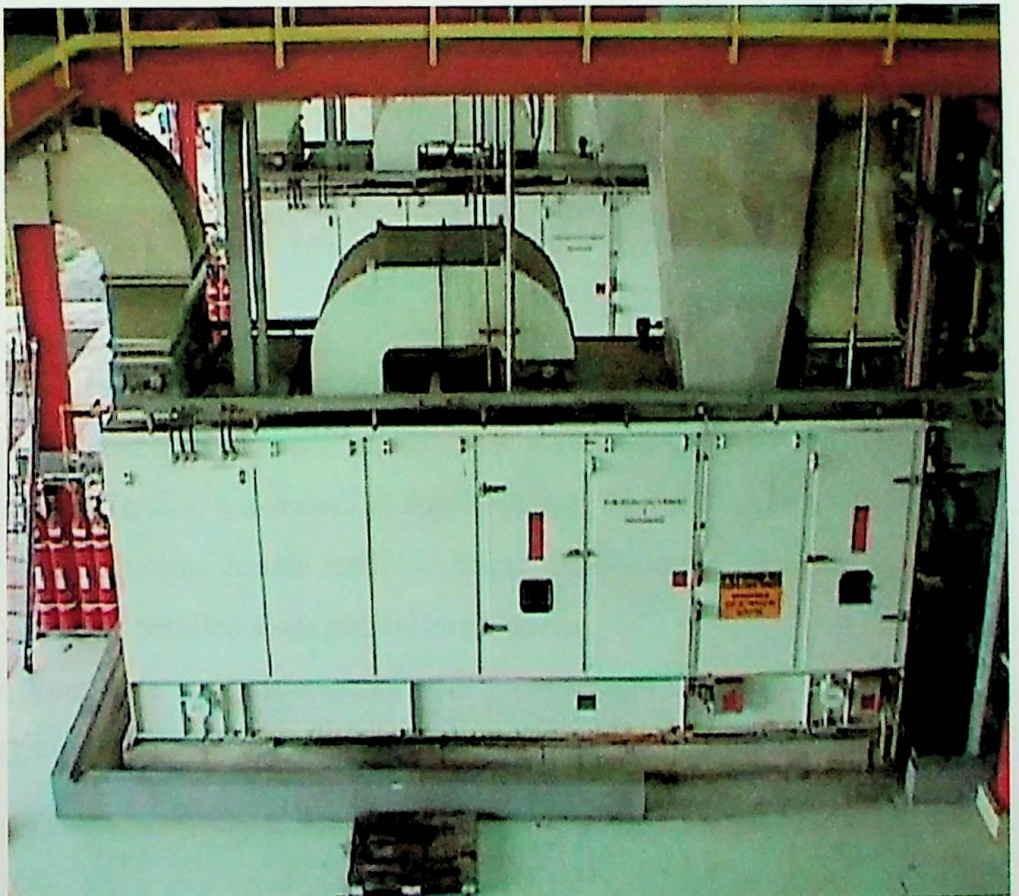
ÁREA	META	JULHO			AGOSTO			SETEMBRO		
		PROG.	REAL	DESV	PROG.	REAL	DESV	PROG.	REAL	DESV
ENG.A	1,22	1,27	1,40	0,13	0,58	1,32	0,74	1,25		
ENG.B	0,56	0,58	0,63	0,06	0,61	0,59	-0,02	0,57		
ENG.C	0,59	0,61	0,58	-0,03	0,06	0,68	0,62	0,60		
PROCESSO A	0,06	0,06	0,11	0,06	5,42	0,06	-5,36	0,06		
UTILIDADES	5,24	5,44	5,31	-0,13	0,03	4,83	4,80	5,37		
ENG.D	0,03	0,03	0,03	0,00	0,62	0,03	-0,59	0,03		
PROCESSO B	0,60	0,62	0,63	0,01	0,23	0,55	0,32	0,61		
ADM	0,22	0,23	0,17	-0,06	0,70	0,17	-0,53	0,23		
ETA/ETEI	0,68	0,71	0,65	-0,06	9,51	0,63	-8,88	0,70		
TOTAL	9,20	9,55	9,51	-0,04	9,51	8,86	-0,65	9,42		

Tabela A . 1 – Exemplo metas por setor

Apresenta-se este trabalho ilustrando-se a técnica de conservação aplicada e os resultados práticos alcançados.

Capítulo I

Vantagens da Cogeração e Histórico da Planta



I.1 – INTRODUÇÃO

Estuda-se amplamente a implantação de centrais de cogeração como solução para um melhor aproveitamento da energia primária, como óleo, gás natural e carvão. Sabe-se que a eficiência global de uma unidade de produção de energia convencional é baixa e que se utilizando sistemas de cogeração pode-se obter rendimentos globais próximos de 80%. Com a tendência de redução do custo do gás natural no Brasil, sua maior disponibilidade nas áreas industrializadas, principalmente na região Sudeste, com o desenvolvimento do gasoduto Brasil-Bolívia e a constante procura de soluções energeticamente eficientes, tornaram-se viáveis construções de plantas de cogeração principalmente com os incentivos propostos pelo governo. Neste capítulo, analisam-se as tecnologias disponíveis e suas aplicações na planta em estudo neste trabalho, destacando-se as vantagens de suas implantações.

I.2 – COMPARANDO AS TECNOLOGIAS

Instalaram-se os primeiros sistemas de cogeração no mundo no final do século passado, visto que o fornecimento de energia elétrica por grandes centrais ser raro. Com a expansão dos sistemas elétricos, o aumento da confiabilidade da distribuição e o baixo custo, a cogeração perdeu gradativamente sua importância. Na década de 80, inverteu-se o processo, pois a oferta de petróleo e gás natural aumentaram.

Atualmente observa-se a matriz energética mundial relacionada com as formas de geração de energia elétrica no mundo, distribuindo-se na proporção representada na figura 1.1.

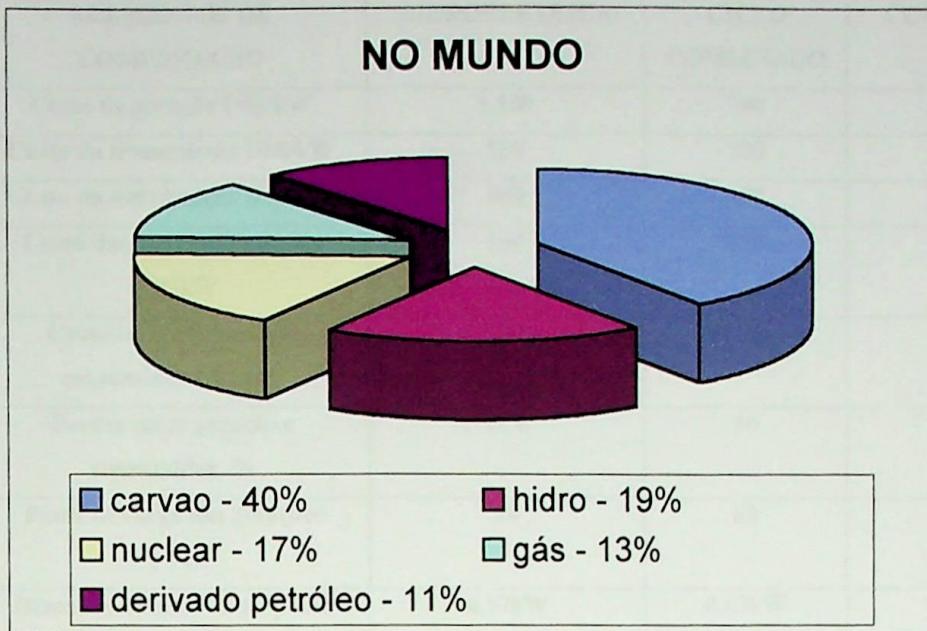


Figura 1.1 – Distribuição das fontes de geração de energia elétrica mundial

No Brasil, encontra-se um cenário diferente visto o grande potencial hidroelétrico nacional. Ilustra-se na figura 1.2 esta distribuição.

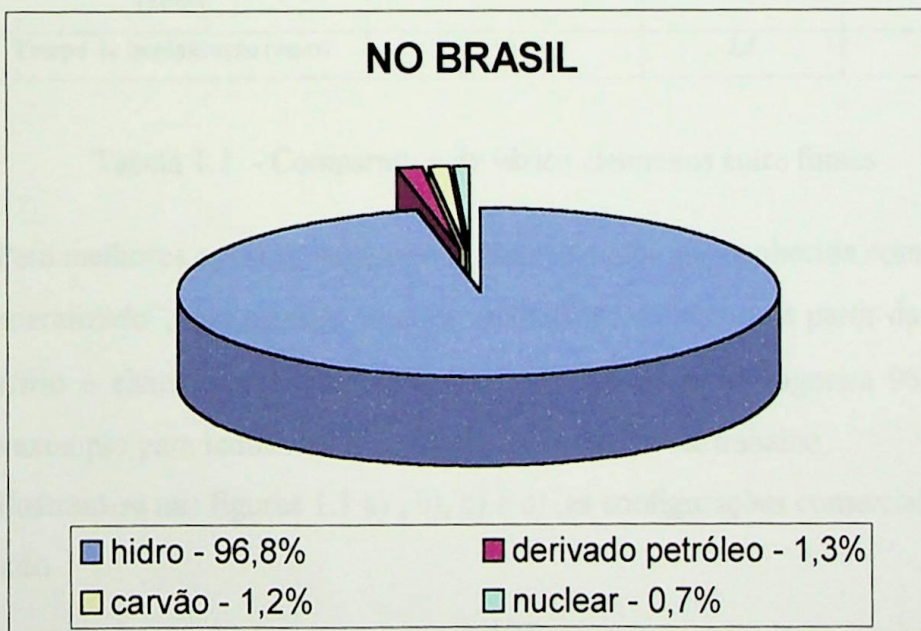


Figura 1.2 – Fontes de geração de energia elétrica no Brasil

Os custos, os tempos relativos à implantação e outros dados são apresentados na tabela 1.1, e aplicam-se como referência para um estudo superficial na comparação para implantação de cogeração.

	ELEMENTOS DE COMPARAÇÃO	HIDROELÉTRICA	CICLO COMBINADO	COGERAÇÃO
1	Custo da geração US\$/kW	1.100	700	1.200
2	Custo da transmissão US\$/kW	550	200	-
3	Custo da distribuição US\$/kW	400	400	-
4	Custo das instalações gerais US\$/kW	150	150	-
5	Custo total até medição consumidor US\$/kW	2.200	1.450	1.200
6	Perdas entre geração e consumidor %	18,6	10	-
7	Fator de carga das gerações (%)	70	80	90
8	Demanda disponível na ponta para US\$ 1000	0,37kW	0,62kW	0,83kW
9	Energia média disponível para US\$ 1000	0,26kW	0,5kW	0,75kW
10	Custo da energia até consumidor US\$/MWh durante amortização/ após amortização	60/25	60/45	40/25
11	Tempo de retorno do capital (anos)	15	10	5
12	Tempo de implantação (anos)	10	2,5	1,5

Tabela 1.1 - Comparativo de vários elementos entre fontes

Para melhores estudos, sugere-se utilizar metodologia conhecida como o método “ α - β generalizado”, que permite obter-se um balanço energético a partir das demandas de calor/frio e eletricidade. Exemplifica-se este método em [Nogueira 96], inclusive com um exemplo para indústria similar a que se estuda neste trabalho.

Ilustram-se nas figuras 1.3 a) , b), c) e d) ,as configurações comercializadas com maior êxito .

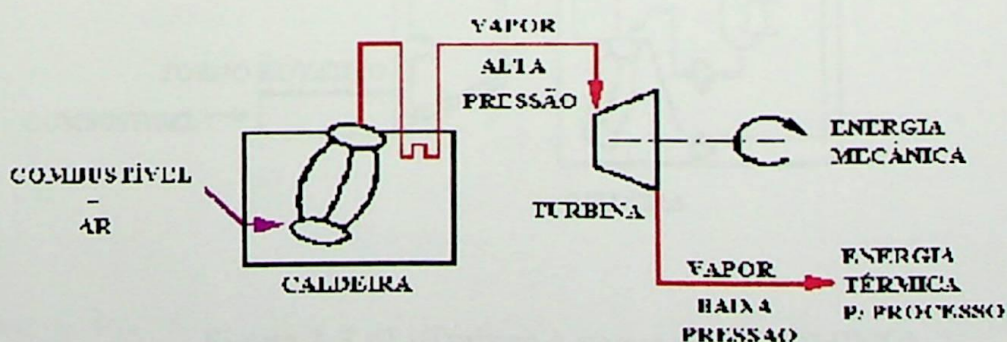


Figura 1.3 a) – Turbina a vapor (TOPPING)

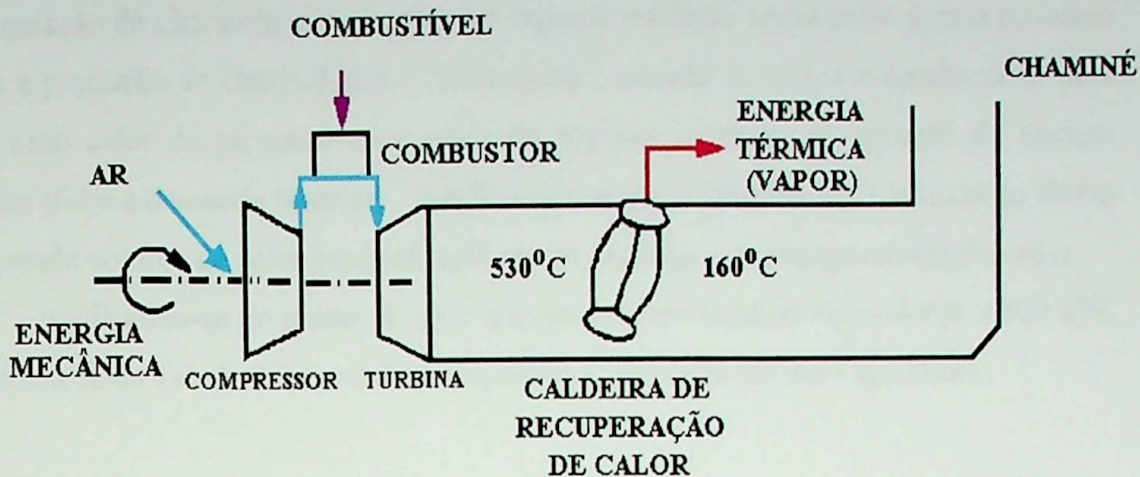


Figura 1.3 b) – Turbina a gás com caldeira de recuperação

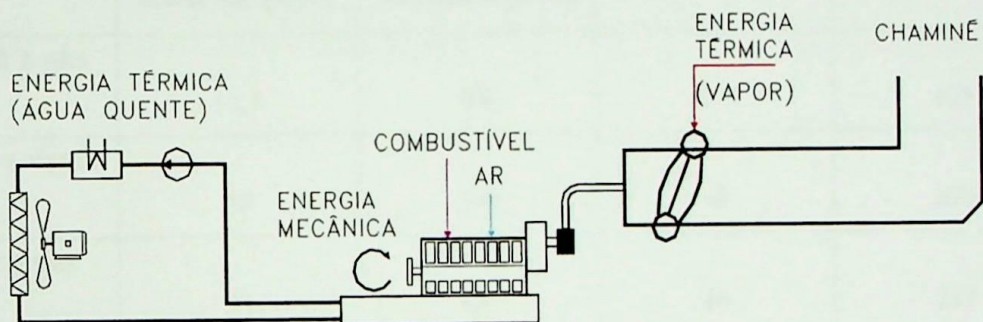


Figura 1.3 c) – Motor a gás

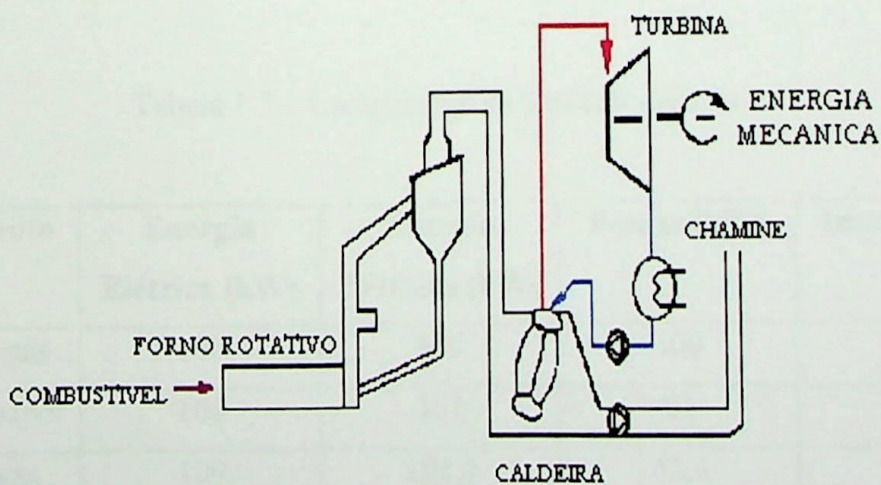


Figura 1.3 d) – Turbina à vapor (BOTTOMING)

Conceitua-se por “Topping” ao sistema de cogeração que utiliza o combustível para geração de eletricidade e os gases ou vapores residuais como calor para o processo (foco a produção de eletricidade) e “Bottoming”, quando se utiliza o combustível para uso como calor de processo e os gases ou vapores residuais na geração de energia elétrica (foco a demanda térmica). Justifica-se o sistema “Bottoming”, quando se obtêm um grande volume de calor residual rejeitado no processo com temperaturas elevadas

Analisando-se no ponto de vista aproveitamento térmico equivalente a 100 kW, apresenta-se na Tabela 1.2 o quadro comparativo, dos modelos mais aplicados.

Tabela 1.2 – Comparação da paridade térmica

Equipamento	Energia Elétrica (kW)	Energia Térmica (kW)	Perdas (kW)	Insumo (kW)
Turbina a gás	12,5	100	12,5	125
Turbina a vapor	62	100	38	200
Motor a gás	93	100	40	233

Segue-se avaliando as três tecnologias, fixando a Energia Elétrica a ser fornecida, conforme tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Comparação da paridade elétrica

Equipamento	Energia Elétrica (kW)	Energia Térmica (kW)	Perdas (kW)	Insumo (kW)
Turbina a gás	100	800	100	100
Turbina a vapor	100	161	61	323
Motor a gás	100	102,5	42,5	250

Deve-se atentar também quando da definição de qual tecnologia aplicar, quanto as características de sistema da planta, apresentam-se algumas na tabela 1.4.

Tabela 1.4 – Outras comparações entre diferentes tecnologias

	Turbina a vapor	Turbina a gás	Motor a gás
Combustível viável possível	Todos	Gás natural	Gás nat./BPF-1A
Consumo de energia elétrica da central (% energia gerada)	1	3,5	< 1/1,5/3,5
Eficiência elétrica [%]	10	31	40
Queda de eficiência elétrica em cargas parciais	Bom	Regular	Ótimo
Eficiência energética global [%]	90	81	83
Modificação da relação energia elétrica/energia térmica	Não	Ótimo	Regular
Tecnologia	Nac./Imp.	Importada	Importada
Manutenção	Bom	Ótimo	Regular

Em [Pohlmeier 95] destaca-se as vantagens de aplicação de sistemas de cogeração para pequenas potências. Sugere-se que para sistemas até 1 MW utilizar-se motores alternativos e acima deste valor turbinas a gás.

Na planta em análise optou-se por turbina a gás com caldeira de recuperação, em uma configuração como se ilustra na figura 1.4.

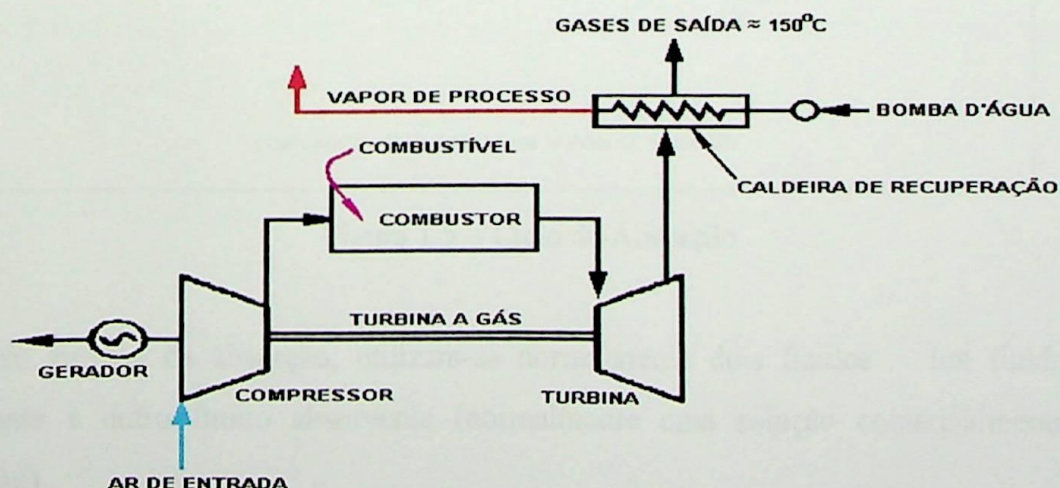


Figura 1.4 – Esquema simplificado do sistema de cogeração em análise

Analisa-se a possibilidade de aproveitamento dos gases de saída da caldeira em um sistema de absorção para resfriamento do ar de entrada da turbina. O sistema de absorção possui como esquema básico o apresentado na figura 1.5.

Seu funcionamento é similar ao de compressão mecânica, onde a etapa de compressão é substituída por um sistema termicamente ativado. Observando-se a figura percebe-se que são introduzidos absorvedor, bomba de solução, trocador de calor, válvula de líquido e gerador na posição que trabalharia um compressor.

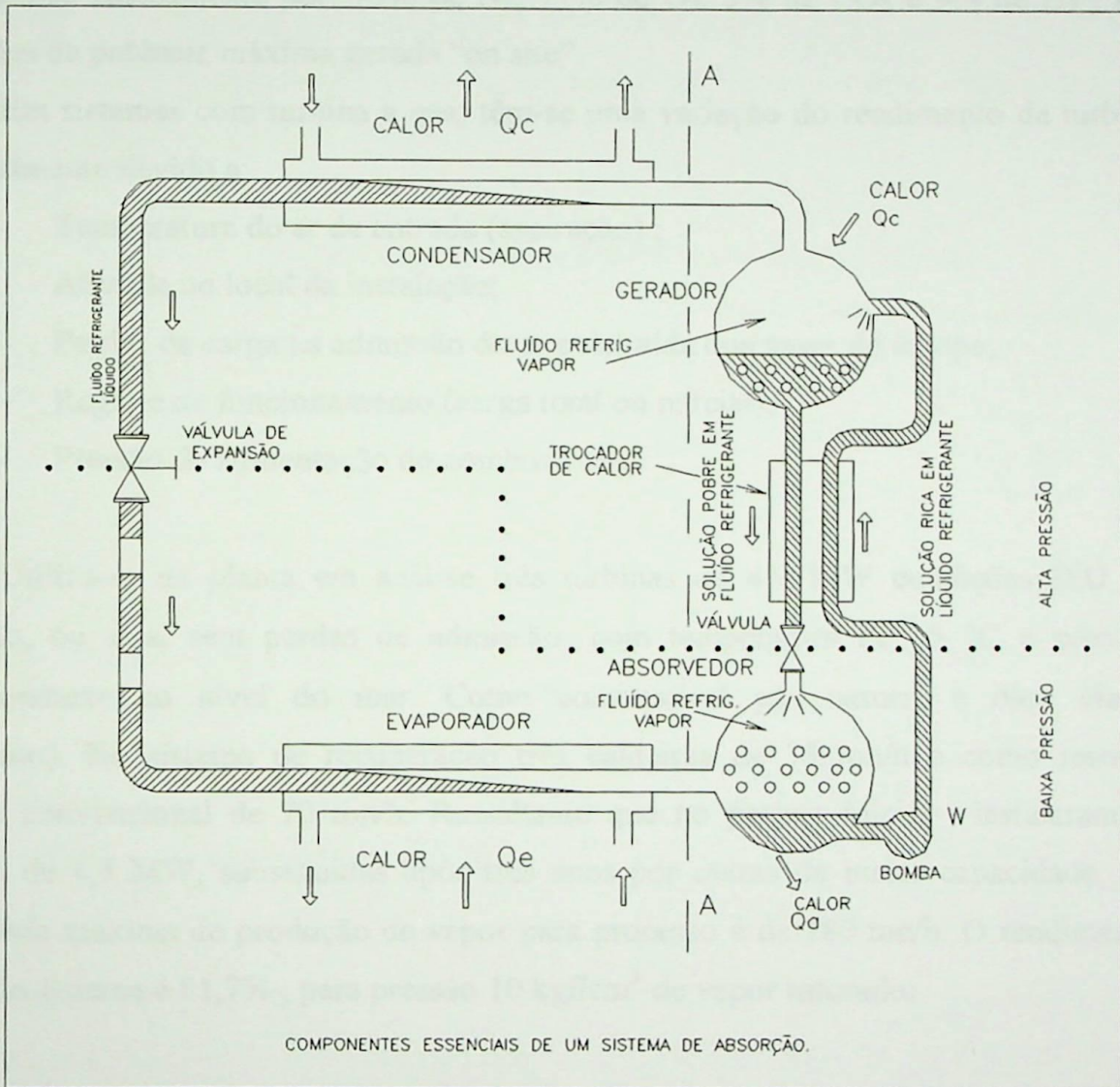


Figura 1.5 – Ciclo de Absorção

No sistema de absorção, utilizam-se normalmente dois fluidos : um fluido refrigerante e outro fluido absorvente (normalmente uma solução comercialmente disponível).

Para aplicações em Ar Condicionado, onde se trabalha com temperatura do evaporador acima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, como refrigerante utiliza-se a água e como absorvente o

brometo de lítio. Em frigoríficos ou similares onde se necessita de temperatura do evaporador abaixo de 0 °C , utiliza-se como refrigerante amônia e absorvente a água.

I.3 – DADOS EM ANÁLISE

Deve-se destacar que a cogeração apresenta como uma de suas grandes vantagens , uma menor agressão ao meio ambiente. Os gases emitidos para atmosfera compõem-se basicamente por: 75% de N₂, 11% de O₂, 5% de CO₂ e 9% de H₂ , sob condições de potência máxima gerada “on site”.

Em sistemas com turbina a gás, têm-se uma variação do rendimento da turbina principalmente devido a:

- Temperatura do ar de entrada (aspiração) ;
- Altitude no local da instalação;
- Perdas de carga na admissão do ar e na saída dos gases de escape;
- Regime de funcionamento (carga total ou parcial);
- Pressão de alimentação do combustível;

Utiliza-se na planta em análise três turbinas de 4,9 MW condições ISO de operação, ou seja, sem perdas de admissão, com temperatura de 15 °C e pressão correspondente ao nível do mar. Como combustível gás natural e óleo diesel (substituto). No sistema de recuperação três caldeiras de 35 ton/h e como reserva caldeira convencional de 70 ton/h. Ressalta-se que no projeto inicial , instalaram-se turbinas de 4,5 MW, substituídas após três anos por outras de maior capacidade . A capacidade máxima de produção de vapor para processo é de 180 ton/h. O rendimento médio do sistema é 81,7% , para pressão 10 kgf/cm² de vapor saturado.

I.3.1 – VIABILIDADE ECONÔMICA

Analisa-se neste item , com os valores atuais e economia da implantação do sistema de cogeração. Relaciona-se a seguir os dados considerados.

Horas por dia de funcionamento	=	24
Dias por Semana	=	7

Capítulo I – Vantagens da Cogeração e Histórico da Planta

Horas por mês ponta	=	65
Horas por mês fora de ponta	=	665
Tipo de tarifa	=	A2-Azul
Custo médio do kWh (nov/00)	=	R\$ 0,046358
Disponibilidade do sistema	=	99%
Custo do gás natural(m ³) valor médio nov/00 =		R\$ 0,21
Custo do gás natural p/ sistema convencional (m ³) estimado	=	R\$ 0,26

Na tabela 1.5 apresenta-se a comparação de um sistema convencional com um sistema com cogeração.

Tabela 1.5 – Comparação sistema convencional com cogeração

	Convencional	com Cogeração
Turbina a gás		
Capacidade instalada ISO (kW)		14.700
Energia produzida ano (kWh) médio		100.000.000
ENERGIA		
Energia comprada concessionária		
Demanda ponta (kW)	18.500	8.500
Demanda fora de ponta (kW)	19.200	5.000
Demanda Anual	691.746,99	215.564,25
Consumo (kWh)	107.300.000	20.000.000
Gasto consumo	4.935.800,00	920.000,00
Demanda e consumo de reserva anual		165.240,00
custo ano	5.627.546,99	1.300.804,25
VAPOR		
Vapor produzido ano (kg/ano)	518.400.000	518.400.000
Volume combustível gasto ano (m ³ /ano)	42.508.800	42.508.800
gasto com combustível produzindo somente vapor	11.052.288,00	3.485.721,60
Operação e manutenção (estimado)*	125.000,00	650.125,00
total vapor	11.177.288,00	4.135.846,60
Total anual	R\$16.804.834,99	R\$5.436.650,85

* Valor médio de R\$ 6,5 / MW.h [Cogerar 97]

Pode-se adotar outras formas para análise de viabilidade econômica. Na análise dos custos de energia e vapor internos considera-se, por exemplo, 52% dos custo do gás para vapor e 48% para eletricidade, valores adotados na planta para divisão de custos e facilitar avaliação das despesas de processo.

Não se refere na análise anterior, a outra grande vantagem que o sistema de cogeração apresenta quando se utilizando geradores síncronos que está no controle de compensação de reativos. Como referência nesta análise, cita-se que os geradores da planta operam normalmente ajustados com fator de potência 0,8, e obtêm-se aproximadamente 65% de kVAr com relação à potência fornecida.

Analisando-se custos com reativos pelo fornecimento da concessionária no período de janeiro-dezembro 1999, pagou-se 201.327 kVAr, aproximadamente R\$ 6.600,00, devido a paradas para manutenção, em um consumo de 26.272.000 kWh, em uma conta total de R\$ 1.827.445,00, ou seja, 0,36%.

Na tabela 1.6, mostra-se os valores medidos no período de dezembro de 1999 até novembro de 2000, considerando-se que entre os meses dezembro e abril, efetuou-se revisão das três turbinas em operação, com adequação do conjunto para 4,9 MW ISO. Observa-se que apesar da manutenção 76% da energia elétrica consumida na planta foi cogerada.

Tabela 1.6 – Comparação de números da cogeração

	CONCESSIONÁRIA [kWh]	TURBINA [kWh]	TOTAL [kWh]	COGERAÇÃO [%]
Dez/99	4.389.790	5.463.820	9.853.610	55,45
Jan/00	4.275.840	5.665.280	9.941.120	56,99
Fev/00	3.002.410	5.501.260	8.503.670	64,69
Mar/00	2.632.020	5.779.320	8.411.340	68,71
Abr/00	2.066.360	5.580.270	7.646.630	72,98
Mai/00	766.770	7.017.789	7.784.559	90,15
Jun/00	170.000	6.964.000	7.134.000	97,62
Jul/00	155.510	8.022.010	8.177.520	98,10
Ago/00	599.620	7.329.470	7.929.090	92,44
Set/00	1.167.860	7.799.080	8.966.940	86,98
Out/00	2.729.140	7.629.710	10.358.850	73,65
Nov/00	3.322.500	7.836.010	11.1585.10	70,22
Total	25.277.820	80.588.019	105.865.839	76,12

I.4 – CONTRATO DE FORNECIMENTO

Quando se optou por passar a operação e manutenção do sistema de cogeração para outra empresa, definiu-se critérios para um contrato de fornecimento, entre estes critérios pode-se citar:

- Fornecimento mínimo de energia : quando não atingido por problemas da cogeração, desconta-se da conta de fornecimento total a potência não fornecida e consumo feito em compensação pela concessionária;
- Consumo mínimo de energia : se por motivos operacionais da unidade, optar-se por parar áreas, etc., quando o consumo se tornar inferior ao valor pré-estabelecido, paga-se por este valor mínimo;
- Valores de tarifa diferenciados para vapor e energia : consumos até patamares pré-estabelecidos, paga-se tarifa alta e a partir deste consumo reduz-se toda diferença para tarifa reduzida.
- Reajustes de tarifas anuais, considerando-se na formação de preços: IGP-M, valor de energia reserva da concessionária, taxa cambial, tarifa do vapor consumo mínimo e após consumo mínimo e tarifa da energia com consumo mínimo e após consumo mínimo.

PRODUÇÃO

Capítulo II

Aplicação de Inversores e “Soft-Starters”



II.1 - INTRODUÇÃO

A aplicação de inversores de frequência e “soft-starters” nas plantas industriais é uma das soluções mais utilizadas para conservação de energia e automatização da instalação. Evitam-se problemas em campo com sua correta especificação e abordam-se as principais características a se definir quando da escolha do equipamento. Os questionamentos quanto ao tempo de retorno de investimento, aplicabilidade destes equipamentos e influência dos mesmos na qualidade de energia (geração de harmônicos e alteração do fator de potência) tornaram-se foco de diversas discussões e serão abordados neste capítulo.

II.2 – CARACTERÍSTICAS DOS “SOFT-STARTERS”

Utilizam-se “soft-starters” como alternativa para partida de motores de indução trifásicos em substituição aos métodos por partida direta, com autotransformador ou estrela/triângulo ou quando se necessita partidas e paradas suaves protegendo o motor contra desgastes e quebras de componentes da máquina acionada, além de reduzir a corrente de partida economizando energia na partida.

Sua especificação baseia-se no limite de temperatura suportável pelos módulos dos retificadores controlados de silício (SCR's), normalmente em torno de 125 °C. Alguns parâmetros limitam esta temperatura de junção dos módulos: corrente do motor, corrente de partida, duração da partida, número de partidas por hora e tempo de repouso. Em [IEC 60947-4-2] detalham-se estes limites.

Esta característica de partida e parada suave proporciona a eliminação de componentes como contadores, transformadores, cabos adicionais para sistemas

auxiliares de partida, e outros, no circuito de alimentação do motor e, por ser microprocessado, possibilitam a escolha do torque/corrente de partida necessários para o tempo de partida exigido.

Seu princípio de funcionamento baseia-se no incremento gradual durante um tempo pré-determinado (rampa) da tensão fornecida ao motor. O mesmo princípio se aplica à parada em que a tensão é reduzida gradualmente evitando-se, por exemplo, em sistemas com bombas, o choque hidráulico na tubulação [62].

Dividem-se os “soft-starters” por categoriais por seu tipo de controle:

- Controladores de torque : somente reduz torque na partida, não existe controle de corrente na partida;
- Controladores de tensão de malha aberta : controla a tensão aplicada ao motor por meio de valores pré-definidos, mas não recebem retorno do valor da corrente. O controle ocorre pelos parâmetros de tensão e tempos de rampa;
- Controladores de tensão com malha fechada : recebe a informação da corrente, possui interrupção da rampa por limite de corrente e outras proteções;
- Controladores de corrente com malha fechada : é o mais avançado. Possui vantagens em controle preciso da corrente e grande facilidade para ajustes dos parâmetros.

Aplicações diversas são possíveis, a seguir cita-se algumas e seus benefícios :

- Bombas : com torque de partida baixo e função degrau de decremento de tensão minimiza-se o choque hidráulico em tubulações. Tem-se também menor corrente na partida e menor stress mecânico sobre o eixo do motor;
- Esteiras : Partida suave controlada sem choques mecânicos, evitando-se queda de materiais sobre a esteira, por exemplo : de garrafas. Vida útil mecânica prolongada;
- Centrífugas : Partida com limite de corrente otimiza o torque inicial e minimiza a corrente de partida.;
- Compressores : Partida com limite de corrente e com rampa de incremento de tensão. Diminui riscos de oscilações da rede;
- Ventiladores : Otimização do torque de partida, reduzindo-se desgaste mecânico no sistema de transmissão entre o motor e o ventilador;

- Misturadores : Rotação suave durante a partida reduz o “stress” mecânico sobre o motor e os eixos do misturador.

Para seleção deve-se atentar para as características de partida/parada citadas anteriormente. A seguir, detalham-se alguns procedimentos de especificação para modelo MCD 3000 [Danfoss do Brasil], aplicado em altitude superior a 1000 m, temperatura ambiente de no máximo 40°C, ciclo de trabalho de 50% e 10 partidas por hora.

Quando trabalhando com temperatura diferente de 40°C, utiliza-se a tabela 2.1 para compensar o efeito da temperatura em referência a Corrente Nominal.

Tabela 2.1 – Compensação de temperatura de “soft-starters” para corrente nominal

I (T≤30°C)	1,2 x I _N
I (T=35°C)	1,1 x I _N
I (T=40°C)	1 x I _N
I (T=45°C)	0,9 x I _N
I (T=50°C)	0,8 x I _N

Na especificação da corrente de partida utiliza-se um valor igual ou maior ao indicado na tabela abaixo, sendo I_{PC} a corrente a plena carga do motor acionado. Transcreve-se na tabela 2.2 somente equipamentos característicos a industria de alimentos.

Tabela 2.2 – Correntes de partida típicas por aplicação

Aplicação	Corrente de partida típica
Uso geral e para água	
Agitador	4,0 x I _{PC}
Bomba centrifuga	3,5 x I _{PC}
Compressor (parafuso,sem carga)	3,0 x I _{PC}
Compressor (alternativo ,com carga)	4,0 x I _{PC}
Transportadores	4,0 x I _{PC}
Misturadores	4,5 x I _{PC}
Bomba de deslocamento positivo	4,0 x I _{PC}
Bomba submersível	3,0 x I _{PC}

Aplicação	Corrente de partida típica
Processo	
Lavadora de garrafas	3,0 x I _{PC}
Centrifuga	4,0 x I _{PC}
Secadora	4,5 x I _{PC}
Moinho	4,5 x I _{PC}
Carregadora de pallets	4,5 x I _{PC}
Separadora	4,5 x I _{PC}

Existem casos onde o torque de partida, o momento de inércia e algumas características de funcionamento diferem do exposto. Nestas situações, deve-se seguir as recomendações :

- a) Calcula-se o torque de partida como porcentagem do torque a plena carga (FLT). Normalmente este dado é fornecido pelo fabricante do equipamento ou utiliza-se:

$$FLT = \frac{7040 \cdot P_{(kW)}}{rpm_{plena}} (lb.pé) \quad (2.1)$$

$$FLT = \frac{9550 \cdot P_{(kW)}}{rpm_{plena}} (N.m) \quad (2.2)$$

- b) Calcula-se a corrente de partida mínima exigida para produzir o torque de partida.

$$I_{ST} = I_r \cdot \sqrt{\frac{T_{ST}}{T_r}} \quad (2.3)$$

Onde : I_{ST} – corrente mínima exigida na partida

I_r – corrente de rotor travado

T_r – Torque de rotor travado

T_{ST} – Torque necessário na partida

Não se deve conectar capacitores na saída dos “soft-starters” para corrigir fator de potência, pois podem danificá-los. Sugere-se que para cada aplicação seja executada uma avaliação criteriosa para a aplicação e ajustes dos parâmetros do soft-starter. Em [Oliveira 96], ilustra-se um exemplo completo com simulação e dados aplicados em campo.

II.2.1 – FUNÇÕES IMPORTANTES DOS “SOFT-STARTERS”

Os “soft-starters” possibilitam, normalmente, ajustes do torque inicial na faixa de 10-80% e o tempo de partida entre 1-60 segundos .

As funções disponíveis na maioria dos modelos são:

- Partida e parada controlada com rampa de incremento e decremento de tensão : define-se tensão/torque inicial um pouco acima do torque de partida do motor, evitando-se aquecimento excessivo e ruído no mesmo, estabelecendo-se tempo de partida de acordo com a aplicação. Na parada a tensão do motor é reduzida de 100 a 30% sob uma função decremento existente no processador;
- Partida controlada com limite de corrente : quando a carga requer alto torque, utiliza-se como opção um transformador de corrente para partida com limite de corrente, ajustado na faixa de 150 a 500% do valor nominal. Quando se parte o equipamento, o processador aumenta a tensão/corrente por uma função rampa até o limite ajustado entre 3 e 6 segundos, após este tempo um controlador proporcional-integrador (PI) assume, monitorando a corrente pelo tempo de partida. Deve-se analisar o torque de partida para definir-se o limite de corrente adequado;
- - Partida controlada por sinal externo : normalmente utiliza-se um sinal de 0 a 10 Vdc para estender o tempo da rampa ou configurar a rampa na maneira desejada;
- Partida controlada por tacômetro : proporciona controle de velocidade linear durante a partida e parada;
- Controle de tensão inicial : permite ajuste entre 30 e 90% , proporcionando-se torque entre 10 e 80%;
- Tempos de rampa na partida e parada : podem ser ajustados separadamente de acordo com aplicação;
- Rampa dupla na partida e parada : é uma função rampa alternativa;
- Degrau de decremento de tensão na parada : reduz inicialmente a tensão a valores entre 90 e 40% da tensão do motor e depois aplica uma rampa programada até 30% da tensão;

- Frenagem DC : em algumas aplicações a rampa de parada não é suficiente, especialmente para máquinas de grande inércia em frenagem rápida;
- Torque “Boost” : para aplicações em que se necessita de um torque extra no início do movimento, ver figura 2.1.;

Fabricam-se alguns modelos com algumas funções de proteção, descritas a seguir :

- Capacidade térmica do motor : é a capacidade do motor suportar diretamente a corrente de linha. Considera-se normalmente a corrente de como seis vezes a corrente a plena carga e calcula-se a capacidade térmica pela fórmula 2.4 ;

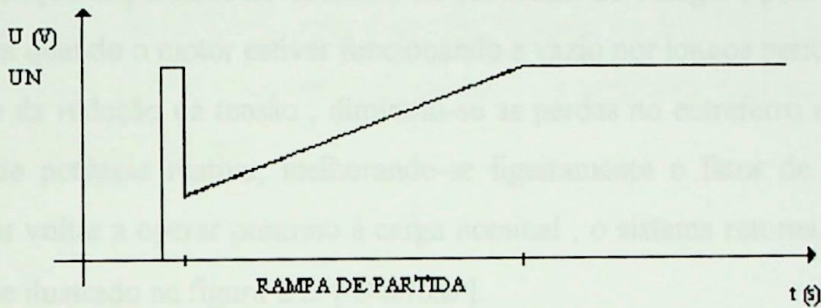


Figura 2.1 – Torque Boost

$$CT = \left(\frac{I_{rt}(\%)}{600(\%)} \right) T_{sup} \quad (2.4)$$

Onde : CT – capacidade térmica do motor

$I_{rt}(\%)$ – corrente de rotor travado (%)

T_{sup} – tempo que o motor suporta corrente de linha

- Sensibilidade ao desbalanceamento de fase : ajuste executado de acordo com as instalações. Pode-se alterar a sensibilidade e o tempo de reação da proteção;
- “Trip” por subcorrente : ajuste para corrente acima da magnetização e abaixo da corrente de operação normal;

- “Trip” por sobrecarga instantânea : ajuste para proteger motor em início de travamento;
- Proteção para tempo de partida excessivo : indica se a aplicação esta correta ou se o motor travou;
- Proteção contra rotação de fase : pode limitar a rotação do motor a um sentido somente , se necessário;
- Proteção para nova partida : garante um tempo mínimo entre a parada e o início de uma nova partida;

II.3 – APLICAÇÃO DA FUNÇÃO “ECONOMIZER”

É uma função importante no contexto da economia de energia , pois melhora o fator de potência quando o motor estiver funcionando a vazio por longos períodos.

Através da redução da tensão , diminuiu-se as perdas no entreferro do motor e de demanda de potência reativa, melhorando-se ligeiramente o fator de potência . Quando o motor voltar a operar próximo à carga nominal , o sistema retorna a tensão a 100% conforme ilustrado na figura 2.2. [Danfoss].

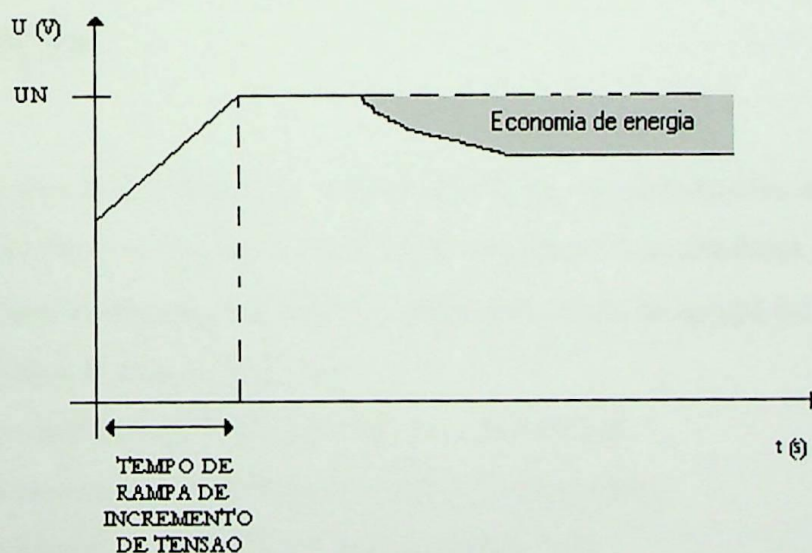


Figura . 2.2 - Controle do fator de potência

Ilustra-se na tabela 2.3 as medições obtidas em campo com esta função ativada, para um motor de 18,5 kW, 380 V.

Tabela 2.3 – Valores obtidos na aplicação “Economizer”

	Vazio sem parâmetro	Vazio com parâmetro	Carga sem parâmetro	Carga com parâmetro
Potência Ativa (kW)	11,17	11,04	17,9	17,9
Potência Aparente (kVA)	13,69	13,39	20,44	20,4
Potência Reativa (kVAR)	7,92	7,59	9,85	9,78
Fator de potência	0,81	0,82	0,876	0,878
THDi (%)	4	4,3	4,4	3,2
THDv(%)	5,5	3	2,9	2,2

Consideram-se pequenos os ganhos com a aplicação desta função para um único motor, mas abordando-se toda uma instalação passa a ser significativa. Por exemplo, em um sistema com motor de 18,5 kW, estima-se uma redução de 560 kWh/ano. Em uma área de processo onde se têm quatorze “soft-starters” de potências diversas este valor está em torno de 15.440 kWh/ano.

II.4 – TECNOLOGIAS DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Os conversores de frequência começaram a ser comercializados no final dos anos 60. Atualmente, com o avanço dos microprocessadores e da eletrônica de potência suas características foram substancialmente melhoradas. Pode-se agrupá-los quanto aos diferentes princípios de chaveamento por :

- Conversores controlados por fonte de corrente CSI
- Conversores com amplitude de pulso modulada PAM
- Conversores controlados por fonte de tensão VSI
- Conversores por modulação de pulso PWM

Entre outras vantagens da aplicação de conversores de frequência em sistemas automatizados, pode-se citar a facilidade de interface com controladores programáveis (CLP's), podendo transmitir e receber informações de controle, “status” e alarme

diversos. Para campo deve-se considerar, entre outras características, as compensações de torque e magnetização na partida e em baixas velocidades. (compensação de escorregamento), reversão, frenagem, aceleração e desaceleração, opções de curvas de torque e proteções diversas ao motor. Considerando-se os fatores econômicos, destaca-se logicamente a economia de energia quando não operando em sua velocidade nominal, bem como, aumento da vida útil dos equipamentos (evitando-se golpes mecânicos, solicitações extras aos eixos, etc.) . [Bodson 95]

II.5 – AVALIAÇÃO DOS HARMÔNICOS DOS INVERSORES

Os motores de corrente alternada foram projetados para serem alimentados por fontes de tensão de forma senoidal. Quando alimentados por conversores eles recebem além da frequência base, outras tensões adicionais com frequências múltiplas desta frequência base, dependendo do numero de elementos chaveadores que existem da etapa inversora do conversor de frequência. Estas frequências múltiplas chamadas harmônicas podem causar torques pulsantes, vibrações, aumento do ruído acústico, redução da eficiência e aumento das perdas por aquecimento no motor. Estas características são mais significantes em baixas frequências.

Na figura 2.3 , ilustram-se os efeitos dos harmônicos no campo girante do motor com as tecnologias, PAM-6 pulsos, PAM-18 pulsos, conversores PWM e conversor VSI [Danfoss A/S].

Em [Glinkowsky 95] demonstra-se para algumas situações de carga a aplicação de inversores e ilustra um maior consumo de energia quando operando próximo a velocidade nominal.

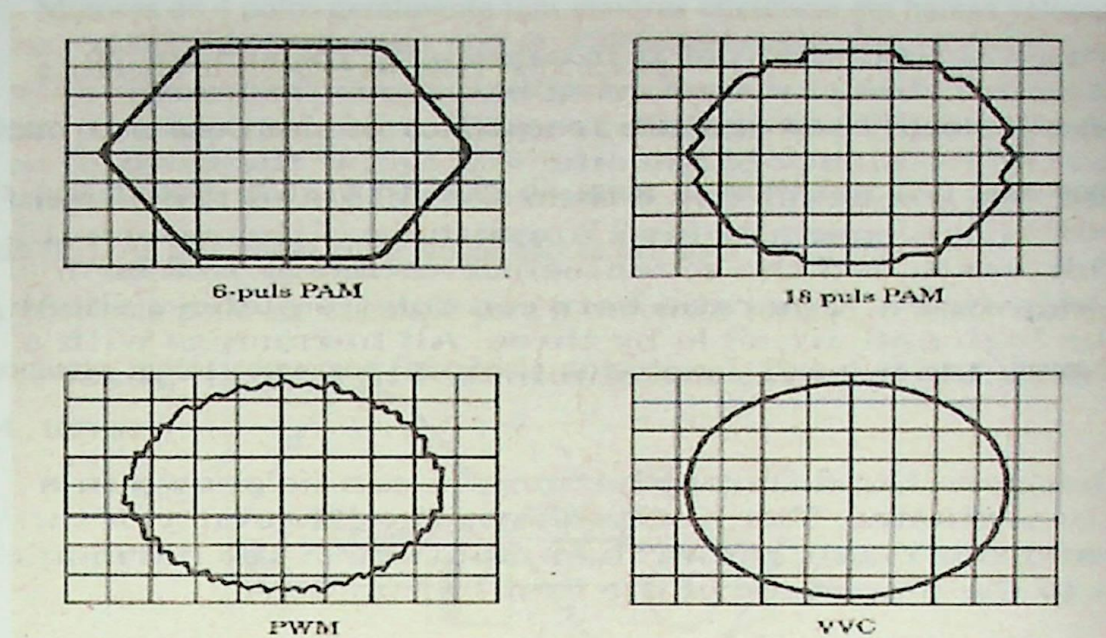


Figura 2.3 – Formato dos campos girantes

Para aplicações com baixas velocidades por longo tempo, deve-se atentar para o aquecimento do motor. Os ventiladores foram projetados para velocidades próximas da nominal, quando operando com torque constante em baixas rotações e com correntes não-senoidais o aquecimento pode comprometer a aplicação. Em [Manz 97], analisa-se as curvas de capacidade do motor funcionando com inversores em várias condições e a necessidade uma correta análise da aplicação motor/inversor para evitar aquecimentos e outras perdas indesejáveis.

Em [Liang 95] demonstram-se algumas características a se observar na escolha do número de pólos da máquina a ser acionada, visto a possibilidade de variação de velocidade pelos inversores de frequência. Deve-se observar, por exemplo, na comparação de motores de 2 e 4 pólos os seguintes pontos entre outros.

- Motores de 4 pólos têm menor resistência nos enrolamentos e conseqüentemente menores perdas no cobre.
- Motores de 4 pólos têm menor reatância magnetizante e conseqüentemente menor fator de potência.
- Motores de 4 pólos têm menor indutância de dispersão e conseqüentemente terá menores perdas por harmônicos, principalmente para conversores com chaveamento PWM.

Cap. II – Aplicação de Inversores e “Soft-Starters”

- Motores de 4 pólos geralmente têm maiores eficiência em baixas velocidades e menores eficiências em altas velocidades.

Outro ponto importante a se considerar é a eficiência. Na [VDE 0160], define-se eficiência pela relação entre a potência de saída do conversor (P_2) pela potência consumida (P_1). As diferenças entre ambas são as perdas .

A eficiência pode ser calculada para o conversor sozinho, o motor sozinho ou para o conjunto motor-conversor (eficiência do sistema). Para o sistema ilustrado na figura 2.4 , têm-se :

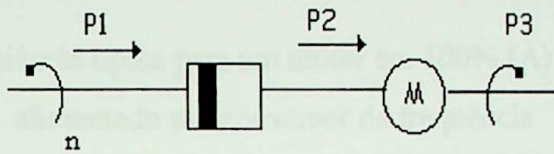


Figura 2.4 - Eficiências elétricas do sistema conversor-motor

Eficiência do conversor : P_2/P_1

Eficiência do motor : P_3/P_2

Eficiência do sistema : P_3/P_1

A seguir ilustra-se nas figuras 2.5 a, b e c, como as características de eficiência do motor podem influenciar a eficiência do sistema, para condições de carga de 25 e 100%.

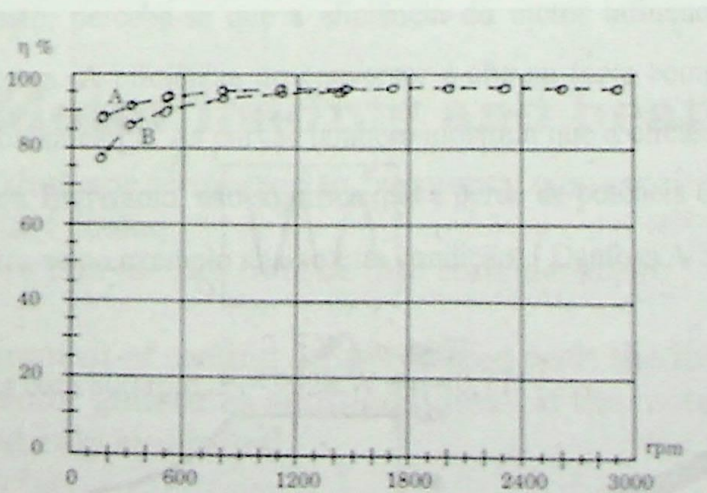


Figura 2.5 a) – Eficiência do conversor em 100% (A) e 25% (B) de carga

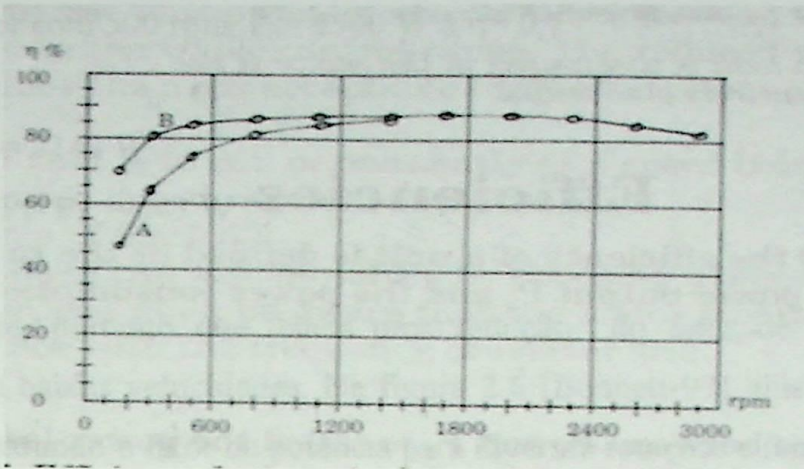


Figura 2.5 b) – Eficiência típica para um motor em 100% (A) e 25% (B) quando alimentado por conversor de frequência

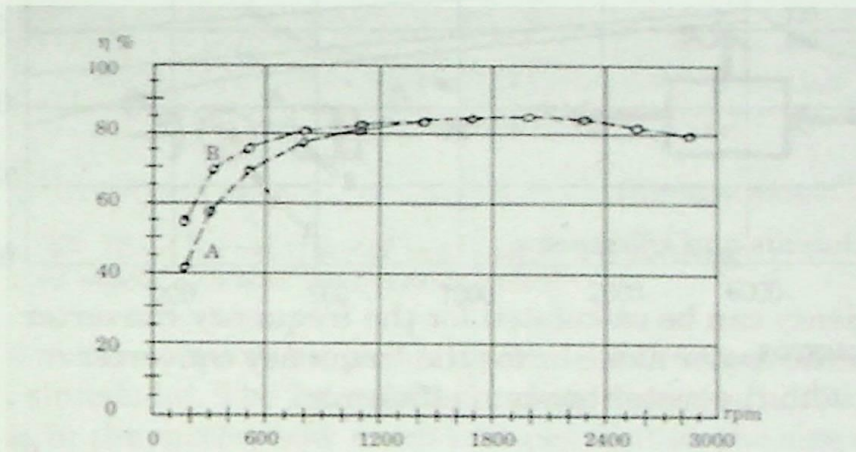


Figura 2.5 c) – Eficiência para motor e inversor em 100% (A) e 25%(B) de carga

Pelo exposto, percebe-se que a eficiência do motor influencia fortemente na eficiência do sistema. A eficiência do conversor é alta na faixa completa de controle, tanto com alta e baixa carga. As curvas também mostram que a eficiência é inferior em baixas velocidades. Entretanto, não significa que a perda de potência é maior em baixas velocidades. Ilustra-se no exemplo abaixo esta condição. [Danfoss A/S] .

Situação 1) Motor com 800 rpm, $P_3 = 9628 \text{ W}$ e $\eta = 0,77$

$$P_1 = P_3 / \eta = 12504 \text{ W}$$

$$\text{Perdas} = P_1 - P_3 = 2876 \text{ W}$$

Situação 2) Motor com 500 rpm, $P_3 = 1500 \text{ W}$ e $\eta = 0,7$

$$P_1 = P_3 / \eta = 2143 \text{ W}$$

$$\text{Perdas} = P_1 - P_3 = 643 \text{ W}$$

Percebe-se, portanto que temos uma redução do fator de potência quando trabalhando com baixas velocidades. Na figura 2.6 [Bonnett 97], ilustra-se claramente este efeito, comparando o fator de potência para diversas rotações e faixas de potência.

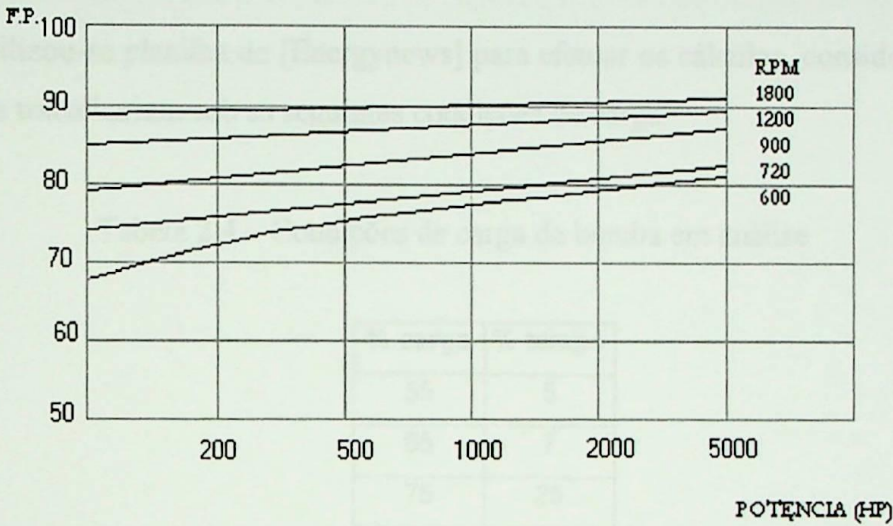


Figura 2.6 – Fator de potência típico para diversas potências com rotações diferentes

Deve-se atentar também quando da especificação de motores para trabalhar com inversores, que estes devem ser de projetos especiais ou considerar-se na aplicação à utilização e filtros, reduzindo-se as componentes que podem afetar a vida útil do isolamento do motor. Em casos especiais, deve-se procura aplicar motores com fios especiais resistentes à degradação e motores de fabricantes com processos controlados para garantir uma perfeita impregnação das bobinas e material isolante adequado. Detalha-se em [Contin 98] os cuidados nos motores alimentados por conversores.

II.6 – CASO DE APLICAÇÃO DE INVERSORES E TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO

Analisa-se neste item a viabilidade de aplicação de inversores de frequência no acionamento de bombas centrífugas para transferência de água gelada, 25 CV, 1.740 rpm, rendimento a 100% de 90,1, vazão da bomba 300 m³/h, utilizada em média por 7.100 horas no ano, considerando o custo do MWh de R\$ 55,00 e taxa de juros de 12% ao ano.

Utilizou-se planilha de [Energynews] para efetuar os cálculos, considerando que as bombas trabalhariam sob as seguintes condições de carga.

Tabela 2.4 – Condições de carga da bomba em análise

% carga	% tempo
55	5
65	7
75	25
85	60
95	3

Considerando o custo médio do inversor para motor de 25 CV para esta aplicação de R\$ 7.403,59, obteve-se as seguintes observações:

Economia ano	70,46 MWh/ano
Economia Anual Estimada	R\$ 3.875,11
Tempo Retorno	1,82 anos
Taxa Interna de Retorno (%)	52%

Em [Bortoni 98], apresenta-se metodologia para estimar-se potencial de economia em um sistema utilizando-se acionamentos de velocidade variável como substitutos de válvulas de estrangulamento. Deve-se considerar nesta análise: variações do ponto de operação da bomba em relação ao projetado, duração destas variações, custo dos equipamentos, custo da energia elétrica e características do sistema de fluxo (curva da bomba e do sistema).

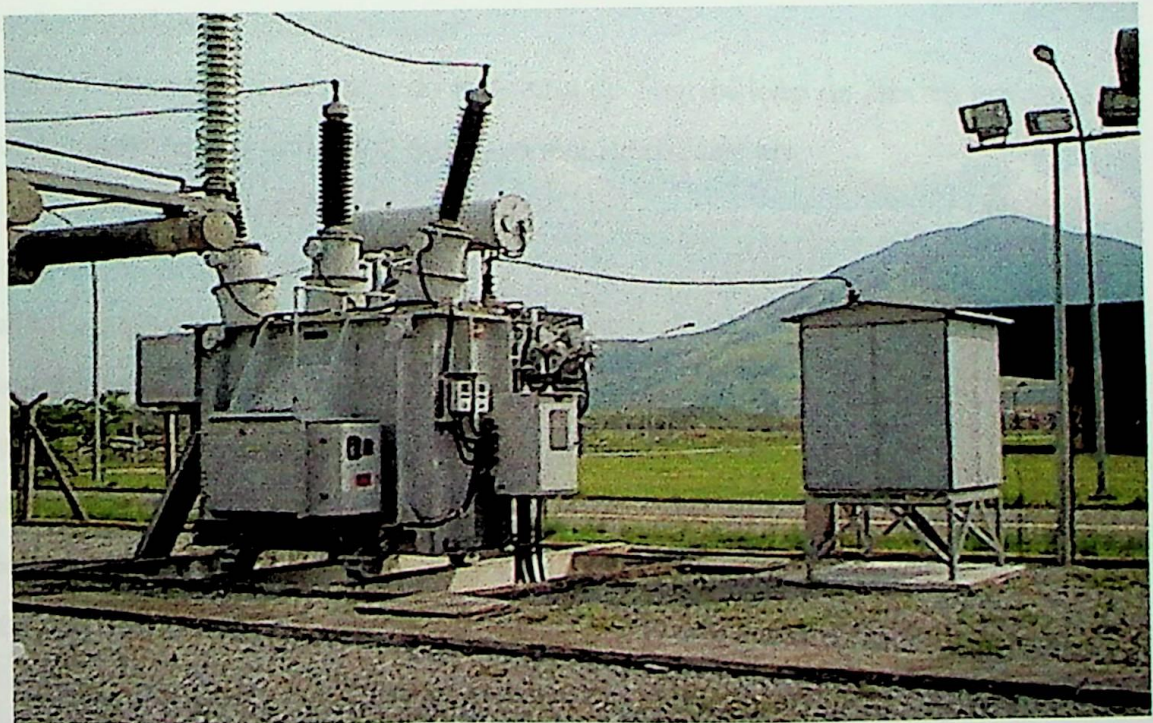
No caso do motor de 25 CV apresentado, o tempo de retorno de investimento pode parecer elevado, mas, considerando-se as vantagens a operação do sistema como: controle “on-line” da temperatura de resfriamento do produto, redução do número de paradas dos motores devido variações de pressão e vazão, completa automação do processo de resfriamento, proteção contra sobrecarga ao motor elétrico e eliminação dos golpes de Aríete nas tubulações e placas do trocador, a viabilidade da aplicação se confirma. Para ilustrar-se o ganho obtido, em um ano de operação com sistema operando restringido por válvulas, era necessário para manutenção o trocador a cada três meses por 36 horas, custo médio por parada com troca de placas de R\$ 8.000,00. Após implantar-se o sistema, a parada para manutenção tornou-se anual e somente para limpeza e reposição de vedações.

Aplicação de Bancos de
Capacitores e Adequação
da Operação de
Transformadores

RODUÇÃO

Capítulo III

Aplicação de Bancos de Capacitores e Adequação da Operação de Transformadores



III.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo abordam-se operações de manobras de transformadores como ferramenta para economia de energia e quantifica-se estes ganhos. Comenta-se sobre problemas causados por distorções harmônicas nos transformadores.

Faz-se uma análise da aplicação de banco de capacitores por setores. A importância da correta programação dos controladores automáticos e exemplos de aplicação com medições. Apresenta-se ainda o caso de alteração em um banco de capacitores já existente com vista à melhoria do fator de potência e correção no nível de tensão nos equipamentos.

III.2 – CARACTERÍSTICAS DOS TRANSFORMADORES

Em qualquer sistema industrial é importante manipular-se os níveis de tensão por motivos econômicos e segurança. O equipamento estático capaz de efetuar esta tarefa com ótimo rendimento e construção simples é o transformador.

Na figura 3.1 ilustra-se uma parte do esquema de distribuição da fábrica em análise.

Os transformadores são divididos quanto a sua finalidade em:

- Transformadores de força;
- Transformadores de distribuição;
- Transformadores de corrente;
- Transformadores de potencial;
- Transformadores de isolação;
- Autotransformadores;

As ações descritas serão sempre referidas a transformadores de força na média tensão. Na instalação industrial em estudo as tensões utilizadas são: 138 kV (alta tensão), 13,2 e 4,16 kV (média tensão) e 380 V (baixa tensão).

Os transformadores são construídos com enrolamento primário com derivações (tap's), montados junto à parte ativa, dentro do tanque que possibilita uma adequação da

tensão secundária que alimentará os motores, bombas, e outros equipamentos a uma tensão constante 380/220 V.

Alguns conceitos normalizados para transformadores são:

Tensão de curto-circuito (impedância a 75 °C) – é a tensão, expressa em porcentagem da tensão nominal, que deve ser ligada aos terminais de um enrolamento para obter a corrente nominal do outro enrolamento, cujos terminais estão curto-circuitados. Estes valores são tabelados.

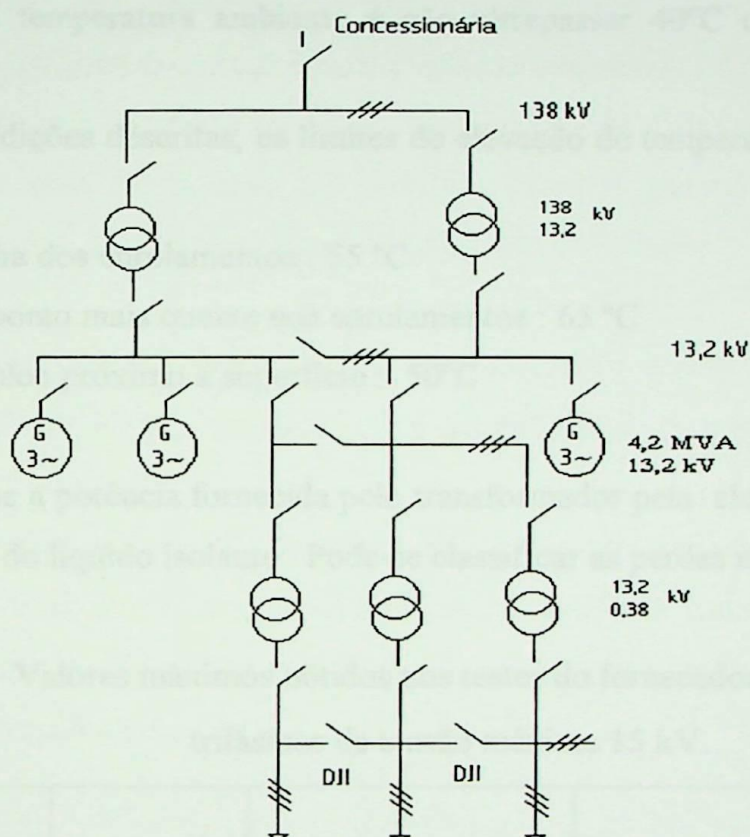


Figura 3.1 - Diagrama esquemático simplificado da distribuição do sistema em análise

Corrente Nominal – É a corrente para qual o enrolamento foi dimensionado (I_n). É determinada em função da potência do transformador em kVA, e da tensão do enrolamento considerado.

Corrente de Excitação – Também chamada de corrente a vazio (I_0). É a corrente de linha que surge quando ligado à tensão nominal e frequência nominal, quando os terminais do outro enrolamento estão abertos e com tensão nominal. Na tabela 3.1 [WEG 98] apresenta-se valores de corrente de excitação de transformadores trifásicos, classe 15 kV, utilizados na planta em análise. Os dados informados são relativos aos ensaios executados pelo fabricante.

Este valor é uma representação desempenho/custo, pois, uma pequena redução de I_0 , representa um acréscimo no custo de fabricação, devido a aumento do material ativo do transformador.

Perdas - Se comparado com outros equipamentos o transformador apresenta pequenas perdas, porém significativas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece a elevação máxima da temperatura dos enrolamentos e do líquido acima da temperatura ambiente e as perdas máximas admitidas em [ABNT NBR5410]. A referência para temperatura ambiente é não ultrapassar 40°C e a média diária não ser superior a 30°C.

Nas condições descritas, os limites de elevação de temperatura previstos pela norma são:

- Média dos enrolamentos : 55 °C
- Do ponto mais quente nos enrolamentos : 65 °C
- Do óleo próximo a superfície : 50°C

Limita-se a potência fornecida pelo transformador pela elevação de temperatura dos enrolamentos e do líquido isolante . Pode-se classificar as perdas nos transformador em:

Tabela 3.1 – Valores máximos obtidos nos testes do fornecedor para transformadores trifásicos de tensão máxima 15 kV.

Potência (kVA)	I_0 max (%)	Perdas vazio (W)	Perdas totais máximas (W)	Quantidade instalada na planta
300	2,6	970	4.480	1
500	1,7	1.380	7.630	1
750	2	2.000	11.400	1
750/937,5	2	2.000	11.400	2
1.000	1,8	2.700	14.900	2
1.000/1.250	1,8	2.700	14.900	3
1.500	1,5	3.300	22.800	4
1.500/1.875	1,5	3.300	22.800	22
2.000	1	3.200	23.100	1
3.000	0,8	4.300	31.600	3
3.750	0,75	6.000	38.800	3

- Perdas na resistência ôhmica dos enrolamentos : surgem da passagem da corrente elétrica pelo condutor. São representadas por I^2R e dependem do carregamento do transformador;
- Perdas parasitas no condutor dos enrolamentos : surgem pelas correntes parasitas induzidas nos condutores das bobinas pelo fluxo de dispersão. Dependem da corrente de carga , do carregamento elétrico e da geometria dos condutores das bobinas;
- Perdas por histerese : provocadas pelas propriedades dos elementos ferromagnéticos de atrasarem a indução magnética (B) e o campo magnético (H).
- Perdas por correntes parasitas : surgem porque o fluxo indutor variável induz no ferro uma f.e.m. que faz circular correntes parasitas nos circuitos elétricos fechados. São proporcionais ao quadrado da indução.

Rendimento - Por definição de norma [ABNT NBR5456], é a relação entre a potência ativa fornecida e a potência ativa recebida por um transformador , expressa em porcentagem.

O rendimento de um transformador não é fixo ao longo de seu ciclo de operação, e depende do fator de potência e da relação entre a potência fornecida e potência nominal. Esta última relação é conhecida como fator de carga. Assim, pode-se usar a seguinte relação para expressar rendimento.

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + b^2 . P_C}{b . S_n . \cos \theta + P_0 + b^2 . P_C} \right) . 100\% \quad (3.1)$$

Onde:

η = rendimento do transformador em %

b = fator de carga = P/P_n

P = potência fornecida pelo transformador em kW

S_n = potência nominal em kVA

P_c = perdas no material dos enrolamentos em kW (perdas de carga)

P_0 = perdas à vazio em kW

$\cos \theta$ = fator de potência da carga

Têm-se rendimento máximo quando as perdas no material dos enrolamentos e perdas no ferro forem iguais. Para saber qual a carga a ser aplicada a um transformador para que opere no rendimento máximo, utilizam-se as fórmulas a seguir .

$$b = \sqrt{\frac{P_0}{P_c}} \quad (3.2)$$

$$S^* = b.S_n \quad (3.3)$$

Apresenta-se para os transformadores em estudo, na tabela 3.2 os valores para o melhor rendimento considerando fator de potência médio 0,95, que é o fator de potência médio encontrado na planta em análise. Abaixo se descreve um exemplo deste cálculo.

Transformador trifásico 1000 kVA, com perdas a vazio (P_0) de 2700 W e perdas de carga (P_c) = Perdas totais (P_t)- P_0

$$b = \sqrt{\frac{2700}{14900 - 2700}} = 0,22$$

$$\eta = \left(1 - \frac{2,7 + 0,22^2 \times 12,2}{0,22 \times 1000 \times 0,95 + 2,7 + 0,22^2 \times 12,2} \right) \times 100 \quad \eta = 98,81\%$$

Capacidade de sobrecarga – é a elevação de temperatura que limita a potência a ser fornecida por um transformador . Acima das temperaturas limites o material isolante se deteriora, diminuindo a vida útil do transformador, que é em média 25 anos em operação contínua, com ponto mais quente a 95 °C. Têm-se em [ABNT NBR5416] tabelas demonstrativas das condições de sobrecarga e perda de vida útil em função da carga inicial, duração da ponta e temperatura ambiente.

III.3 – OPERAÇÃO EM PARALELO DE TRANSFORMADORES

Conectam-se transformadores em paralelo quando é necessário aumentar carga de determinada área ou manter a continuidade operacional resultante da falha de um dos transformadores.

Diz-se que transformadores estão operando em paralelo quando estão ligados à mesma rede primária e os secundários conectados ao mesmo barramento.

Para se conectar em paralelo é necessário que os transformadores possuam:

- Diagramas vetoriais com mesmo deslocamento angular;
- Relações de transformação idênticas, inclusive derivações;
- Impedâncias ou tensões de curtos-circuitos iguais (aceitam-se desvios de até 7,5%).

III.3.1 – AVALIAÇÃO DO MELHOR PONTO DE OPERAÇÃO

Sabe-se que o carregamento dos transformadores varia com o funcionamento das linhas de operação. É, portanto, boa prática se retirar ou introduzir transformadores em paralelo para se obter um mínimo de perdas totais, atingindo-se uma melhor operação (mais econômica). Como a planta em análise trabalha com transformadores iguais conectados em paralelo, avalia-se a seguir a partir de qual potência deve-se retirar ou introduzir transformadores.

Tabela 3.2 – Rendimentos para fator de potência médio de 0,95

Pt (W)	Po (W)	Sn (kVA)	$b = (Po/Pc)^{1/2}$	S (kVA)	Pc (W)	rendimento
4.480	970	300	0,5257	157,71	3.510	98,72
7.630	1.380	500	0,4699	234,95	6.250	98,78
11.400	2.000	750	0,4613	345,95	9.400	98,80
11.400	2.000	750/937,5	0,4613	432,44	9.400	99,04
14.900	2.700	1.000	0,4704	470,44	12.200	98,81
14.900	2.700	1.000/1.250	0,4704	588,05	12.200	99,04
22.800	3.300	1.500	0,4114	617,07	19.500	98,89
22.800	3.300	1.500/1.875	0,4114	771,33	19.500	99,11
23.100	3.200	2.000	0,4010	802,01	19.900	99,17
31.600	4.300	3.000	0,3969	1.190,62	27.300	99,25
38.800	6.000	3.750	0,4277	1.603,87	32.800	99,22

Define-se fator de carga agora como :

$$b = \frac{S_g}{S_n} \quad (3.4)$$

Onde :

S_g = carga a ser submetida ao grupo em carga, a partir da qual é econômico operar mais um transformador (kVA)

S_n = potência nominal de cada transformador (W)

Pode-se calcular b pela fórmula (3.5)

$$b = \sqrt{\frac{N(N-1).P_0}{P_c}} \quad (3.5)$$

Onde:

N = número de transformadores do grupo

P_0 = perda a vazio (W)

P_c = perda em carga (W)

Analisando-se o caso do transformador de 1.000 kVA, que possui $P_0 = 2.700$ W e $P_c = 12.200$ W, deve-se colocar o segundo transformador em operação quando a potência deste superar a S_g calculado a seguir :

$$b = \sqrt{\frac{2.1.2700}{12200}} = 0,6652$$

$$S_g = 0,6652 \times 1000 = 665,2 \text{ kVA}$$

E o terceiro transformador quando a carga atingir o novo valor de S_g calculado a seguir :

$$b = \sqrt{\frac{3.2.2700}{12200}} = 1,1523$$

$$S_g = 1,1523 \times 1000 = 1152 \text{ kVA}$$

Na tabela 3.3 apresentam-se estes valores para os transformadores desta planta possíveis de serem colocados em paralelo. Existe uma característica no circuito de comando (intertravamento elétrico entre os botões de liga dos disjuntores) que impossibilita um transformador individualmente alimentar três grupos de carga na baixa tensão. No circuito ilustrado na figura 3.2, este intertravamento é representado pelo disjuntor de interligação. É possível através de uma chave “by-pass” conectar duas cargas a um transformador sem necessidade de desenergizar o barramento.

Tabela 3.3 – Potências indicativas para manobras e colocação de transformador alimentando duas cargas

Potência (kVA)	Po (W)	Pc (W)	b	Sg (kVA)
500	1380	6.250	0,6645	332,26
750	2.000	9.400	0,6523	489,24
1.000	2.700	12.200	0,6652	665,29
1.000/1.250	2.700	12.200	0,6652	831,5
1.500	3.300	19.500	0,5817	872,66
1.500/1.875	3.300	19.500	0,5817	1.090,68

Esta é a prática normalmente adotada nos horários em que não há grande produção e/ou na sazonalidade da planta. Na tabela 3.4 apresenta-se um quadro com os consumos reduzidos nos meses do ano com este tipo de procedimento operacional. Estas operações de conexões em paralelo ocorrem procurando se obter a potência de carregamento do transformador próxima a potência de melhor rendimento referenciadas na tabela 3.2.

É importante lembrar que os valores indicados se referem a manobras efetuadas no período de maio 1999 a abril 2000. Obteve-se uma redução no consumo de 144.718 kWh/ano.

Tabela 3.4 – Economias obtidas período Mai/99-Abr/00

Mês/Ano	Economia (kWh)
Mai/99	13.730,4
Jun/99	14.568
Jul/99	14.301,6
Ago/99	13.730,4
Set/99	13.442,4
Out/99	13.586,4
Nov/99	10.087,2
Dez/99	6.187,2
Jan/00	6.139,2
Fev/00	11.139,3
Mar/00	13.730,4
Abr/00	14.076

Quando o sistema alimentado é composto por muitas cargas não-lineares, deve-se considerar o efeito das distorções harmônicas, que causam aquecimentos excessivos internos no transformador e redução da vida útil do equipamento. Em [Massey 94], demonstra-se como se calcula o fator de crista, percentagem de distorção harmônica e o fator K, que deve ser considerado na especificação de transformadores para cargas não-lineares. Descreve-se um método para estimar estes efeitos e comenta-se sobre possíveis alterações nos projetos dos transformadores e em [Henderson 94] comenta-se sobre algumas soluções para o problema, como transformadores de isolamento, reatores e filtros de harmônicos e seus impactos no sistema.

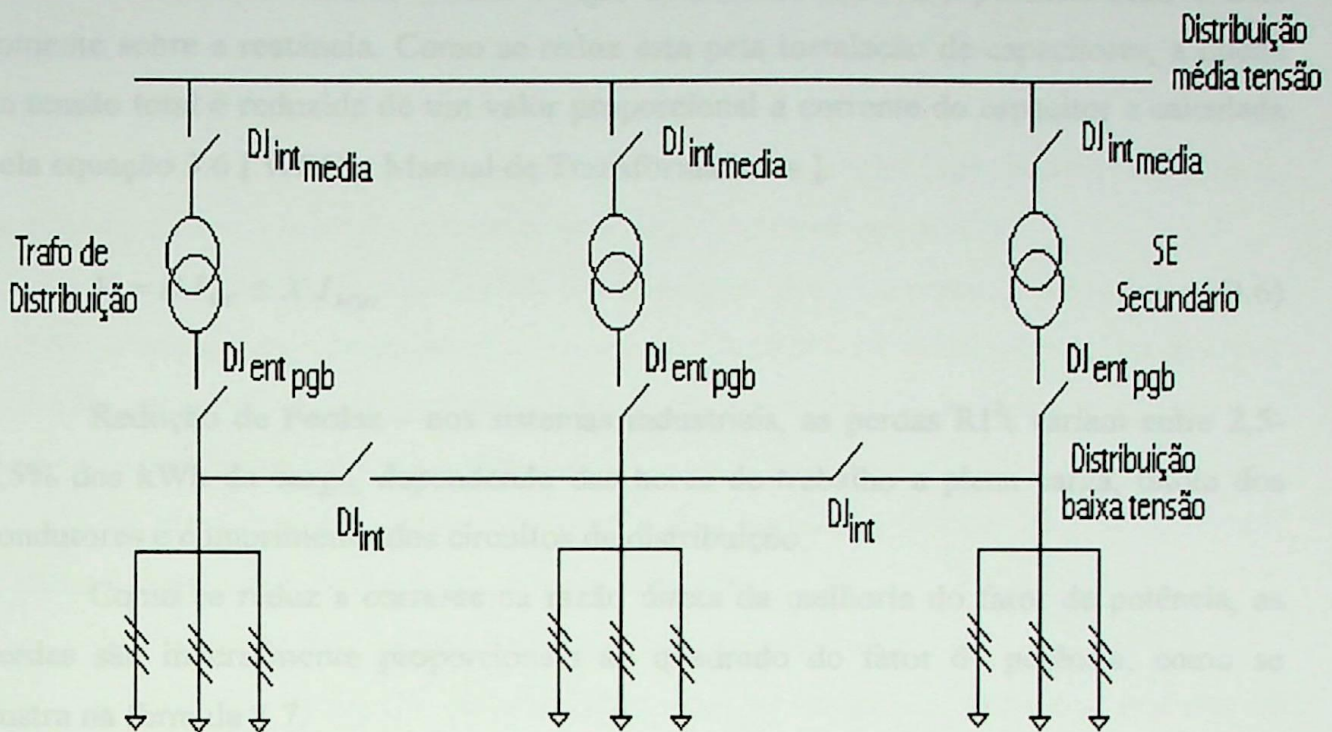


Figura 3.2 – Diagrama trifilar da distribuição em um painel de baixa tensão

III.4 – CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM BAIXA TENSÃO

Existem vários motivos para um baixo fator de potência, entre eles pode-se citar:

- Motores de indução trabalhando a vazio;
- Motores superdimensionados;
- Transformadores trabalhando a vazio ou com pequena carga;
- Reatores com baixo fator de potência nos sistemas de iluminação;
- Nível de tensão alto, provocando aumento do consumo de reativos;
- Distorção harmônica elevada, devido a retificadores, inversores de frequência, lâmpadas fluorescentes, fontes chaveadas, no-breaks, microcomputadores, entre outros;

Citam-se como as duas principais vantagens da correção do fator de potência:

Melhoria da Tensão – sabe-se que a corrente relativa à potência reativa atua somente sobre a reatância. Como se reduz esta pela instalação de capacitores, a queda de tensão total é reduzida de um valor proporcional a corrente do capacitor e calculada pela equação 3.6 [WEG – Manual de Transformadores].

$$V = R.I_{kW} \pm X.I_{kVAr} \quad (3.6)$$

Redução de Perdas – nos sistemas industriais, as perdas RI^2t variam entre 2,5-7,5% dos kWh da carga, dependendo das horas de trabalho a plena carga, bitola dos condutores e comprimento dos circuitos de distribuição.

Como se reduz a corrente na razão direta da melhoria do fator de potência, as perdas são inversamente proporcionais ao quadrado do fator de potência, como se ilustra na fórmula 3.7.

$$\frac{\% \Delta P}{P1} = 100 - \frac{100 \cdot \cos^2 \varphi 1}{\cos^2 \varphi 2} \quad (3.7)$$

Na figura 3.3 , ilustra-se a melhoria na redução de perdas com a correção do fator de potência.

Pode-se melhor avaliar este percentual de perdas, observando-se as potências aparente e reativa pela fórmula 3.8.

$$\frac{\% \Delta P}{P1} = 100 \cdot Qc \cdot \frac{(2Q - Qc)}{S^2} \quad (3.8)$$

Pode-se corrigir instalando banco de capacitores de diversas formas, objetivando conservação de energia e relação custo/benefício:

a) Correção na entrada de energia : corrige-se o fator de potência visto pela concessionária, mantendo-se os problemas internos como: limitação dos transformadores, quedas e flutuações de tensão, sobrecarga com redução da vida útil de alguns componentes, etc.

b) Correção na entrada de baixa tensão : normalmente utiliza-se bancos automáticos de capacitores. Aplica-se em instalações com numero de cargas com potências diferentes e regimes pouco uniformes.

c) Correção por grupo de cargas : instala-se o capacitor em um setor específico, atendendo a um conjunto de pequenas máquinas (menores que 10 CV).

d) Correção localizada : instala-se capacitores junto ao equipamento. É a melhor solução técnica, com vantagens de : reduzir perdas em toda instalação, diminuir carga dos alimentadores, utilizar sistema único para acionamento da carga e capacitor e somente gera reativo onde necessário.

e) Correção mista : para conservação de energia é a melhor solução em termos práticos e financeiros. Seguem-se algumas sugestões:

- Capacitor fixo do lado secundário do transformador;
- Motores de 10 CV ou maiores, corrige-se no local , sendo que motores de alta inércia , deve-se dispensar o uso de contadores para manobra dos capacitores sempre que a corrente nominal dos mesmos for maior que 90% da corrente de excitação do motor;
- Motores menores que 10 CV, corrige-se por grupos;
- Sistemas de iluminação com lâmpadas de descarga que utilizam reatores de baixo fator de potência, corrige-se na entrada da rede ou quadro de distribuição.
- Banco automático na entrada para equalização final se necessário.

Em sistemas com 20% de cargas não-lineares deve-se medir periodicamente os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente e se necessário instalar-se indutores anti-harmônicas que protegem os capacitores contra harmônicas e correntes de surto ou filtros anti-harmônicos para eliminar um harmônico específico que esteja atuando sobre o circuito.

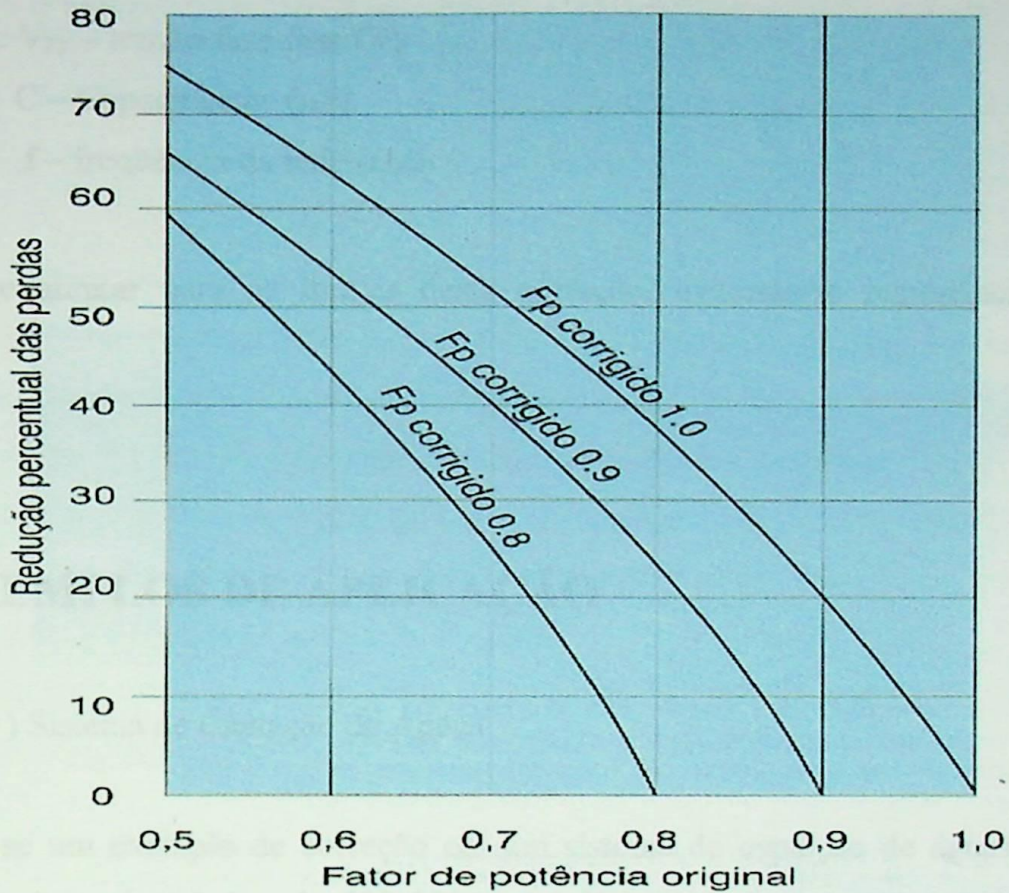


Figura 3.3 – Redução percentual das perdas em função do fator de potência

III.4.1 – CORREÇÃO PARA TRANSFORMADORES

Em sistemas onde se têm transformadores operando a vazio por longos períodos, pode-se optar pela instalação de um banco de capacitores específico para o mesmo, dimensionando-se o capacitor conforme fórmulas 3.8 e 3.9.

$$Q_0 = \frac{i_0 \cdot S_n}{100} \quad (3.8)$$

Onde :

Q_0 - potência reativa do transformador (kVAr) , considerada igual à potência aparente do transformador a vazio (kVA)

i_0 - corrente em vazio do transformador em p.u.

S_n - potência nominal do transformador (kVA)

$$C = \frac{Q_0}{V_{FF}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-9}} \quad (3.9)$$

Sendo : V_{FF} – tensão fase-fase (V)

C – Capacitância (μF)

f – frequência da rede (Hz)

Deve-se atentar para os limites desta correção, evitando-se ressonância no sistema.

III.5 – EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Caso 1) Sistema de Captação de Águas

Ilustra-se um exemplo de correção em um sistema de captação de águas com dois transformadores instalados de 500 kVA, que já possuía bancos conectados no C.C.M. que não compensavam a potência reativa suficiente. Instalaram-se dois bancos de 40 kVAr adicionais com temporizador para evitar surtos nos capacitores e detectores de mínima tensão no mês de abril de 2000. Apresentam-se os resultados na tabela 3.5, a seguir:

Tabela 3.5 – Dados da conta de energia área captação

Mês	Consumo (kWh)	FP	Reativo (kVArh)	R\$ Reativo
09/99	45.119	0.769	8.875	1.199,00
10/99	55.458	0.745	13.018	1.715,87
11/99	53.305	0.702	16.525	1.797,69
12/99	51.066	0.834	5.260	628,87
01/00	66.856	0.804	9.627	1.158,97
02/00	52.589	0.856	4.901	428,64
03/00	51.635	0.699	16.317	1.964,35
04/00	57.197	0.97	0	0
05/00	44.924	0.948	0	0

Estima-se para o caso citado economia anual aproximada de R\$ 15.000,00.

Caso 2) – Reposicionamento de bancos de capacitores

Na instalação em estudo, definiu-se no projeto a instalação de bancos de capacitores com controle automático para cada CCM, a partir de uma suposta carga a ser instalada neste painel e pela capacidade do transformador alimentador. Após toda a planta em operação, percebeu-se por medições que alguns painéis operam com todos os capacitores ligados e outros com poucas unidades em operação. Como medida para redução do consumo de energia, optou-se por reposicionar alguns capacitores, onde se cita como exemplo o painel do alimentador da central de CO₂.

Instalaram-se dois novos capacitores de 40 kVAr de forma fixa neste painel e os resultados obtidos estão na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Comparação consumos antes e depois reposicionamento de capacitores

	ANTES	DEPOIS
kVA	469	365
kW	412	333
kVAr	221	150
V	377	383
I	707	560
FP	0.87	0.91

Estima-se com este reposicionamento uma redução no consumo de 500.000 kWh/ano.

Caso 3) – Programação dos controladores automáticos do bancos

O princípio de funcionamento dos bancos automáticos de correção do fator de potência, é através de relés varimétricos sensíveis a variações de energia reativa, comandados automaticamente. Quando se conhece o comportamento das cargas ligadas

pode-se ajustar este dispositivo para trabalhar próximo ao fator de potência unitário e com intervalos de tempo entre acionamento e desenergização maiores, possibilitando o fator de potência do sistema atingir valores próximos de 1,0. Alterando-se um banco com dez estágios de capacitores de 25 kVAr, que normalmente trabalham com cinco bancos ativos, revezando-se a energização por seqüência e alterando-se sua parametrização de 0,92 para 0,96 , na medição da barra sob correção, têm-se uma alteração para trabalhar com 7 bancos ativos, ou seja , uma redução no consumo mês em aproximadamente 35.000 kWh. Ilustram-se nas figuras 3.4 e 3.5, o controlador aplicado e o armário com 10 bancos de capacitores.



Figura 3.4 – Controlador de fator de potência da barra alimentadora área processo

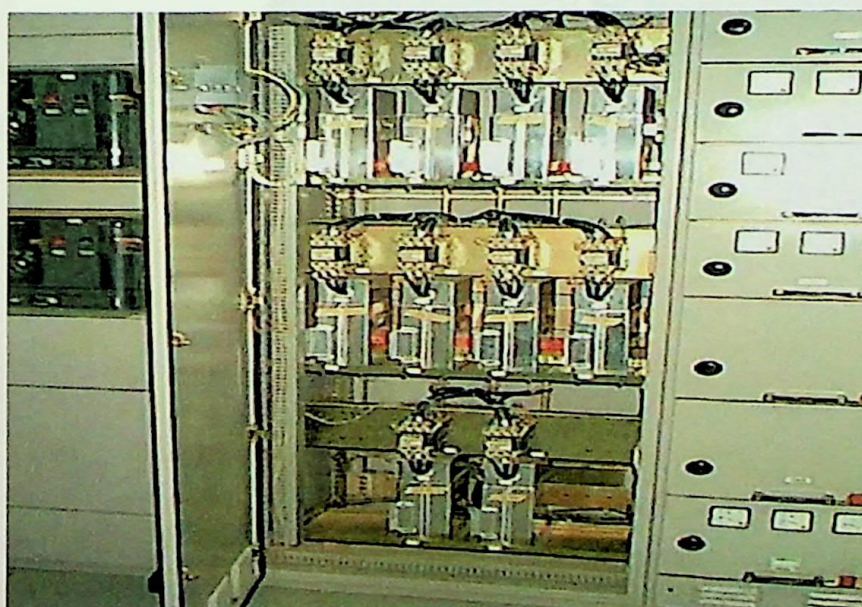


Figura 3.5 – Banco de Capacitores com dez estágios na área de processo

INTRODUÇÃO

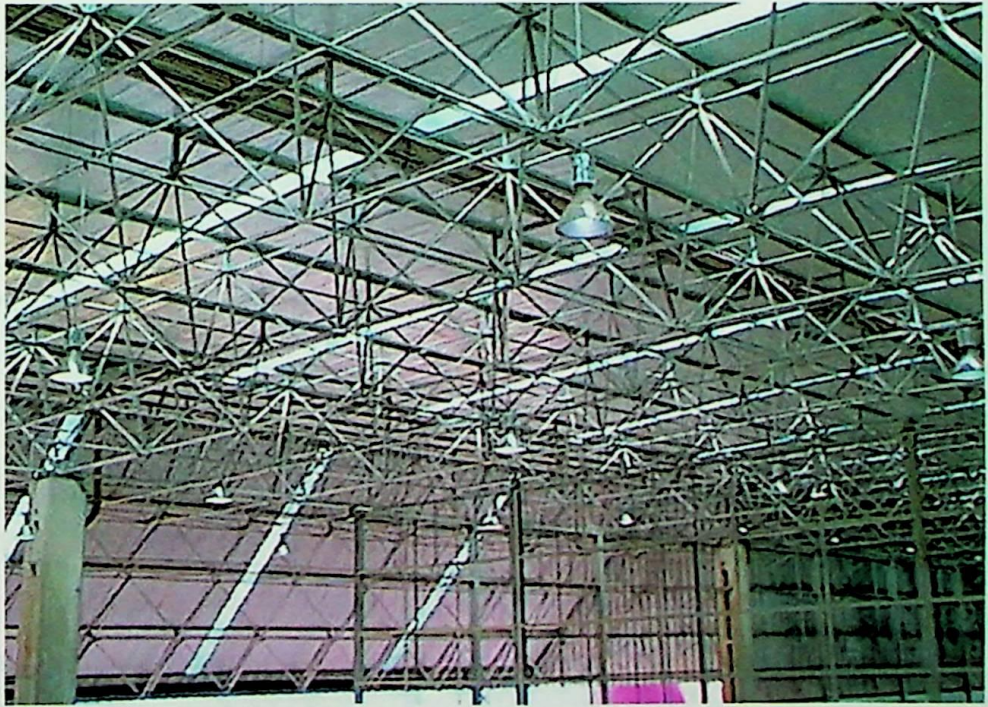
Uma instalação industrial, muitas vezes, os sistemas de iluminação são
desenhados no momento da construção. Considerando que em geral, as
indústrias produzem por 24 horas, uma iluminação eficiente deve ter a
menor eficiência de energia.

Capítulo IV

Trabalhos de Luminotécnica

Este capítulo aborda alguns trabalhos realizados para a instalação de iluminação
em uma indústria, desde a escolha e instalação para até a implementação de

PRÁTICA DE APLICAÇÃO



IV.1 – INTRODUÇÃO

Em uma instalação industrial, muitas vezes os sistemas de iluminação têm grande impacto no consumo da unidade fabril. Considerando-se que em geral, as empresas não têm produção por 24 horas, uma otimização destes sistemas leva a uma economia considerável de energia.

A planta em análise funciona em regime integral (24 horas), com grande parte de seu parque fabril. A potência instalada com iluminação atinge aproximadamente 9% da potência instalada total, ou seja, a utilização racional dos sistemas, pode trazer economias significativas.

Neste capítulo aborda-se alguns trabalhos executados para redução de consumo, bem como, apresenta-se alguns casos e resultados para troca dos equipamentos de iluminação.

IV.2 – PRÁTICAS PARA CONSERVAÇÃO COM ILUMINAÇÃO

Sugere-se para uso racional dos sistemas de iluminação algumas práticas comentadas a seguir:

- Desligamento da iluminação em locais sem ocupação : Pode-se colocar em prática esta atividade através das Comissões Internas de Conservação de Energia, que se encarregam de divulgar e fiscalizar os locais com luzes acesas desnecessariamente e sinalizar/indicar ações do tipo “APAGUE A LUZ AO SAIR”, entre outras atividades.

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

- Redistribuição de circuitos e instalação de interruptores : Aplica-se esta prática a todos os locais onde existe a dificuldade de acesso aos interruptores ou onde se percebe com as alterações de “lay-out” a necessidade de um remanejamento ou adequação dos circuitos seccionadores.
- Instalação de fotocélulas : Instala-se sistema de desligamento de iluminação por fotocélulas, em locais de acesso remoto ou de pequeno trânsito de pessoas, evitando esquecimentos e atrasos na atividade de desligar luminárias acesas desnecessariamente. Aplica-se também a todo sistema de iluminação de áreas de circulação e ruas, pátios, onde normalmente as lâmpadas aplicadas são de potência elevada. Ressalta-se a importância da manutenção dos sistemas com fotocélulas, visto que um defeito neste sistema pode causar uma utilização desnecessária de iluminação.
Exemplo: Um sistema para iluminação de um armazém com 10 torres de iluminação com quatro lâmpadas de 400 W, vapor de sódio em cada torre. Uma má regulação deste sistema com fotocélulas, causando sua utilização por 4 horas/dia a mais que o necessário, eleva o consumo da empresa em 1920 kWh/mês.
- Utilização de telhas translúcidas : O aproveitamento da iluminação natural , principalmente em áreas de estoque, reduz consideravelmente a utilização de iluminação durante o período diurno.
- Utilização de sistemas de acionamento por presença : Aplica-se em salas elétricas ou depósitos em que a presença de pessoas é por pequeno tempo .
- Manutenção/Limpeza de luminárias : Executando-se uma correta manutenção de luminárias, garante-se os níveis de fluxo luminoso e luminância. Estudo para determinação do ciclo ótimo de manutenção é demonstrado em [Agência para Aplicação de Energia 93].
- Desconexão de lâmpadas em locais de pouca utilização : Exemplifica-se esta prática pela iluminação nas baias de transformadores. Estas lâmpadas são desconectadas do sistema por fotocélulas e somente serão acionadas quando

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

da necessidade de qualquer atividade no local. Na planta em análise foram 36 lâmpadas de 250 W vapor de sódio desconectadas.

- Substituição de lâmpadas : Substitui-se as lâmpadas existentes com maior consumo por outras equivalentes/alternativas com melhor rendimento elétrico e luminoso. Aplica-se, por exemplo, a prática de substituir lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas. Existem alguns estudos sobre estas alternativas, algumas indicadas na tabela 4.3 ou em trabalhos publicados como [Silva 96].
- Substituição de reatores : Substitui-se reatores eletromagnéticos por reatores eletrônicos, obtendo-se menores consumo e distorção de corrente

IV.3 – TIPOS DE LÂMPADAS NO MERCADO

Pode-se dividir as lâmpadas elétricas em dois grupos: lâmpadas incandescentes e lâmpadas de descarga.

IV.3.1 – LÂMPADAS INCANDESCENTES

Verifica-se a eficiência da lâmpada incandescente pela proporção da energia radiada por seu filamento , normalmente de tungstênio, que possui a característica de elevado ponto de fusão e baixa velocidade de evaporação, permitindo maiores temperaturas de operação e conseqüentemente, maior eficiência quando comparado a outros metais. Melhora-se a eficiência luminosa espiralando-se o filamento , onde se reduz a perda de calor por condução e convecção devido um superfície efetiva menor .

Coloca-se o filamento em um invólucro de vidro selado chamado bulbo, que pode ser transparente ou ter acabamento argenta (leitoso). As lâmpadas com acabamento argenta proporcionam uma melhor distribuição do fluxo luminoso, devido a atenuação de sombras e ofuscamento.

No interior deste bulbo enche-se com gás inerte para reduzir a evaporação do filamento, possibilitando-se ao filamento atingir temperaturas maiores. Nitrogênio e

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

argônio são os gases normalmente usados e para lâmpadas especiais e utiliza-se o criptônio por possuir menor perda por condução e convecção.

A base possui a função de fixar a lâmpada ao receptáculo. Os tipos mais comuns identificam-se pela letra E (Edson) e B (baioneta) seguido por um numero indicando o diâmetro da base em milímetros. Constroem-se bases com latão, alumínio ou níquel.

Existem algumas lâmpadas incandescentes especiais : que são as lâmpadas espelhadas e as halógenas.

Aplicam-se lâmpadas espelhadas normalmente em vitrines, exposições, museus e outros locais especiais. Caracterizam-se por ter um espelho na parte interna da superfície do bulbo. Este espelho ou refletor não está sujeito à corrosão ou contaminação de qualquer espécie, reduzindo-se os custos com manutenção e mantendo-se um alto rendimento durante toda vida útil da lâmpada.

Utilizam-se lâmpadas halógenas na iluminação de praças esportivas, saguões, museus, painéis entre outras. Caracterizam-se por possuir um halogênio (normalmente iodo, flúor e bromo) adicionado ao gás normal, que através de um ciclo regenerativo evita a condensação na parede do bulbo , evitando-se o escurecimento . Constrói-se seu invólucro com quartzo especial, para resistir a altas temperaturas necessárias ao ciclo de halogênio.

IV.3.2 – LÂMPADAS DE DESCARGA

Produz-se luz neste tipo de lâmpada por uma continua descarga elétrica num gás ou vapor ionizados, e muitas vezes combinado com a luminescência de fósforos, que se excitam com a radiação da descarga. Opera-se normalmente este tipo de lâmpada com dispositivos limitadores de corrente ou reatores.

Utilizam-se diferentes materiais para construção do tubo de descarga, dependendo do tipo de lâmpada :

Fluorescentes tubulares (ou mercúrio baixa pressão): Vidro alcalino-silicato transparente;

Mercúrio alta pressão : quartzo ou sílica;

Sódio baixa pressão : vidro alcalino forrado internamente com vidro borossilicato resistente a sódio;

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

Sódio alta pressão : óxido de alumínio sintetizado e transluzente;

Constroem-se os eletrodos com tungstênio, espiralados em forma de colméia com material emissivo.

O bulbo externo têm a finalidade de proteger o tubo de descargas contra influências externas e enche-se este com gás inerte (nitrogênio) ou a vácuo. Pode-se cobrir internamente o bulbo com uma camada difusa ou camada de fósforo para melhorar a reprodução de cores.

Opera-se este tipo de lâmpada com reatores (indutores e capacitores) que limitam a corrente . Na partida utiliza-se starter ou ignitor para fornecer em conjunto com o reator pulsos de tensão para ionizar o caminho da descarga e provocar a partida. Após pequeno tempo estabiliza-se o gás ou vapor e o fluxo luminoso aumenta com o consumo até atingir o valor nominal.

Fabricam-se lâmpadas fluorescentes tubulares com e sem sistema de partida (starter). As lâmpadas com letras RS (partida rápida) acendem quase instantaneamente sem o uso de starter. No tipo partida instantânea , necessita-se a aplicação de alta tensão sobre a lâmpada através de um reator. Produz-se luz por pós fluorescentes ativados pela energia ultravioleta da descarga. Em seu interior têm-se vapor de mercúrio em baixa pressão com pequena quantidade de gás inerte para facilitar a partida. Cobre-se a superfície interna do bulbo com pó fluorescente ou fósforo , cuja composição determina a quantidade e cor da luz emitida.

Encontram-se no mercado vários tipos de lâmpadas fluorescentes econômicas, tais como de potência 16 e 32 W, que substituem as convencionais de 20 e 40 W, que quanto aplicadas com reatores adequados podem reduzir o consumo em até 20% com mesmo nível de iluminância.

Quando da substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes compactas deve-se observar os fatores custo, tamanho e complexidade da atividade, considerando-se efeitos no fator de potência e distorção harmônica de corrente. Este trabalho conhecido como “retrofit” em sistemas de iluminação é abordado com soluções de correção passiva e ativa em [Verderber 93].

Aplicam-se em ambientes em que se deseja um ambiente agradável como residências, hotéis , teatros e outros , a lâmpada PL compacta. Sua base possui dois tubos finos soldados um ao outro com starter incorporado a base. Seu consumo é bem menor que as lâmpadas incandescentes , mantendo as boas características de cor.

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

Na tabela 4.1 , apresenta-se alguns valores típicos de lâmpadas fluorescentes [Yamachita 98].

Tabela 4.1 – Valores médios típicos para lâmpadas fluorescentes em 127V

TIPO DE LÂMPADA FLUORESCENTE	POTÊNCIA (W)	FLUXO LUMINOSO (lm)	VIDA MÉDIA (h)
CONVENCIONAL	15	850	7.500
	20	1.060	7.500
	30	2.000	7.500
	40	2.700	7.500
ECONÔMICA	16	1.020	10.000
	32	2.500	10.000
ECONÔMICA (HO)	60	3.850	12.000
	85	5.900	12.000
	110	8.200	12.000
ECONÔMICA COMPACTA	5	250	8.000
	7	400	8.000
	9	600	8.000
	11	900	8.000
	13	900	8.000

Na categoria das lâmpadas de alta pressão têm-se: a lâmpada a vapor de mercúrio com aparência branca-azulada. Liga-se como dispositivo de controle somente um reator. Sua ignição é obtida por um eletrodo auxiliar montado ao lado do eletrodo principal, porém com um resistor conectando-os.

Lâmpadas a vapor metálico possuem aditivos de iodeto como : índio, tálio e sódio. Aplicam-se principalmente na iluminação de áreas esportivas e centros de cidades.

Lâmpadas de luz mista consiste de um bulbo preenchido com gás, revestido na parede interna com fósforo, com um tubo de descarga ligado em série com um filamento de tungstênio. Converte-se a radiação ultravioleta da descarga de mercúrio em radiação visível pela camada de fósforo, somando-se a esta a radiação visível do próprio tubo de descarga e a luz de cor quente do filamento incandescente. Esta mistura forma uma cor branca difusa com aparência agradável. Não se necessita utilizar reator e são

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

conectadas diretamente a rede de alimentação, podendo substituir facilmente as lâmpadas incandescentes com aproximadamente duas vezes mais eficiência e quase seis vezes maior vida útil.

Lâmpadas de sódio de alta pressão possuem um excesso de sódio para possibilitar a saturação do vapor quando a lâmpada esta em funcionamento e permitir a absorção interna na superfície . Inclui-se também o mercúrio como gás de proteção e o xenon sob baixa pressão para facilitar a ignição . Existem tipo especiais como a SON-H da PHILIPS que são alternativas a lâmpada vapor de mercúrio com menor consumo (redução em torno de 15%) e maior fluxo luminoso (aumento em torno de 25%). Aplicam-se principalmente em iluminações externas e iluminação industrial de grande altura, mas não devem ser instaladas em redes sujeitas a queda de tensão superior a 5%.

Continuam desenvolvendo-se pesquisas para aumento constante da eficiência de todos os tipos de lâmpadas. Sabe-se que a eficiência máxima teórica de uma lâmpada vapor de sódio baixa pressão (toda energia elétrica convertida em radiação visível) é aproximadamente 520 lm/W. Sendo que o valor correspondente de uma lâmpada para reprodução de uma cor ótima é de 230 lm/W. Na prática não se obtêm valores maiores que 40% do teórico, visto que 60% da energia consumida é usada para manter a temperatura do gás da descarga.

Ilustram-se nas tabelas 4.2 a relação do rendimento luminoso das tecnologias de lâmpadas disponíveis no mercado e na tabela 4.3 as alternativas energeticamente mais eficientes nas possíveis situações de substituição de lâmpadas. [Padilla 98]

Tabela 4.2 – Rendimento luminoso por tipo de lâmpada

Tipo de lâmpada	Rendimento Luminoso
Incandescente (Inc)	10 a 15 lm/W
Halógenas	15 a 25 lm/W
Mista (Mis)	20 a 35 lm/W
Vapor de Mercúrio (Vmer)	45 a 55 lm/W
Fluorescente comum (Fluo)	55 a 75 lm/W
Fluorescente compacta	50 a 80 lm/W
Multivapores metálicos	65 a 90 lm/W
Fluorescentes econômicas	75 a 90 lm/W
Vapor de sódio alta pressão (Vsod)	80 a 140 lm/W
Vapor de sódio baixa pressão (Vsod)	160 a 190 lm/W

Tabela 4.3 – Ganhos com lâmpadas alternativas

Existente	Alternativa	Lumens	Watts
Inc. 200W	Vmer 80W	+650 (22%)	-109 (54,5%)
Inc. 200W	Mis 160W	+50 (1,7%)	-40 (20%)
Inc. 300W	Mis 250W	+750 (15,8%)	-50 (16,7%)
Mis 160W	Vsod 70W	2.800 (93,3%)	-77 (48,1%)
Mis 160W	Vmer 80W	+600 (20%)	-69 (43,1%)
Mis 250W	Vsod 70W	+300 (5,4%)	-167 (66,8%)
Mis 250W	Vmer 125W	+500 (9,1%)	-110 (44%)
Mis 500W	Vmer 250W	-900(-6,7%)	-220(44%)
Vmer 80W	Vsod 70W	2.200(61,1%)	-8(8,8%)
Vmer 125W	Vsod 70W	-200(3,3%)	-57(40,7%)
Vmer 250W	Vsod 150W	+900(7,1%)	-97(35,8%)
Vmer 250W	Vsod 220W	+5.400(42,9%)	-36(13,5%)
Vmer 400W	Vsod 250W	+3.000 (13,6%)	-144(34%)
Vmer 400W	Vsod 300W	+12.500 (56,8%)	-48(11,3%)
Fluo 40W-S	Fluo 36W21	+650(24%)	-4(10%)
Fluo 40W-PR	Fluo 34W	+150 (5%)	-6(15%)
Fluo 40W –PR	Fluo 34W21	+200(7,4%)	-6(15%)

IV.4 – COMPARAÇÃO DE REATORES PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES

Aplicam-se reatores em lâmpadas de descarga para controle ou estabilização da corrente. Como características devem possuir:

- Fator de potência elevado.
- Baixa porcentagem de harmônicas de corrente
- Alta impedância para áudio-frequência
- Suprimir interferências de rádio, causadas pela lâmpada
- Produzir as condições para ignição da lâmpada

Considerando-se o ponto de vista do usuário , devem ainda possuir :

- Pequeno tamanho

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

- Perdas próximas de zero
- Vida útil elevada
- Baixo nível de ruído

Pode-se utilizar reatores com uma simples indutância, onde temos fator de potência menores que 0,5 , ou associa-lo em paralelo a capacitores atingindo até 0,85 ou mais.

Utilizam-se para lâmpadas fluorescentes reatores de corrente alternada ou corrente contínua. Os reatores para corrente alternada subdividem-se em aqueles aplicados a lâmpada com starter e aqueles aplicados a lâmpada sem starter.

Utilizam-se "starters" para lâmpadas fluorescentes e ignitores para lâmpadas vapor de sódio e vapor metálico para elevar a tensão para iniciar a descarga.

No sistema sem starter têm-se o reator com capacitor em série e transformador de baixa tensão para pré-aquecer os eletrodos da lâmpada ou reator de semi ressonância (onde obtêm-se fatores de potência em torno de 0,95).

Restringe-se a utilização de lâmpadas fluorescentes operadas por corrente contínua por estabilizador de resistência. Aplicam-se normalmente reatores transistorizados que convertem corrente contínua em corrente alternada (20 kHz ou mais). É um reator silencioso e eficiente, utiliza-se principalmente em veículos como ônibus, trens , aviões e em iluminações de emergência.

Deve-se comentar que os starters convencionais podem ser substituídos por reatores híbridos. O princípio baseia-se que no instante da partida a lâmpada se acende e o dispositivo se desliga automaticamente, reduzindo-se as perdas e aumentando-se a vida útil do mesmo.

Para lâmpadas fluorescentes têm-se um rendimento superior quando opera-se com frequência elevada (em torno de 30 kHz). Obtêm-se maior eficiência lumens/watt com circuitos osciladores de alta frequência, acoplando-se filtros para reduzir harmônicos e também eliminar interferências eletromagnéticas da rede.

A seguir analisa-se uma das práticas comumente adotadas em projetos de conservação de energia que é a substituição de lâmpadas de 40 W por lâmpadas de 32 W, substituindo-se também os reatores. Comparam-se os consumos obtidos nesta prática, visto ganhos possíveis com a correta escolha dos reatores .

Caso A) Circuito com 2 lâmpadas de 40 W com reator de baixo fator de potência

Caso B) Circuito com 2 lâmpadas de 32 W com reator de fator de potência maior que 0,9

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

Caso C) Circuito com 2 lâmpadas de 32 W com reator de fator de potência maior que 0,99 e Distorção Harmônica Total (THD) menor que 10%.

A tabela 4.4 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 4.4 – Tabela comparativa de consumos

Caso	kW	kVA	kVAr	f.p.
A	0,096	0,222	0,201	0,43
B	0,067	0,070	0,009	0,94
C	0,063	0,064	0,005	0,99

Nas figuras 4.1 , 4.2 e 4.3 , ilustram-se as formas de onda de corrente para os três casos, respectivamente (A,B e C).

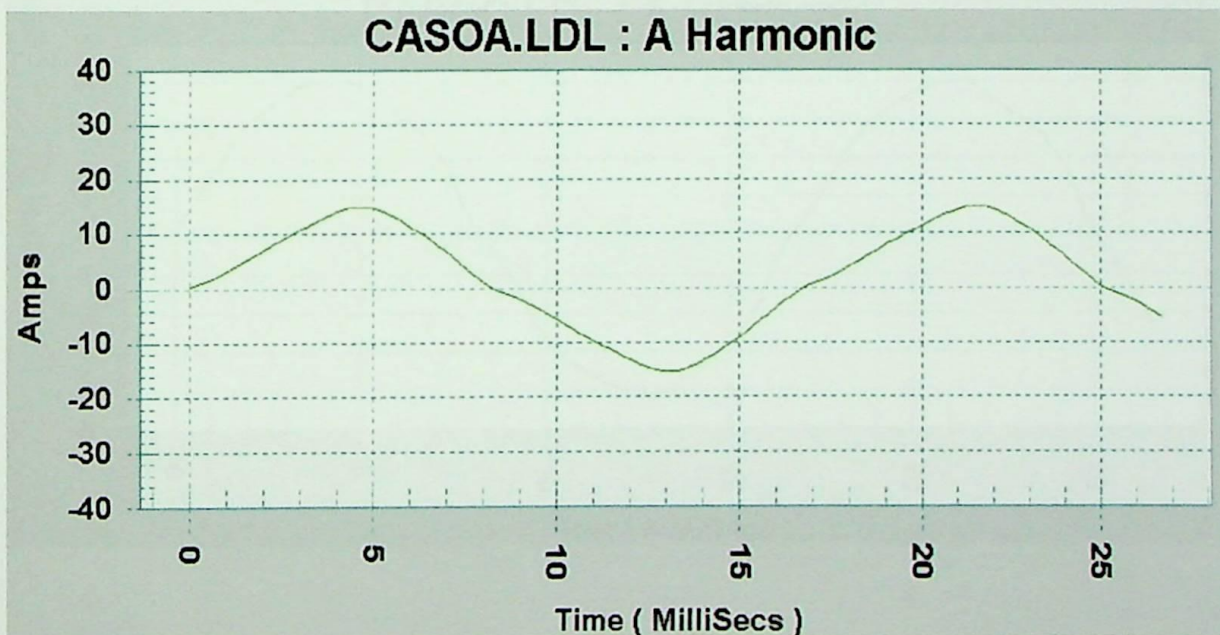


Figura 4.1 – Forma de Onda Corrente - Caso A

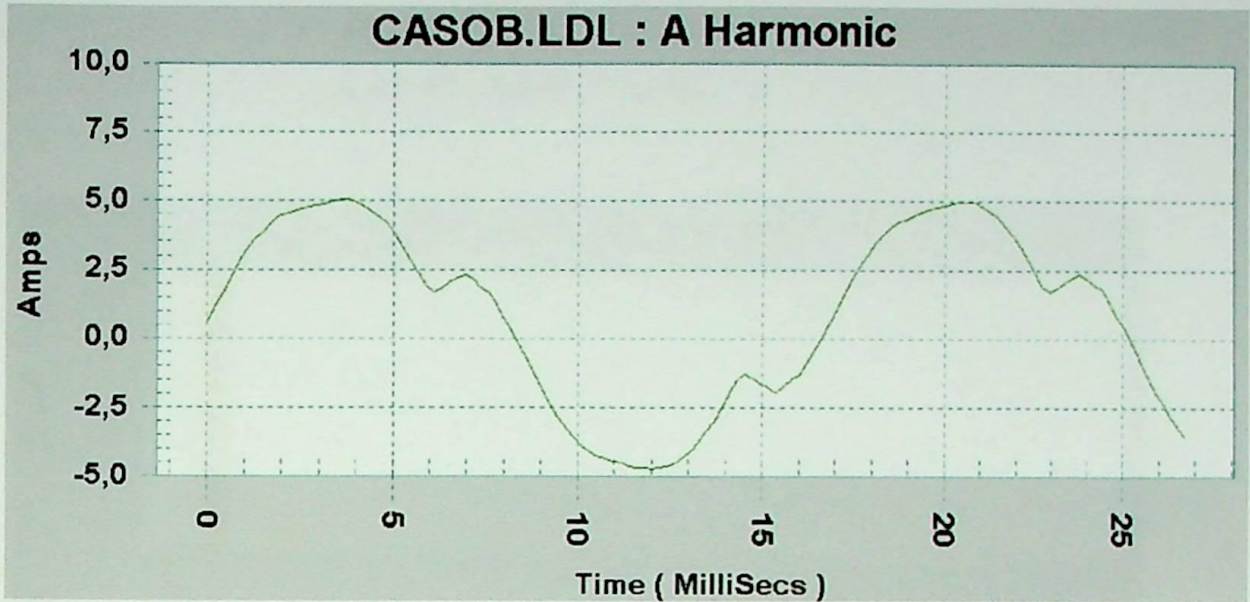


Figura 4.2 – Forma de Onda Corrente - Caso B

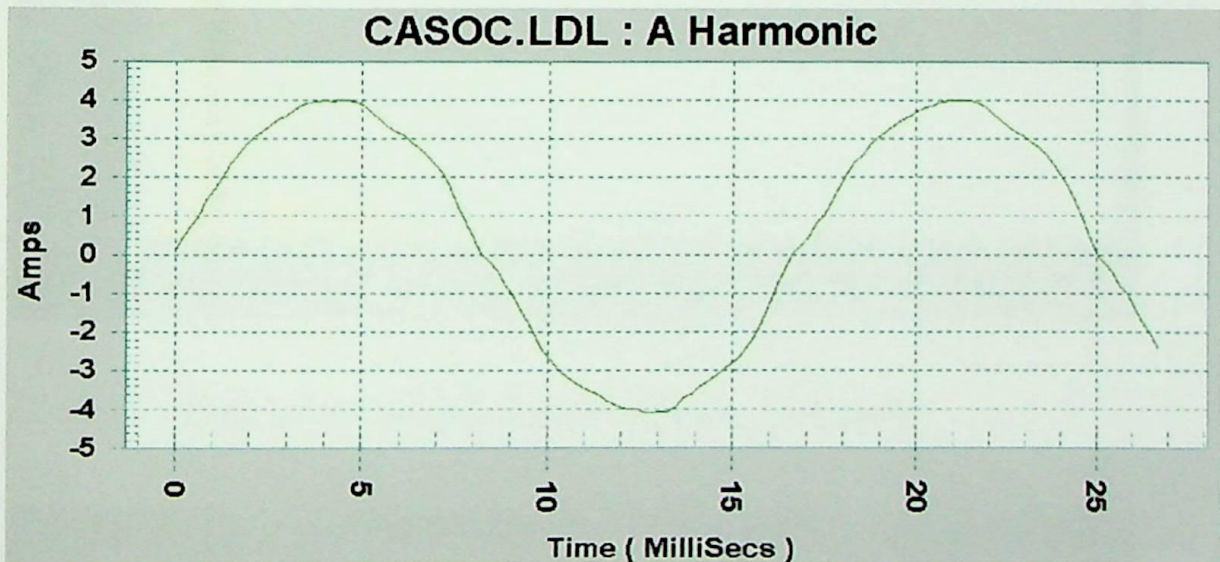


Figura 4.3 – Forma de Onda Corrente - Caso C

Analisou-se também o conteúdo harmônico das correntes, como ilustrado nas figuras 4.4, 4.5 e 4,6 , encontrando-se os seguintes valores através de medições com alicate volt-amperimétrico :

Caso A - THD% = 11,3%

Caso B - THD% = 18,4%

Caso C - THD% = 4,5%

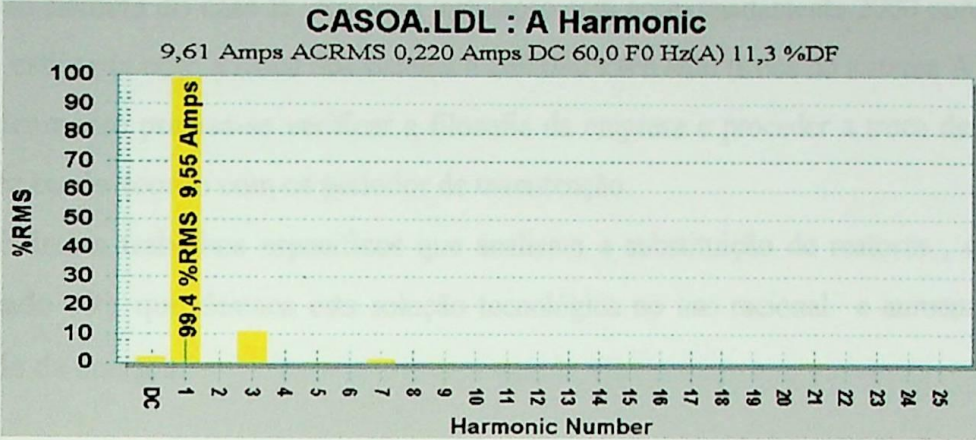


Figura 4.4 – Distribuição de Harmônicos - Caso A

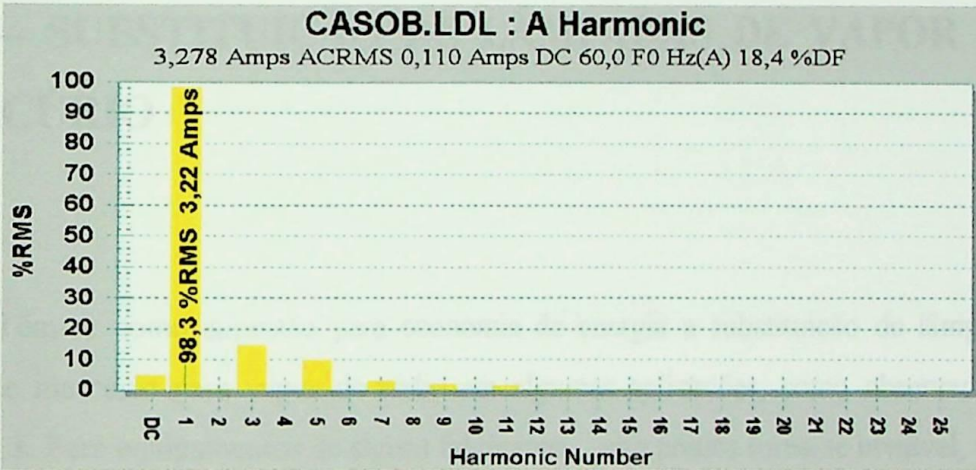


Figura 4.5 – Distribuição de Harmônicos -Caso B

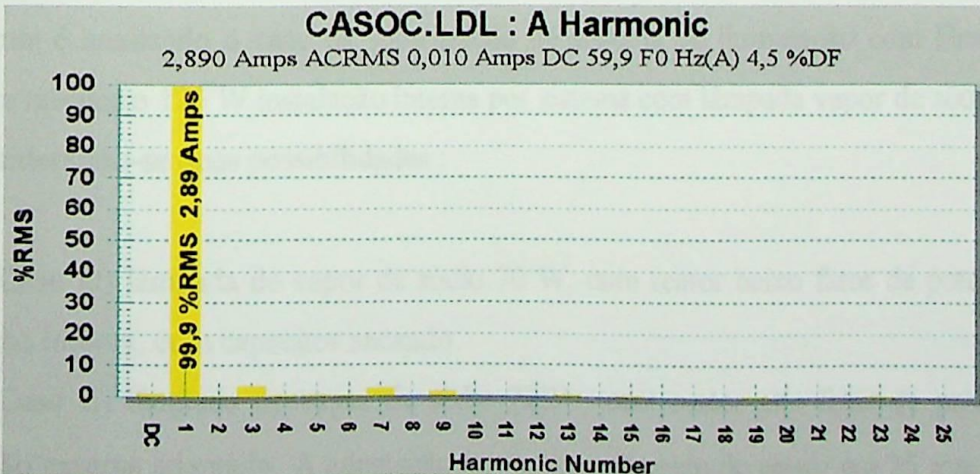


Figura 4.6 – Distribuição de Harmônicos - Caso C

Observa-se pelos dados obtidos que por luminária com 2 lâmpadas de vida útil estimada de 5 anos, trabalhando 12 horas por dia, montando-se o sistema do caso C pode-se obter um ganho de 722,7 kW comparado ao sistema do caso A e 87,6 kW em relação ao sistema do caso B. Em uma instalação com aproximadamente 2000 pontos a redução estimada com a troca dos sistema é 289.080 kWh /ano (troca do sistema A pelo C). Logicamente precisa-se verificar a filosofia da empresa e proceder a troca de uma única vez ou de acordo com os períodos de manutenção.

Existem trabalhos específicos que analisam a substituição de reatores, como [Bronzeado 99], que destaca esta solução tecnológica no uso racional e aumento da qualidade da energia.

IV.5 – SUBSTITUIÇÃO DE LÂMPADAS DE VAPOR DE MERCÚRIO

Têm-se como sugestão para economia de energia a substituição de lâmpadas vapor de mercúrio para vapor de sódio em algumas aplicações, como observado na tabela 4.3. Para equipamentos de alguns fabricantes, esta prática torna-se inviável, visto o baixo fator de potência de reatores para lâmpadas vapor de sódio para instalação interna, apesar dos ganhos obtidos com rendimento luminoso e potência consumida. A melhor maneira é adaptar-se reatores de alto fator de potência quando da aplicação desta. A seguir é analisado o caso da substituição de sistema de iluminação com lâmpada vapor de mercúrio 125 W instalação interna por sistema com lâmpada vapor de sódio 70 W, considerando-se duas possibilidades:

Caso D) lâmpada de vapor de sódio 70 W, com reator baixo fator de potência, instalação interna, com capacitor anexado.

Caso E) lâmpada de vapor de sódio 70W, com reator alto fator de potência instalação externa adaptado. A adaptação foi no comprimento do reator em 25 mm para possibilitar montagem dentro da luminária.

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

No quadro abaixo mostra-se a comparação de temperaturas na lâmpada e na carcaça da luminária , após um funcionamento de 12 horas.

	Vapor mercúrio	Vapor Sódio	Vapor Sódio Adaptada
Temp. ambiente °C	23	21	21
Temp. Carcaça °C	44	30	38
Temp. Lâmpada °C	78	40	57

Na tabela 4.5 se comparam os consumos nos dois casos.

Tabela 4.5 – Comparação de consumos

Caso	kW	kVA	kVAr	f.p.
D	0,421	0,51	0,288	0,825
E	0,426	0,49	0,258	0,855

As figuras 4.7 e 4.8 ilustram o espectro da corrente para o caso D com THD = 34,3% e caso E com THD = 45,4%.

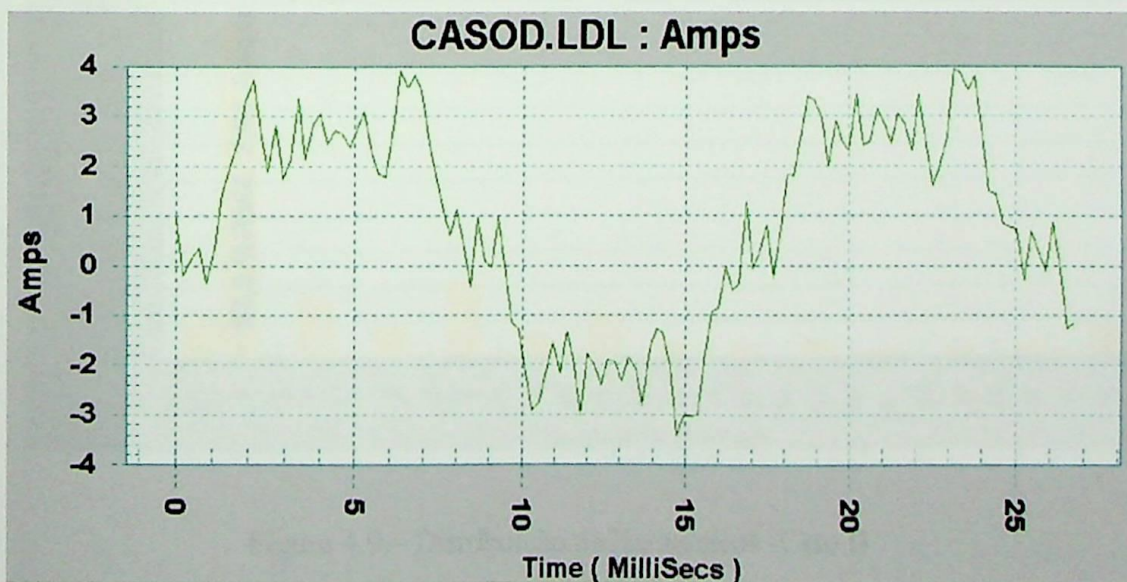


Figura 4.7 – Forma de Onda Corrente - Caso D

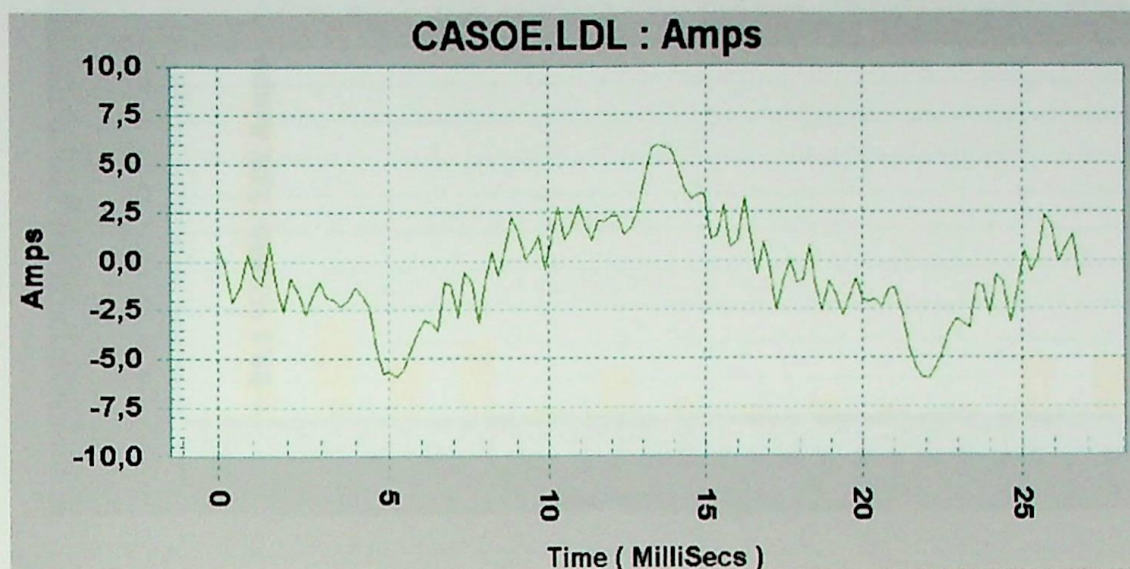


Figura 4.8 – Forma de Onda Corrente - Caso E

Observa-se que apesar do conteúdo harmônico maior no caso E, existe vantagens em se aplicar o reator adaptado. Numa instalação com 300 lâmpadas adaptadas com 12 horas de funcionamento/dia, têm-se uma redução de consumo de 6.570 kWh/ano. Ilustra-se a seguir nas figuras 4.9 e 4.10 o conteúdo harmônico das correntes.

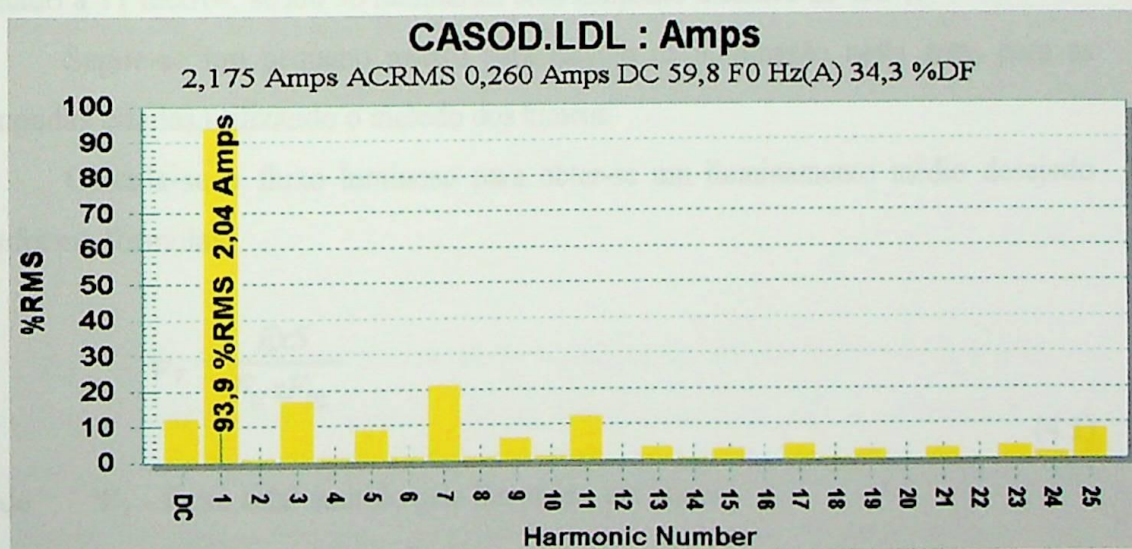


Figura 4.9 – Distribuição de Harmônicos -Caso D

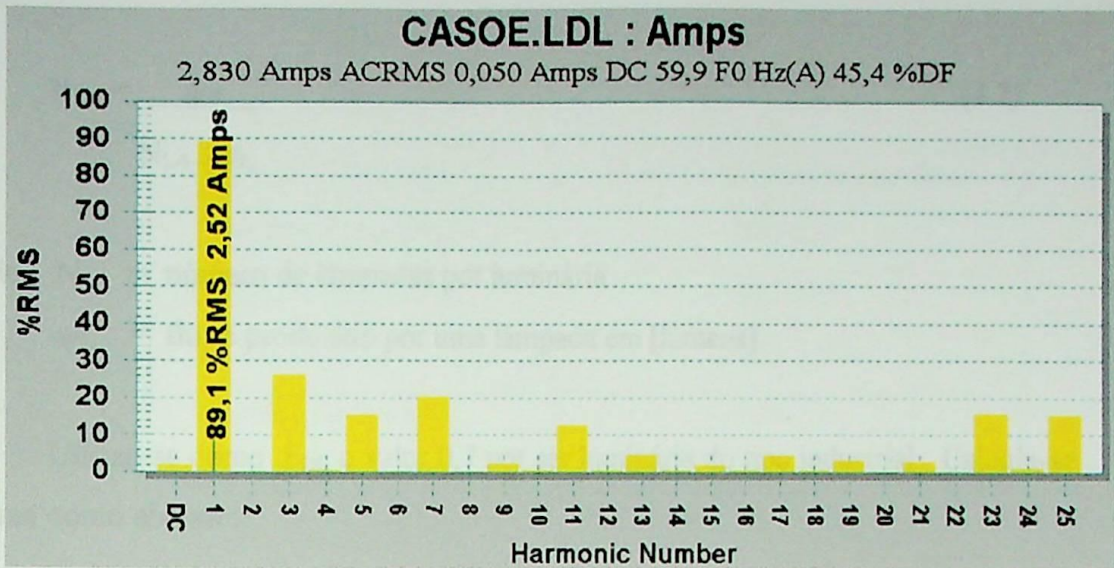


Figura 4.10 – Distribuição de Harmônicos - Caso E

IV.6 – REBAIXAMENTO DE LUMINÁRIAS

Apresenta-se o caso de iluminação em uma área de oficinas divididas em partes : Oficina Mecânica com tornos (parte A), oficina de empilhadeiras (parte B), oficina para limpeza de peças e área de circulação. A iluminação esta distribuída na estrutura do telhado a 11 metros, sendo 36 luminárias com lâmpadas metálico de 400 W .

Segue-se um pequeno roteiro para cálculo da iluminação nesta área, para as lâmpadas citadas,utilizando o método dos lumens.

Calcula-se o fluxo luminoso para obter-se um iluminamento médio desejado conforme fórmulas :

$$\Psi_T = \frac{E \times S}{F_U \times F_{DL}} \tag{4.1}$$

- onde :
- Ψ_T - fluxo total emitido pela lâmpadas, em lumens
 - E - iluminamento médio requerido pelo ambiente , em lux
 - S - área em m²
 - F_{DL} - fator de depreciação do serviço da luminária
 - F_U - fator de utilização do recinto

O número de luminárias N_{LU} é calculado por:

Capítulo IV - Trabalhos de Luminotécnica

$$N_{LU} = \frac{\Psi_T}{N_{LA} \cdot \Psi_L} \quad (4.2)$$

Onde : N_{LA} = número de lâmpadas por luminária

Ψ_L = fluxo produzido por uma lâmpada em [lúmens]

Utiliza-se como F_{DL} o valor 0,7 por ser luminária do tipo industrial . Calcula-se as área como abaixo :

$$Empilhadeira = 26 \times 20 = 520m^2$$

$$Oficina = \frac{34 \times 20}{60 \times 20} = 1200m^2$$

Considera-se no cálculo de fator de utilização os seguintes índices :

- a) Teto - claro : $\rho_{TE} = 0,5 = 50\%$
- b) Paredes - clara : $\rho_{PA} = 0,5 = 50\%$
- c) Piso - escuro : $\rho_{PI} = 0,1 = 10\%$

Determina-se o índice de recinto K por :

$$K = \frac{A \times B}{H_{LP} \times (A + B)} \quad (4.3)$$

Obtendo-se por consulta na tabela específica da luminária $F_U = 0,52$ e adota-se como valor médio para a área de oficinas iluminação de 500 lux, atendendo-se a especificação da tabela 4.6 [Mamede 88] , têm-se o nível de iluminação em lux para indústrias mecânicas em geral , considerada na avaliação do rebaixamento como equivalente as oficinas de manutenção.

Tabela 4.6 – Nível de Iluminamento

Tipo de Atividade	Nível de Iluminamento (lux)
Trabalhos pesados	500-250
Máquinas operatrizes	500-250
Trabalho fino	2.000-1.000
Trabalho de precisão	500-250

Considera-se para cálculo o valor do fluxo para lâmpada vapor de sódio 400 W sendo em torno de 46.000 lúmens , têm-se o cálculo de Ψ_T e N_{LU} como segue :

$$\Psi_T = \frac{500 \times 1200}{0,52 \times 0,7} = 164835 \text{ lumens} \qquad N_{LU} = \frac{\Psi_T}{N_{L1} \times \psi_L} = \frac{1648351}{1 \times 46000} = 35,83 \text{ lumens}$$

Utilizou-se o rebaixamento das luminárias nesta área para 9 metros e utilização de 16 lâmpadas vapor metálico de 250 W, nas áreas de circulação e lavagem de peças , mantendo-se 400 W na área de tornos e manutenção de empilhadeira, como segue:

$$K = \frac{1200}{9 \times 80} = 1,66 \qquad \Psi_T = \frac{500 \times 1200}{0,55 \times 0,7} = 1558441,55 \text{ lumens}$$

Considera-se como novo valor de F_U 0,55 e do fluxo para lâmpada vapor de sódio 250 W em torno de 25.000 lúmens. Instalaram-se ainda interruptores nos acessos as quatro áreas, dividindo os circuitos por setor . Como resultado têm-se a redução de consumo da área de 5.184 kWh/mês para 4.320 kWh/mês , no ano têm-se uma economia em torno de 10.368 kWh , equivalente a 16%.

Capítulo V

Motores de Alto Rendimento - Aplicações



V.1 - INTRODUÇÃO

Analisa-se uma planta com quatro anos de funcionamento , com expectativa de vida útil de seus motores ser elevada, visto serem motores novos e as tensões de alimentação estáveis, devido ao sistema de alimentação ter como base uma central de cogeração. Mas, existem casos em que é necessário se avaliar a aplicação de alguns motores e verificar a viabilidade de sua substituição ou a aplicação de reservas de alto rendimento.

V.2 – TECNOLOGIA DO MOTOR DE ALTO RENDIMENTO

Os fabricantes de motores de alto rendimento se concentraram em desenvolver tecnologias para reduzir as perdas no motor elétrico. Desta forma, analisa-se a seguir como se distribuem as perdas em um motor de indução trifásico (MIT).

Os motores elétricos são construídos de diversos materiais e contêm partes fixas e móveis, que quando em funcionamento se aquecem e este aquecimento não deve ultrapassar as temperaturas definidas pela classe de isolamento do motor, segundo [ABNT NBR7094].

O projetista da máquina deve analisar durante sua construção, o comportamento das temperaturas em seu interior. Sabe-se que para elevar a temperatura de uma parcela $\Delta\tau$, precisa-se de uma quantidade de energia ΔQ_1 , conforme equação :

$$\Delta Q_1 = c.\Delta\tau \tag{5.1}$$

Onde : c – calor específico do material

Se a máquina estiver com temperatura τ acima da temperatura ambiente τ_0 , a quantidade de calor transferida ao ambiente será :

$$\Delta Q_2 = A.\tau.\Delta t \tag{5.2}$$

Onde : A - fator de transmissão de calor ao ambiente

Em um intervalo de tempo Δt , tem-se uma potência de perdas V :

$$V.\Delta t = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 \tag{5.3}$$

E em intervalos infinitesimais de temperatura e tempo

$$V.dt = C.d\tau + A.\tau.d\tau \tag{5.4}$$

que resulta

$$\frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{V}{A} \tag{5.5}$$

Resolvendo-se esta equação têm-se :

$$\tau = \tau_f \left(1 - e^{-\frac{t}{T_A}}\right) \tag{5.6}$$

onde : τ - temperatura da máquina no instante t

τ_f - temperatura da máquina para um tempo bastante grande

T_A - constante de tempo de aquecimento da máquina

Apresenta-se na tabela 5.1 os limites de elevação de temperatura permitidos.

Tabela 5.1 – Limites de Elevação de Temperatura

COMPOSIÇÃO DOS LIMITES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM °C					
CLASSE DE ISOLAMENTO	A	E	B	F	H
TEMPERATURA AMBIENTE	40	40	40	40	40
TEMP. MÁX. DE OPERAÇÃO Δt	60	75	80	100	125
DIFERENÇA ENTRE O PONTO MAIS QUENTE E A CARÇAÇA	5	5	10	15	15
TEMPERATURA MÁXIMA SUPORTADA PELO ISOLAMENTO	105	120	130	155	180

Destas expressões obtém-se ainda :

$$\tau_f = \frac{V}{A} \quad (5.7)$$

e

$$T_A = \frac{C}{A} \quad (5.8)$$

Pelo equacionamento observa-se que a temperatura alcançada pela máquina depende então basicamente de :

- potência de perdas
- tempo de funcionamento
- condições do ambiente

Assim, representa-se o fluxo de potência no MIT como se segue :

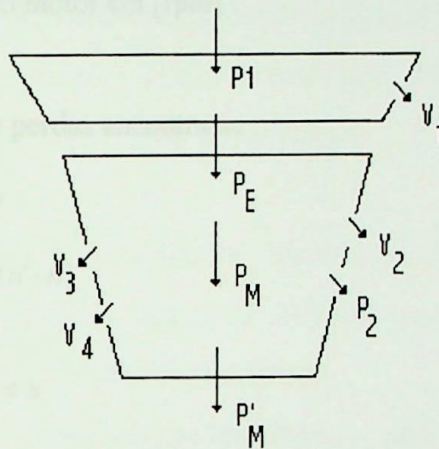


Figura 5.1 – Fluxo de Potência no Motor de Indução Trifásico

P_1 - potência absorvida da rede

V_1 - perdas no estator

P_E - potência transferida do estator para o rotor pelo entreferro

V_2 - perdas no circuito interno do rotor

P_2 - perdas no circuito externo do rotor (rotor bobinado ou de anéis)

P_M - potência mecânica

V_3 - perdas por atrito e ventilação

V_4 - perdas suplementares (efeito pelicular , harmônico, etc.)

P'_M - potência mecânica disponível no eixo da máquina

Equaciona-se P_E como :

$$P_E = \frac{2\pi}{60} n' M \tag{5.9}$$

onde : n' – velocidade do campo girante em [rpm]

M – conjugado nominal em [N.m]

e potência mecânica como :

$$P_M = \frac{2\pi}{60} n M \tag{5.10}$$

sendo : n – velocidade do motor em [rpm]

Analisando-se o fluxo de perdas encontra-se :

$$P_2 + V_2 = P_E + P_M$$
$$P_2 + V_2 = \frac{2\pi M}{60} (n' - n) \tag{5.11}$$

$$\frac{P_2 + V_2}{P_E} = \frac{(n' - n)}{n'} = s \tag{5.12}$$

onde s = escorregamento

$$\text{ou } P_2 + V_2 = s P_E \tag{5.13}$$

Percebe-se que as perdas no circuito do rotor dependem do escorregamento e da potência transferida no entreferro, como o MIT opera com escorregamento variável, estas perdas dependem do comportamento da carga em função da velocidade.

As perdas a vazio no ferro e por atrito e ventilação, não dependem da carga . Sendo assim, estas deverão ser trabalhadas pelo projetista do MIT para melhorar seu rendimento. Algumas características desenvolvidas no MIT de alto rendimento são :

Chapa Magnética com Baixas Perdas – reduz a corrente magnetizaste e incrementa o rendimento, diminuindo a conhecida Perda por histerese.

Enrolamento em Dupla Camada – proporciona melhor dissipação do calor gerado .

Maior Quantidade de Cobre – reduz perdas suplementares, visto que a corrente absorvida para magnetização do motor será menor.

Distância de Entreferro Menor – reduz as perdas suplementares e aumenta a P_E transferida estator/rotor.

Ventiladores Adequados – garantem o resfriamento da máquina , diminuindo as perdas por atrito e ventilação, mesmo quando da obstrução parcial da passagem de ar .

Anel de Curto e Barras do Rotor melhor Dimensionados_– reduz perdas por aquecimento nos anéis.

Rotor Tratado Termicamente – reduz perdas suplementares, principalmente no momento da partida em que temos uma frequência maior induzida no rotor diminuindo o impacto do efeito pelicular .

Pacote de Silício com Comprimento Maior – reduz perdas suplementares.

Melhor Dimensionamento das Ranhuras do Estator – proporciona um aumento do fator de potência e rendimento, já que teremos uma melhor distribuição do fluxo e conseqüentemente diminuição do efeito de harmônicos

Mediante todos os pontos citados apresenta-se tabela 5.2 comparativa de rendimentos e fatores de potência para motor standard e motores de alto rendimento de dois fabricantes conhecidos no mercado brasileiro.

Deve-se observar não somente os rendimentos , mas também o fator de potência, visto que se a máquina não estiver trabalhando próxima a sua condição nominal este fator é de grande influência . Observa-se na figura 5.2 a curva característica .

Em [Cogo 96], apresenta-se uma metodologia para avaliar as perdas no motor de indução trifásico e como se especificar sua potência de forma correta , reduzindo-se ao máximo o desperdício de energia por mal dimensionamento.

Tabela 5.2 – Comparação de rendimento e fator de potência

POTÊNCIA (CV)	No DE POLOS	CARCAÇA	RENDIMENTO (1)		FATOR DE POTENCIA (1)		RENDIMENTO (2)		FATOR DE POTENCIA(2)	
			STD	AR	STD	AR	STD	AR	STD	AR
1	2	71/80	0,727	0,809	0,83	0,8	0,802	0,86	0,82	0,77
1,5	4	80	0,727	0,795	0,83	0,81	0,777	0,836	0,75	0,68
3	4	90IL	0,793	0,848	0,85	0,84	0,817	0,87	0,83	0,79
5	4	100L/112M	0,835	0,873	0,85	0,85	0,86	0,906	0,77	0,76
7,5	4	112M/132S	0,862	0,89	0,84	0,86	0,88	0,91	0,85	0,78
10	6	132M	0,858	0,901	0,75	0,78	0,855	0,89	0,78	0,77
15	6	160L/M	0,89	0,902	0,8	0,8	0,879	0,913	0,82	0,82
25	4	160L/M	0,901	0,925	0,85	0,87	0,892	0,925	0,9	0,89
30	6	200L	0,922	0,932	0,87	0,89	0,893	0,918	0,94	0,94
50	2	200L	0,922	0,932	0,87	0,89	0,893	0,918	0,94	0,94
75	6	280/250M	0,927	0,944	0,81	0,78	0,919	0,944	0,88	0,88
100	4	250S/M	0,925	0,943	0,87	0,89	0,919	0,945	0,92	0,92

(1) WEG

(2) KOHLBACH

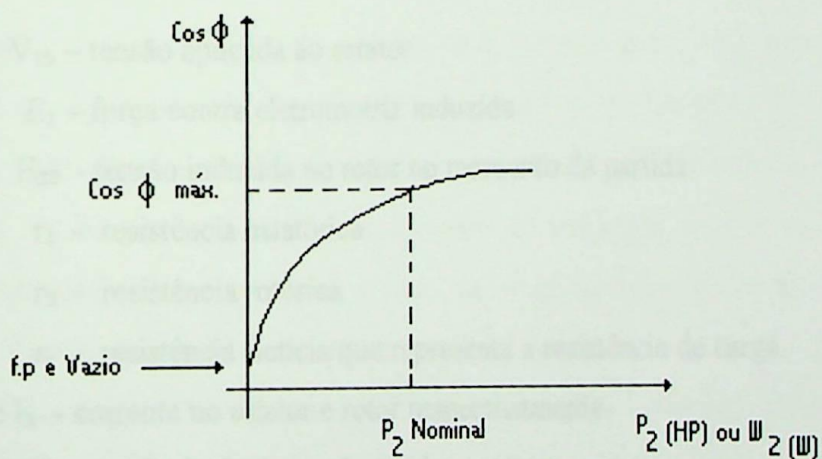


Figura 5.2- Curva Característica $\cos \phi$ x Potência

V.3 – AVALIAÇÃO DE PERDAS USANDO CIRCUITO EQUIVALENTE

Neste item analisa-se o circuito equivalente completo do motor de indução trifásico representado na figura 5.3 , pelo equivalente total a uma fase.

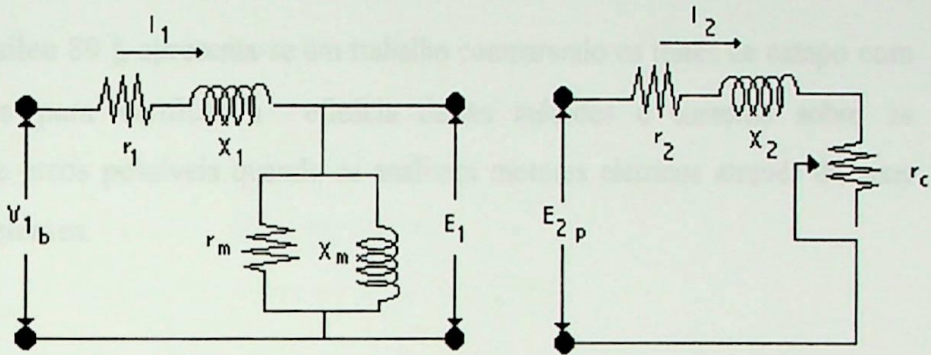


Figura 5.3 – Circuito equivalente completo do MIT

onde : V_{1b} – tensão aplicada ao estator

E_1 - força contra eletromotriz induzida

E_{2p} - tensão induzida no rotor no momento da partida

r_1 - resistência estática

r_2 - resistência rotórica

r_c - resistência fictícia que representa a resistência de carga

I_1 e I_2 - corrente no estator e rotor respectivamente

X_1 - reatância de dispersão bobinas estator

X_2 - reatância no rotor na partida

R_m - resistência que representa as perdas no ferro

X_m - reatância do ramo magnetizante (responsável pelo fluxo)

Pelos dados apresentados no item anterior pode-se afirmar que os motores de alto rendimento apresentam.

V_{0n} menor já que a V_1 e V_3 se reduzem com melhor ventilação e projeto do estator.

P_E maior já que V_2 e P_2 são menores.

P'_M maior já que P_E maior garantido ao fabricante a normalização para um fator de serviço 1,15.

onde : V_{0n} perdas no motor a vazio e em tensão nominal

Lembrando-se que :

$$V_{0N} = V_1 + V_3 + V_{4PARCIAL} \quad (5.14)$$

Em [Nailen 89], apresenta-se um trabalho comparando os testes de campo com vários métodos para verificar a eficácia destes métodos e comenta sobre as aproximações e erros possíveis quando se analisam motores elétricos através de seus circuitos equivalentes.

V.4 - ANÁLISES DE VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE MOTORES DE ALTO RENDIMENTO

A substituição ou aplicação de motores de alto rendimento (AR), esta sujeita a análise do tempo de retorno do investimento. Encontra-se em trabalhos do início da década [Faria Neto 92], avaliações econômicas para substituição de motores elétricos. Na planta em estudo por apresentar pouco tempo de utilização e estar em fase de expansão ou adequação de equipamento, o foco será dado na definição no momento da compra por utilizar motor de alto rendimento ou motor standard.

Em [Silva Neto 99] analisa-se um planta com maior numero de motores e instalação mais antiga, chegando-se as seguintes conclusões:

- Sucatar motores até 40 CV, quando substituídos por motores de alto rendimento;
- Motores de dois e quatro pólos podem ser substituídos dentro dos critérios de retorno de investimento da empresa (tempo de retorno de até 18 meses, $MTIR \geq 15\%$ a . a . , e $VPL \geq 0$), considerando-se os ganhos com economia de energia para potências até 20 CV , inviabilizando-se reparos externos;
- Motores até 20 CV, seis pólos, passam a apresentar vantagens de substituição por motores novos de alto rendimento após o terceiro reparo.

A fórmula para cálculo do tempo de retorno de investimento já é bastante conhecida e esta transcrita abaixo:

$$TR = \frac{\Delta C}{0,736.CV.Nh.CkWh.\left(\frac{100}{\eta_S} - \frac{100}{\eta_{AR}}\right)} \quad (5.15)$$

onde : TR - tempo de retorno de investimento em [anos]

ΔC - diferença entre os custos de aquisição dos motores standard e AR

CV - potência do motor em [CV]

Nh - Numero de horas trabalhos em um ano

CKWh - Custo do kWh (R\$ / kWh)

η_S - rendimento do motor standard

η_{AR} - rendimento do motor de alto rendimento

A seguir apresentam-se alguns casos já estudados.

CASO 1 – Motor de bomba centrifuga de transferência de produto . Serão comparados o motor já existente na montagem da planta com um motor comprado recentemente para expansão. A seguir apresentamos os dados de placa e potência média medida em campo.

Tabela 5.3 – Dados e potência do motor Standard e AR

	MB412001A	MB411010A
carcaça	200M	200M
potência placa [CV]	30	30
rendimento	0,870	0,895
fator de potência	0,880	0,860
Rotação [rpm]	1.770	1.775
potência medida [kW]	24,42	18,99
tipo	“standard”	AR

No exemplo acima calcula-se o tempo de retorno baseado nos valores já medidos depois de instalado e considerando-se o valor do custo de energia em 0,055 R\$/ kWh.

$$TR = \frac{\Delta C}{Nh.CkWh.(P_{AR} - P_S)} = \frac{(850 - 620)}{5840.0,055.(24,42 - 18,89)} = 0,13 \text{anos}$$

CASO 2 – No caso a seguir analisa-se a alternativa mais viável para compra de um motor reserva para a aplicação de uma bomba de água de processo.

Tabela 5.4 – Dados comparativos entre o motor standard e o motor reserva

	MB141001C	RESERVA 1	RESERVA 2
carcaça	112M	112M	112M
potência placa [CV]	7,5	7,5	7,5
rendimento	0,860	0,862	0,890
fator de potência	0,770	0,840	0,860
Rotação [rpm]	1.735	1.730	1.740
potência medida [kW]	4,11		
tipo	"standard"	"standard"	AR
custo		R\$315,00	R\$365,00

$$TR_{RESERVA} = \frac{(365 - 315)}{0,736.7,5.4000.0,055 \left(\frac{100}{0,862} - \frac{100}{0,89} \right)}$$

$$TR_{reserva} = 0,011 \text{ anos}$$

Neste exemplo observa-se que a opção pela compra de um motor reserva de alto rendimento é compensada em relação ao custo de um motor standard em menos de um mês de aplicação. Logicamente, quando da aquisição do motor AR este será instalado imediatamente e para reserva ficaria o motor standard hoje em funcionamento.

V.5 – OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Em [Nailen 97], relata-se que a conservação de energia possível em sistemas elétricos com motores corresponde a aproximadamente 1/3 do potencial possível e pode-se distribuir este potencial na forma ilustrada na figura 5.4.

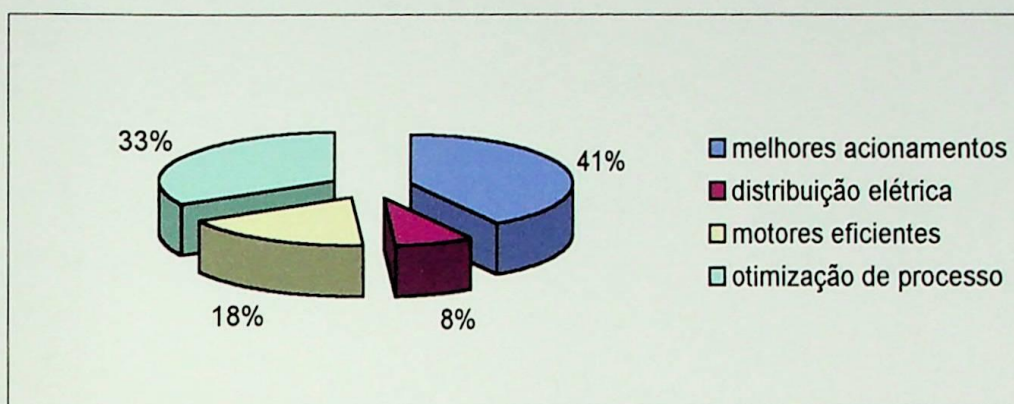


Figura 5.4 – Possíveis fontes de conservação de energia em equipamentos elétricos

Em [Hamer 97], apresenta-se um estudo para uma aplicação em cargas centrífugas e demonstra que o controle por válvulas se não for corretamente empregado pode levar a um aumento considerável nas perdas do motor, devido a um aumento do escorregamento e comenta-se também sobre a aplicação de tensões desbalanceadas nos motores, que podem levar a perdas de eficiência de até 0,5% com 75% de carga.

Apresenta-se em [Bonnett 93], um estudo comparativo entre motores standard e motores de alto rendimento com relação à performance de seus componentes. Conclui-se pelos dados apresentados que o motor de alto rendimento apresenta:

- Temperatura média dos enrolamentos menor;
- Temperatura média na carcaça menor até 100% de carga, em sobrecarga apresenta maior temperatura na carcaça;
- Rotação maior (menor escorregamento) até 45% de carga, depois se equivalendo os dois modelos;
- Temperatura no rotor menor;
- Relação X/R maior praticamente em toda a faixa de carregamento;
- Temperatura nos rolamentos menor até a potência de 60 HP

Baseando-se nestes e em outros dados, demonstra-se que a expectativa de vida de um motor de alto rendimento é maior devido a operação em temperatura menores reduzindo suas perdas.

Capítulo VI

Economia de Energia com
Adequação de Sistemas de
Vapor e Frio

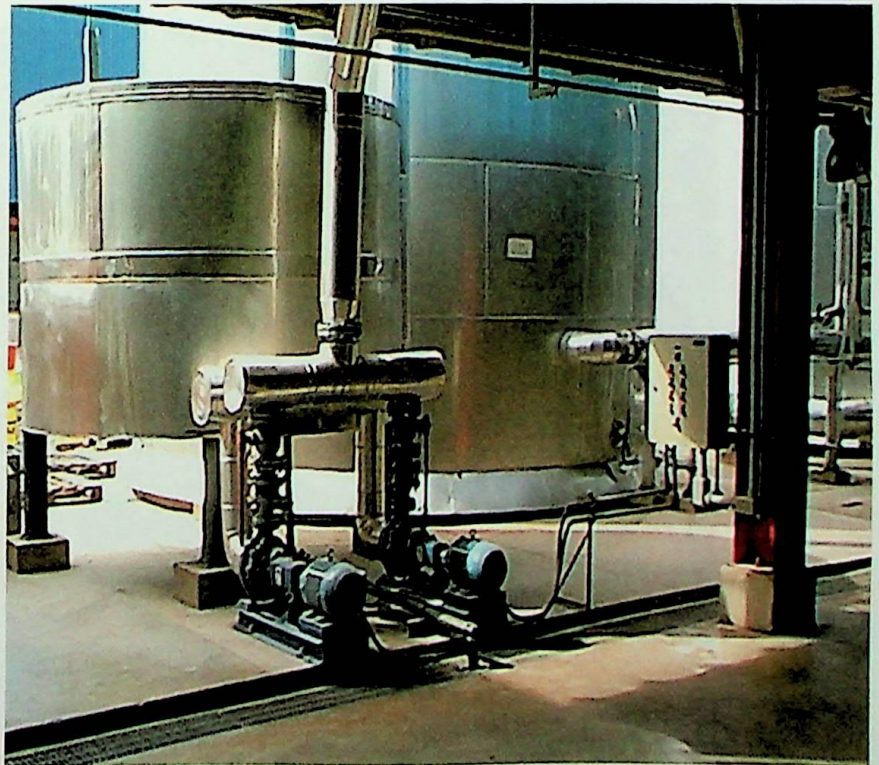


INTRODUÇÃO

Os sistemas de vapor e frio são normalmente os grandes consumidores de um sistema de distribuição de energia. Quando se trata de grandes edifícios ou instalações de colheita, é comum encontrar-se os grandes edifícios ou instalações de colheita. Deve-se avaliar os pontos, como também, critérios de manutenção e recuperação de energia. Além disso, deve-se considerar os pontos de consumo de energia e a recuperação de energia.

Capítulo VI

Economia de Energia com Adequação de Sistemas de Vapor e Frio



VI.1 – INTRODUÇÃO

Avalia-se normalmente os ganhos energéticos de um sistema de distribuição de vapor, monitorando-se os ganhos obtidos no rendimento da caldeira. Deve-se avaliar não somente este ponto, como também, cuidados na manutenção e reaproveitamento de condensado que serão abordados neste capítulo.

Ilustra-se também os ganhos obtidos com a adequação do diâmetro de tubulação no sistema de água gelada.

VI.2 – GERADORES DE VAPOR

Utiliza-se na planta em estudo para geração de vapor, três caldeiras mistas recuperando os gases da turbina, sendo a capacidade nominal de cada unidade de 35 ton/h e uma caldeira aquotubular de 70 ton/h, normalmente operando como “stand-by”. Na figura 6.1, têm-se uma vista da caldeira de recuperação.

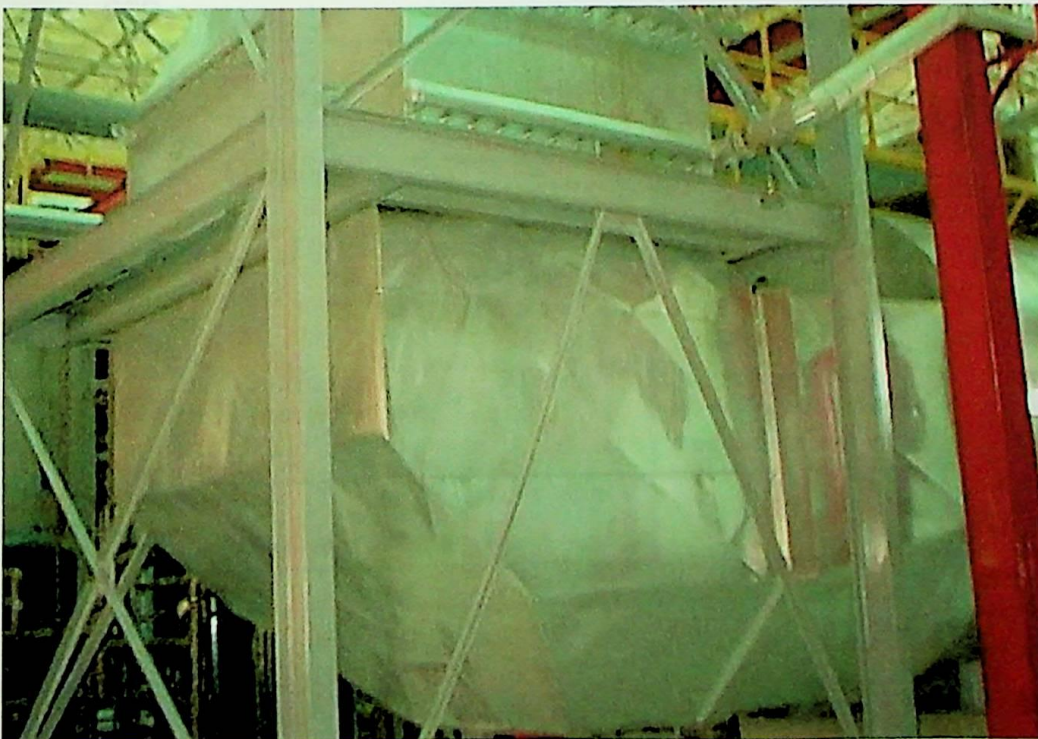


Figura 6.1 – Caldeira de recuperação

Caldeiras flamotubulares são aquelas em que os gases passam no interior de tubos ou serpentinas imersas em água e caldeiras aquotubulares são aquelas em que a água passa em tubos que cercam a região de combustão e passagem dos gases de combustão.

Sabe-se que a troca térmica em uma caldeira ocorre por três formas conhecidas:

- Radiação : o calor se transfere sob a forma de ondas eletromagnéticas. É função da temperatura , da capacidade de emissão do corpo e da superfície visível pelo corpo emissor. Em caldeiras de recuperação somente ocorre se houver queima suplementar;
- Condução : o calor se transfere pela diferença de temperatura entre dois pontos do corpo. A transmissão se dá molécula à molécula, por mecanismos de excitação ou vibração.
- Convecção : o calor se transfere através de um meio fluido em movimento, seja gás ou líquido.

Em caldeiras é necessária a transferência de calor para fornecer energia à água para esta se aquecer, vaporizar e eventualmente superaquecer o vapor gerado. Devem existir áreas de troca específicas para cada fase da geração de vapor. Na figura 6.2 ilustra-se as parcelas de energia necessárias entre fases, conforme pressão.

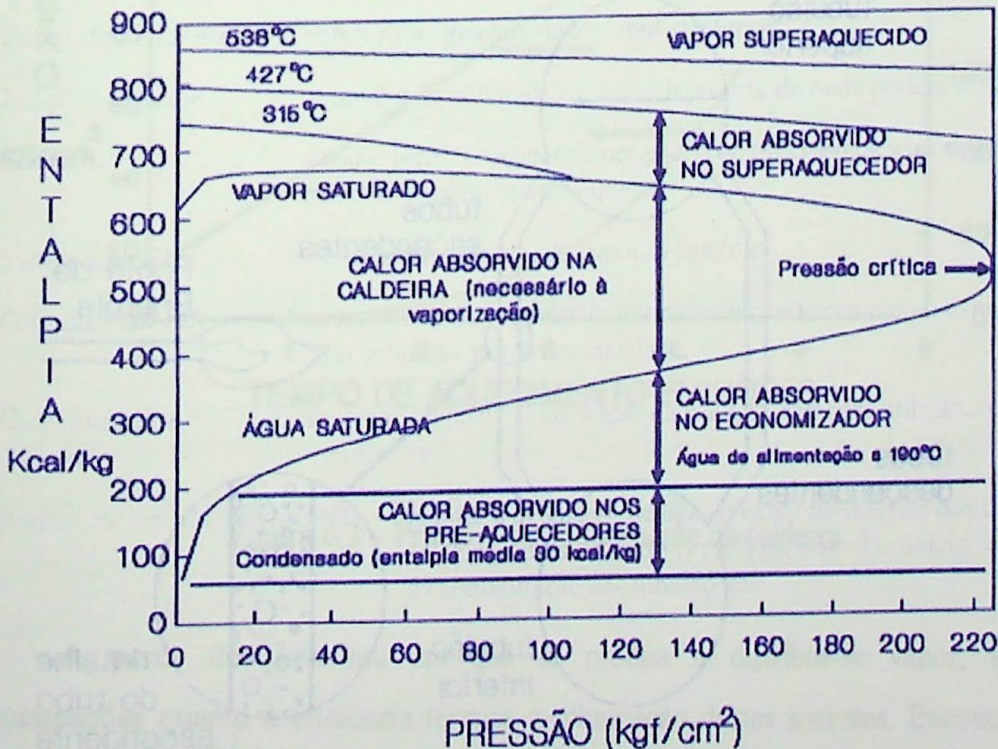


Figura 6.2 – Efeito da pressão em um gerador de vapor

Deve-se cuidar para que a água de alimentação das caldeiras não cause incrustações (causando aumento do consumo de combustível devido aos depósitos de baixa condutividade térmica, provocando baixa transferência de calor), corrosão (que causam paradas no sistema, aumento do custo operacional/manutenção entre outros), formação de espuma e arraste, volatilização da sílica presente na água, corrosão por soda cáustica, fragilização por hidrogênio e corrosão por gases dissolvidos (normalmente oxigênio e gás carbônico).

Para caldeiras de baixa e média pressão utiliza-se como tratamento o controle de fosfatos, alcalinidade, remoção dos gases dissolvidos (por desaeradores), sílica, sólidos totais e o método de extração (purga) em períodos pré-definidos.

O gás natural utilizado como primeiro combustível nas caldeiras em estudo possui a seguinte característica : PCI : 8.641 kcal/m³ a 20 °C.

Na figura 6.3 ilustra-se o processo de aquecimento de uma caldeira.

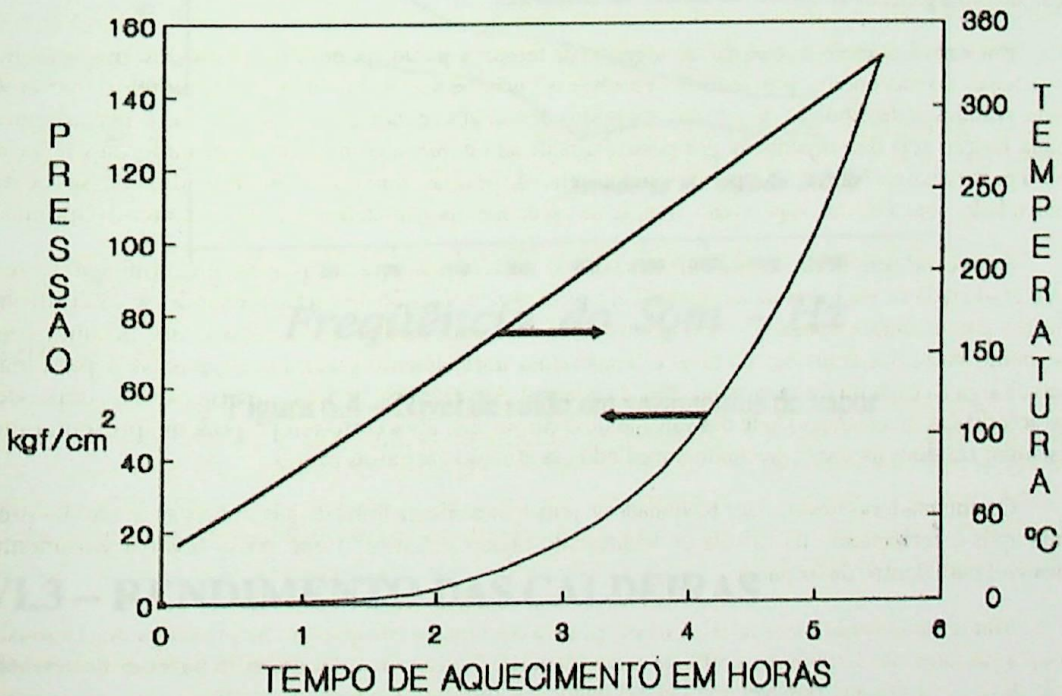


Figura 6.3 – Processo de aquecimento da caldeira

A partir do momento em que se produz e distribui-se vapor, surgem preocupações quanto à eficiência térmica e otimização destes sistemas. Encontram-se muitos problemas com perdas de vapor, nos vazamentos e descartes para a atmosfera pelas válvulas de alívio e outros.

Deve-se atentar que as conseqüências das perdas de vapor não se limitam somente ao consumo de combustível, mas também a perda de água tratada e os problemas relacionados com as condições de trabalho gerados pelo ruído excessivo. Na figura 6.4 ilustra-se a comparação entre diversos níveis de ruído.

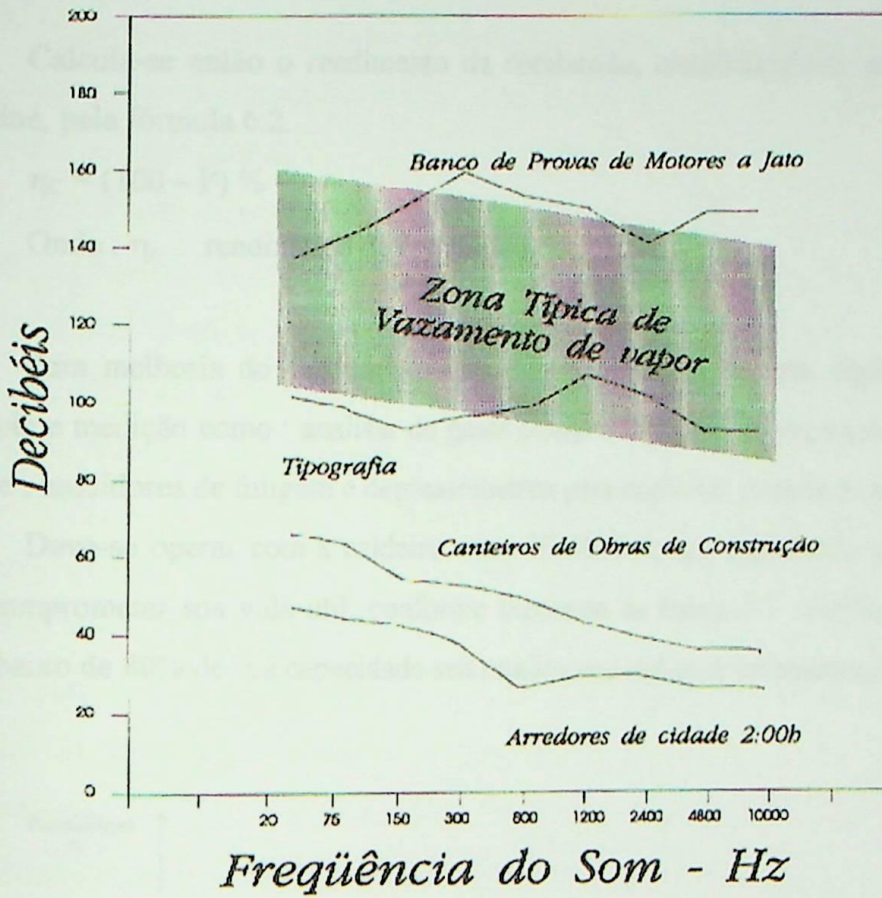


Figura 6.4 – Nível de ruído em vazamentos de vapor

VI.3 – RENDIMENTO DAS CALDEIRAS

Consideram-se as principais perdas do sistema de geração de vapor aquelas provenientes do calor levado pelos gases de combustão para a chaminé das caldeiras. Quantifica-se pela fórmula 6.1, as perdas encontradas na chaminé, segundo a fórmula de Siegert.

$$Perdas = \frac{K(t - t_0)}{\%(\text{CO}_2)} \quad (6.1)$$

onde : Perdas : perdas pela chaminé

t : temperatura dos gases de escape

t₀ : temperatura ambiente

%(CO₂) : porcentagem em volume de CO₂ nos gases de escape

K : coeficiente que depende do combustível, para gás natural : 0,48

Calcula-se então o rendimento da combustão, considerando-se as perdas pela chaminé, pela fórmula 6.2.

$$\eta_c = (100 - P) \% \quad (6.2)$$

Onde : η_c : rendimento da combustão

Para melhoria do rendimento da caldeira, sugere-se instalar equipamentos de controle e medição como : analisador de gases (CO₂ e O₂), termômetros para os gases de escape , medidores de fuligem e depressômetros para controlar entrada de ar.

Deve-se operar com a caldeira entre 80-90% de sua capacidade nominal, para não comprometer sua vida útil, conforme ilustra-se na figura 6.5 .Verifica-se também que abaixo de 80% de sua capacidade seu rendimento reduz-se bruscamente.

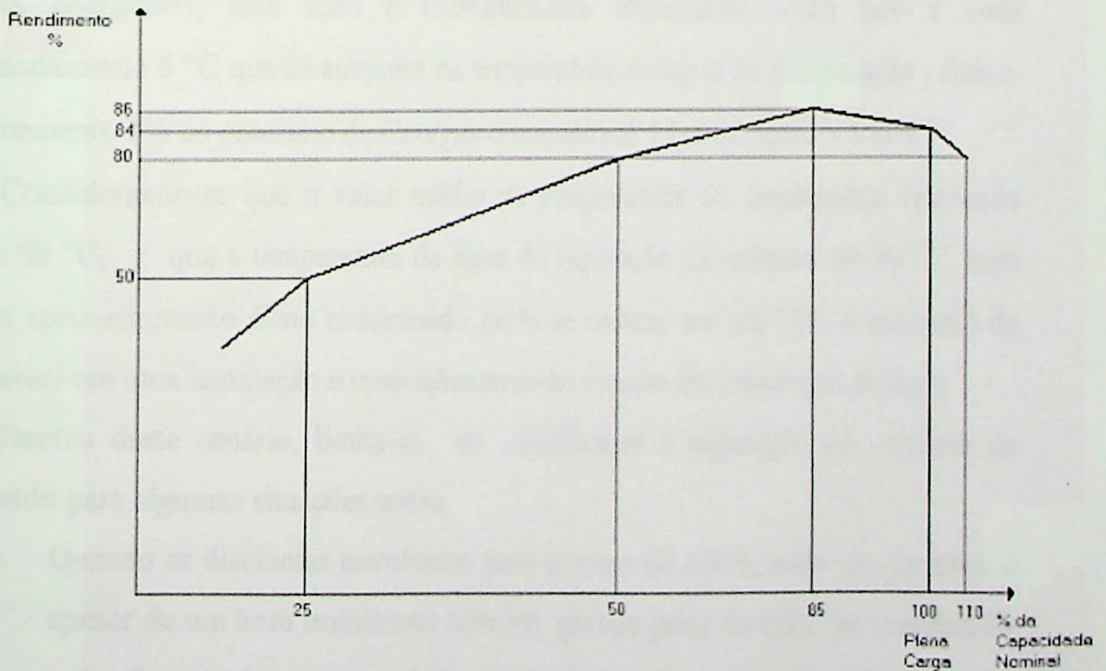


Figura 6.5 – Rendimento da Caldeira em função de sua utilização

VI.4 – OTIMIZANDO A UTILIZAÇÃO DO CONDENSADO

Para geração de vapor , necessita-se inicialmente acrescentar calor sensível para que a água atinja a temperatura de ebulição, temperatura esta que varia com a pressão de operação da caldeira.

Quando atinge-se o ponto de ebulição, qualquer acréscimo na temperatura da água, altera suas propriedades físicas , transformando-a em vapor. Denomina-se este acréscimo de calor latente.

Em grande parte das plantas industriais, quando o vapor cede calor ao processo, utiliza-se somente o calor latente antes que este se condense. Desta forma, o condensado eliminado nos diversos equipamentos, por exemplo: tinas de cozimento, trocadores de calor, contém uma grande quantidade de calor que foi acrescida a água quando da queima do combustível na caldeira.

A água contida no condensado, normalmente , não precisa ser retratada. Somente quando no percurso do processo existe contaminação por outro elemento químico, executa-se esta correção. Desta forma, utiliza-se esta água (condensado) de retorno para alimentação da caldeira, pois possui temperatura elevada pela recuperação do calor do condensado, que de outra forma seria desperdiçado. Tratando-se do ponto de vista energético, esta ação é extremamente importante, visto que a cada aproximadamente 5 °C que se aumente na temperatura de água de alimentação , reduz-se praticamente 1% no consumo de óleo/gás combustível. [Spirax Sarco – Vol.4]

Considerando-se que o valor médio da temperatura do condensado retornado está em 60 °C, e que a temperatura da água de reposição da caldeira em 30 °C, com um bom aproveitamento deste condensado pode-se reduzir em até 14% o consumo de combustível em uma instalação e conseqüentemente o custo do tratamento de água.

Dentro deste cenário, limita-se ou justifica-se a utilização do retorno de condensado para algumas situações como:

- Quando as distâncias envolvidas para retorno do condensado são grandes, e apesar de um bom isolamento térmico, grande parte do calor do condensado se perde no trajeto, o custo da instalação inviabiliza o reaproveitamento;
- Em áreas onde existe a escassez de água de boa qualidade e o tratamento químico da água possui custo elevado, justifica-se o reaproveitamento.

- Quando durante o processo necessita-se de água quente em um ponto mais próximo do equipamento gerador de condensado, reaproveita-se este condensado para esta etapa do processo, economizando-se com geração de vapor.
- Quando da possibilidade de contaminação do condensado por algum produto químico que deterioraria a caldeira, utilizam-se sistemas para tratamento deste condensado (abrandadores) e o custo de instalação deste sistema deve ser analisado, comparando-se com a quantidade de energia recuperada pelo condensado.

Para garantir-se o retorno deste condensado pode-se utilizar da técnica de manutenção preditiva por ultra-som comentada no item VI.7.

VI.4.1 – LINHA DE RETORNO DE CONDENSADO

Para retornar-se o condensado, deve-se observar alguns detalhes neste processo. Deve-se lembrar que no início do processo a quantidade de ar na tubulação é grande e deve ser eliminada. Depois, têm-se uma carga grande de condensado a baixa temperatura, devido a alta taxa de condensação e perda de carga alta nos equipamentos, causando uma pressão diferencial muito pequena no purgador e logo a seguir, o funcionamento normal do sistema com redução da taxa de condensação e temperatura do condensado se aproximando da temperatura do vapor saturado. Deve-se atentar para o dimensionamento da tubulação de retorno de condensado, como prática utiliza-se por exemplo, considerar o dobro da capacidade de retorno de condensado para compensar o início de operação do sistema.

Na Tabela 6.1, ilustra-se referências para este dimensionamento.

VI.5 – SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE CONDENSADO

Resolve-se o problema da grande formação de condensado no início de processo e dificuldades para seu retorno devido a contrapressão nas linhas, com alagamento dos purgadores, pela instalação de sistemas de bombeamento, onde aproveita-se a queda

natural do condensado até um tanque e a partir deste, através de bombas adequadas se encaminha o condensado até os tanques de retorno das caldeiras.

Tabela 6.1 – Dimensionamento de linha de retorno de condensado – considerando-se carga máxima

ϕ tubulação pol.	ϕ tubulação mm	Capacidade máxima – condições iniciais
1/2"	15	122
3/4"	20	350
1"	25	690
1 1/4"	32	1.550
1 1/2"	40	2.300
2"	50	4.600
2 1/2"	65	9.350
3"	80	15.100
4"	100	31.000
6"	150	84.000

Deve-se atentar que este tanque esteja à pressão atmosférica, para não dificultar ou diminuir a entrada ou saída do condensado. Quando utiliza-se um tanque pressurizado têm-se dificuldades devido a restrição da descarga de condensado e ar nos purgadores.

Ilustra-se na figura 6.6. o sistema de bombeamento instalado na planta industrial em análise .O condensado recolhido no tanque esta numa temperatura entre 80 e 95 °C, seu custo de instalação em torno de R\$ 22.000,00 e capacidade operacional de retornar 20 t/h de condensado. Considerando-se que a temperatura no tanque de equalização das caldeiras é em torno de 60 °C , e que a água de reposição , encontra-se em média a 30 °C, têm-se um diferencial de temperatura de 30°C como reaproveitamento, a pressão de trabalho das caldeiras na unidade esta em torno de 10 kg/cm², e a eficiência da caldeira de 57% , trabalha-se em torno de 8400 h/ano ,ou seja , uma economia em torno de 1.023.048 m³/ano, ver tabela 6.2 .[Spirax Sarco volume 5].

Sabendo-se que foram instalados dois sistemas idênticos , que o consumo mês/médio de vapor é 43200 t e o consumo para o sistema em análise com cogeração é

de $0,02258 \text{ m}^3$ de gás natural por kilograma de vapor, e que existem perdas no sistema decorrentes de contaminações, perda de carga , entre outros, fazendo que a média de retorno de condensado chegue a 45%. Considerando-se o custo de $0,18 \text{ R\$/m}^3$ para o gás, estima-se uma economia de R\$ 165.000,00 /ano com reaproveitamento deste condensado, não contabilizando-se o custo da água ,e descontando-se o valor do consumo de energia nas bombas , viabilizando-se por completo o projeto.



Figura 6.6 – Sistema de recuperação de condensado

Tabela 6.2 – Quantidade de calor (em kcal) para produção de 1 kg de vapor

pressão da caldeira em kg/cm^2	temperatura da água de alimentação °C									
	20	30	40	50	60	70	90	100	120	150
1	626	616	606	596	586	576	556	546	526	496
4	636	625	615	605	595	585	565	555	535	506
6	639	629	619	609	599	589	569	559	539	509
7	641	631	621	611	601	591	571	561	541	511
8	642	632	622	612	602	592	572	562	542	512
9	643	633	623	613	603	593	573	563	543	513
10	644	634	624	614	604	594	574	564	544	514
15	647	637	627	617	607	597	577	567	547	517
17	648	638	628	618	608	598	578	568	548	518
21	649	639	629	619	609	599	579	569	649	519

VI.5.1 – CONSERVAÇÃO DE CALOR NAS TUBULAÇÕES

Necessita-se isolar as tubulações de retorno de condensado, pois em seu trajeto pode se perder até 75% do calor contido no condensado. Em instalações com tubulação isolada têm-se perdas de no máximo 25%. Exemplifica-se com o caso relatado em [Spirax Sarco volume 5]. Baseando-se na tabela 6.3, uma tubulação com comprimento de 300 metros, diâmetro de 50 mm (2”), fluindo condensado a 95 °C com temperatura ambiente de 15 °C, ou seja, temperatura diferencial de 80 °C. Encontra-se na tabela uma emissão de calor de 206 kcal/m linear/h. Assim, para 300 metros têm-se 61.800 kcal/h perdas, sendo que com tubulação isolada as perdas podem ser reduzidas para 15.500 kcal/h.

diferença temperatura	diâmetro da tubulação em								
	15	20	25	32	40	50	65	80	100
	kcal/metro								
55	51	60	76	95	101	129	155	181	224
60	57	67	84	103	112	146	172	198	249
70	69	82	103	129	138	172	206	241	301
80	83	95	120	146	163	206	249	284	353
90	95	112	138	172	198	232	284	327	413
100	112	129	163	198	224	298	335	387	473

Tabela 6.3 – Emissão teórica de calor em tubulação de aço inoxidável, sem isolamento, considerando uma temperatura ambiente entre 10 °C e 20 °C

VI.6 – A IMPORTÂNCIA DO ISOLAMENTO TÉRMICO

Em instalações industriais onde têm-se sistemas de vapor e frio , utiliza-se a tempos o isolamento térmico das tubulações para evitar-se desperdício energético. Pretende-se neste item, ilustrar-se a importância da manutenção destes sistemas para evitarem-se desperdícios.

A equipe de manutenção têm papel de grande importância neste cenário, visto que, a identificação de pontos avariados e áreas com vazamentos, ausência, ou má aplicação de isolamento fazem parte das inspeções de rotas executadas.

Sabe-se que quando a temperatura na superfície aquecida aumenta , aumentam-se as perdas de calor. Uma tubulação isolada não significa que esteja eficiente do ponto de vista energético. A espessura do isolamento é fator significativo para esta eficiência , devendo-se sempre analisar o sistema do ponto de vista custo da instalação x custo da perda de calor .

Pode-se aplicar alguns materiais conhecidos como isolantes térmicos de tubulações , entre eles cita-se:

- Isolantes pré-formados de seções rígidas ,onde inclui-se fibra de vidro e fibra de rocha
- Isolantes pré-formados de silicato de cálcio com 85% de magnésio
- Isolamento de poliuretano rígido ou polissocianureto , mais utilizado na indústria em análise.

Cada material possui gráficos para identificação das perdas de calor em relação ao diâmetro da tubulação . Na tabela 6.4 [Spirax Sarco 8], ilustra-se algumas recomendações de espessura para tubulações de instalações aquecidas por caldeira a gás.

Para melhor interpretação da tabela, define-se :

Valor K (condutividade térmica) : quantidade de calor que passará por um material de determinada espessura e área em um dado período de tempo, mantendo-se um diferencial de temperatura de 1 °C entre as faces mais quente e mais frias.

Sistema AQMT : Sistema pressurizado, fechado ou aberto para a atmosfera que opera com temperaturas superiores a 95 °C até no máximo 120 °C , e pressão manométrica em torno de 3,5 kg/m².

Valor de K	Sistema AQMT e condensado		
	Abaixo de 0,040	0,041 até 0,055	0,056 até 0,07
diâmetro da tubulação em mm	Espessura mínima de isolamento (mm)		
15	25	32	32
20	25	32	32
25	32	32	32
32	32	32	32
40	32	32	32
50	32	32	38
65	32	32	38
80	32	44	44
100	38	44	44
125	44	44	63
150	44	63	63
200	44	63	75
250	63	63	75
300	63	63	75

Tabela 6.4 – Espessura mínima do isolamento recomendada

VI.7 – TRABALHOS DA MANUTENÇÃO

Comentou-se anteriormente nos problemas originados pelos vazamentos de vapor. Sabe-se que as perdas aproximadas por pequenos vazamentos, considerados desprezíveis , têm impacto considerável no consumo energético, conforme ilustra-se na tabela 6.5 [Agência para aplicação de energia 93].

VAZAMENTO		PRESSÃO DE 7 kgf/cm ² (perdas anuais)
diâmetro (mm)	superfície (mm ²)	toneladas de vapor
0,8	0,5	5
1,5	1,8	95
3	7	160
6	28	2900

Tabela 6.5 – Perdas causadas por vazamentos

Utiliza-se a filosofia da manutenção autônoma, descrita com detalhes no capítulo VIII, para reduzir os vazamentos, tendo a equipe de operação a responsabilidade dos pequenos apertos e a manutenção central o papel de eliminação por completo dos vazamentos. Trabalha-se com a inspeção através de rotas quinzenais em todas as áreas, e estima-se a redução com a eliminação de 150 vazamentos /mês, o consumo de 350 m³/mês.

Trabalha-se com manutenção preditiva em purgadores para melhoria do sistema de retorno de condensado, utilizando equipamento de ultra-som nos purgadores termostáticos e termodinâmicos e manutenção preventiva em todos os tipos, incluindo-se os purgadores tipo bóia. Na figura 6.7 ilustram-se alguns tipos de purgadores existentes e na figura 6.8 uma montagem típica correta de um sistema com purgador para final de linha. Nesta planta, esta atividade é semestral e a inspeção é efetuada por técnicos habilitados pela fabricante que garante a reposição de peças e unidades avariadas, com preços previamente acordados. Pode-se optar pela substituição por unidades novas ou recuperadas na fábrica com garantia de funcionamento.

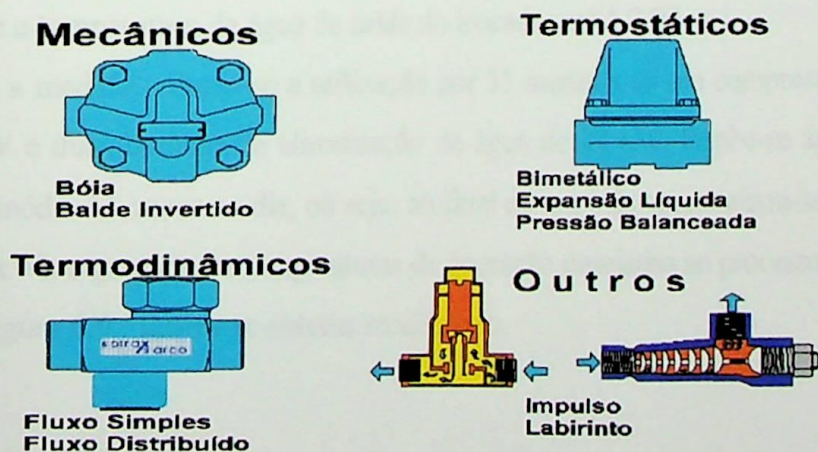


Figura 6.7 – Tipos de purgadores

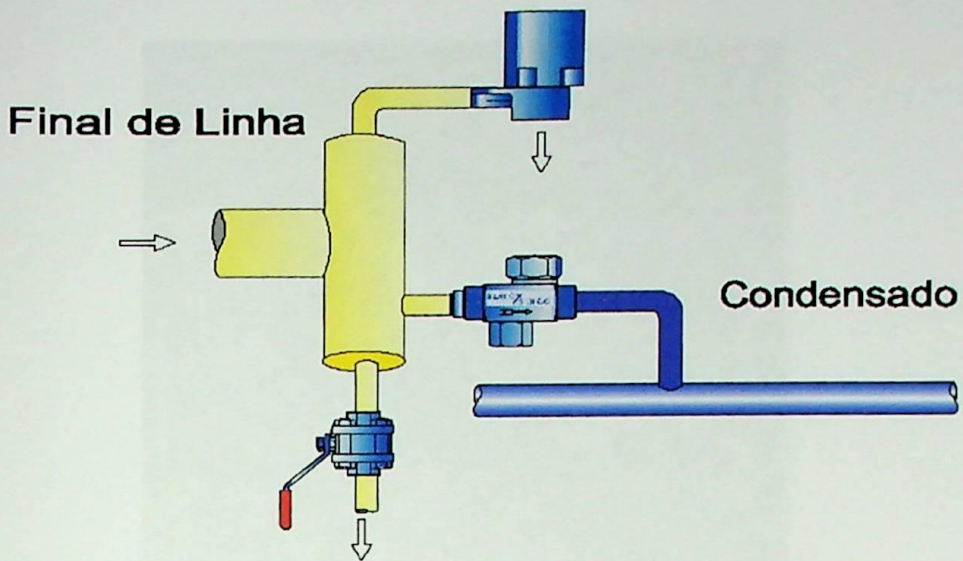


Figura 6.8 – Instalação de purgador para final de linha

VI.8 – ADEQUAÇÃO NO SISTEMA DE ÁGUA GELADA

Necessita-se para resfriamento de produto na área de processo utilizar água gelada com temperatura entre 1 e 2 °C. Para tal atividade existe um sistema com trocadores de placas amônia/água que abastecem reservatórios, que através de bombas de 7,5 CV alimentam os trocadores produto/água gelada.

O tempo de reposição de água neste tanques entre uma batelada e outra era em torno de 1 hora. Efetuou-se uma alteração na tubulação de alimentação de água no trocador amônia/água de 2 ½” para 4” e aumentando-se quatro placas, mantendo-se a pressão na entrada. Desta forma, reduziu-se o tempo de reposição para 25 minutos, mantendo-se a temperatura de água de saída do trocador em 1,2 °C.

Com a medida reduziu-se a utilização por 35 minutos de um compressor de frio de 1.400 kW e duas bombas de alimentação de água de 22 kW. Repõe-se água nestes tanques em média 11 vezes ao dia, ou seja, ao final de um mês economizou-se em torno de 270.000 kWh e garantiu-se temperaturas de operação desejadas ao processo.

Na figura 6.9, ilustra-se sistema modificado.

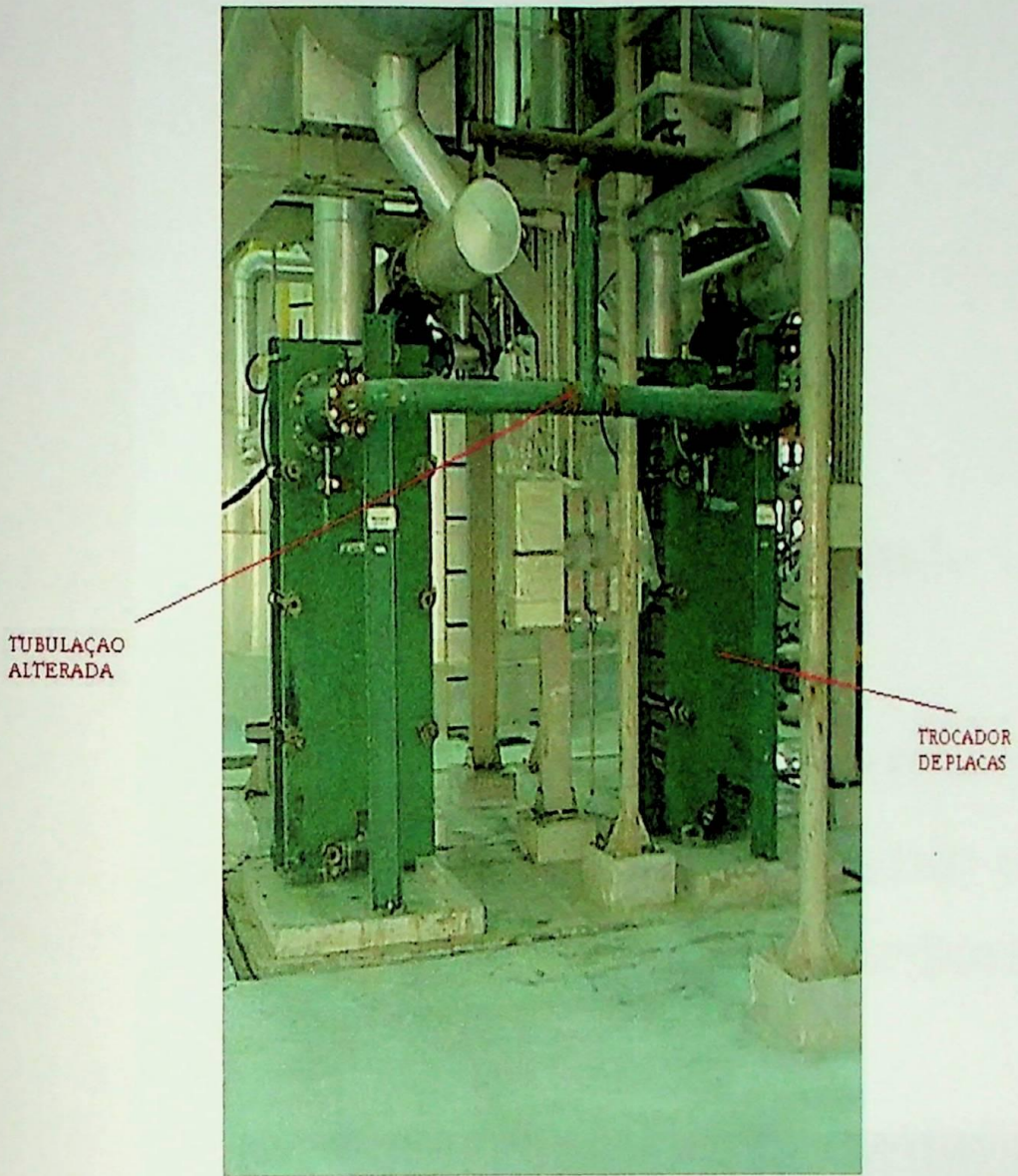
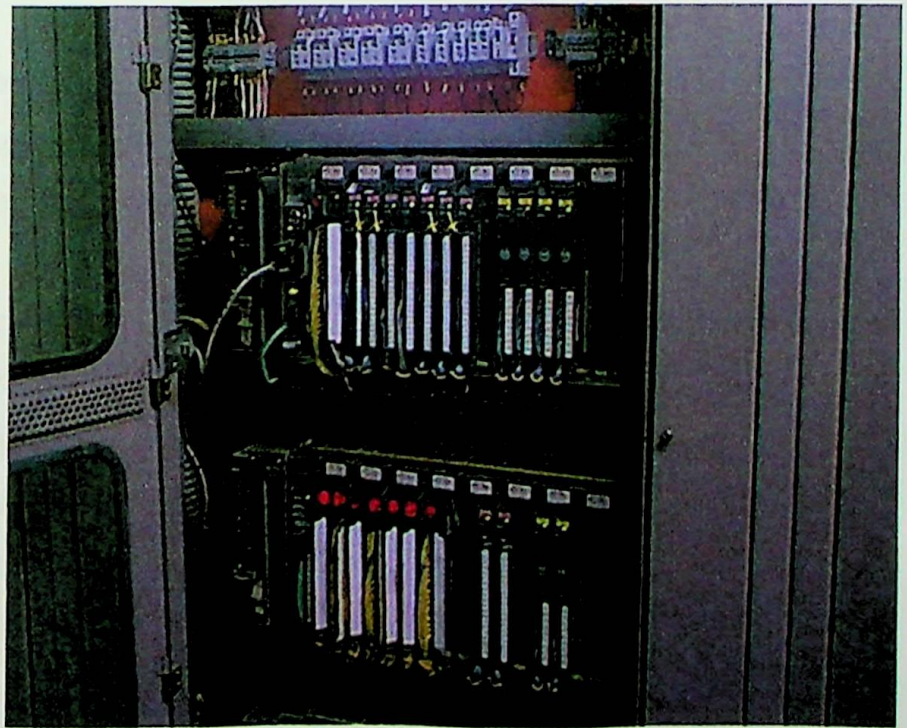


Figura 6.9 – Trocador de placas para sistema de água gelada

Capítulo VII

Automação de Sistemas de Carregamento de Compressores



VII.1 - INTRODUÇÃO

Com o crescimento do grau de automação nas indústrias brasileiras, impulsionados pela redução do preço dos equipamentos, melhoria da capacidade de processamento, maior número de profissionais aptos a desenvolver sistemas, possibilidade de informações mais precisas e a necessidade de reduzir custos operacionais, tornou-se uma ferramenta extremamente importante na busca da melhoria contínua dos processos. Neste capítulo, analisa-se a utilização das técnicas de automação para redução do consumo de energia nos sistemas de maior impacto dentro da planta. Em especial, demonstra-se os ganhos obtidos nas aplicações com compressores na área de utilidades.

VII.2 – CASO I: COMPRESSOR DE AMÔNIA PARA SISTEMA DE CONDENSAÇÃO DA PLANTA DE CO₂

Neste sistema utilizam-se dois motores acionando compressores que trabalham no sistema de condensação de CO₂, com especificação relacionada a seguir:

Características dos motores

Fabricante :	AEG
Tensão de alimentação (V)	380
Potência (CV)	250
Potência (kW)	200
Corrente nominal (A)	350
Rotação (rpm)	3.565
Classe de isolamento	F
Regime	S1
Fator de potência	0,9

Cada equipamento possui controlador individual que mantém a pressão de saída do compressor em 17 bar e aproximadamente -28°C , trabalhando isoladamente. Desta forma, quando o volume de gás a ser comprimido reduz, os dois motores trabalham a 50% de carga, por exemplo. Na figura 7.1 ilustra-se a curva de carga e do fator de potência de cada unidade de compressão.

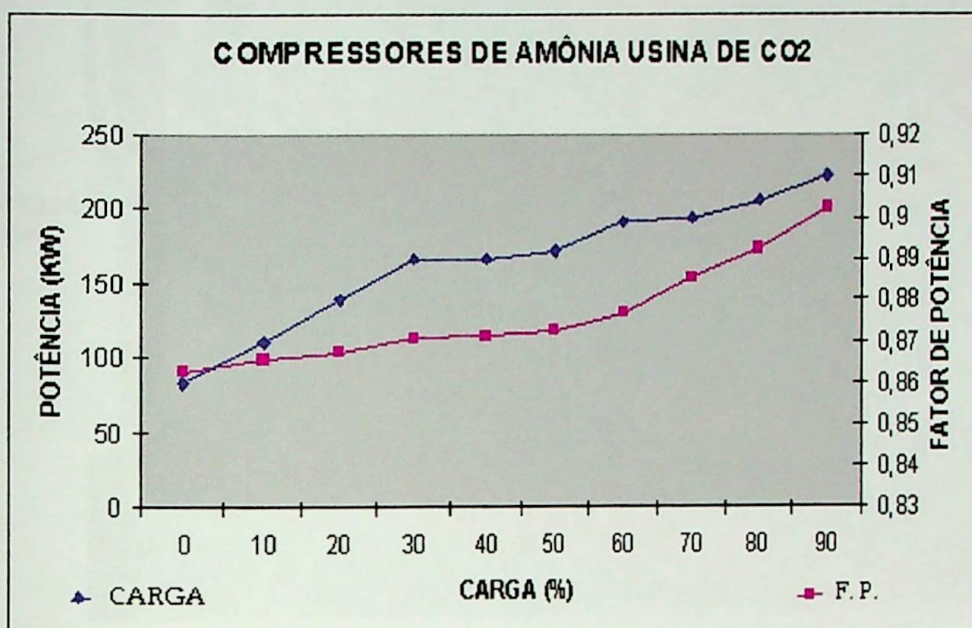


Figura 7.1 – Curva de carga e fator de potência para compressor de amônia do sistema de CO_2

Na situação descrita, têm-se para uma situação estável de produção na planta, aproximadamente 3 ton/h, um consumo de 247 kWh.

Implantou-se um sistema de automação comandado por PLC, em que um sinal de 4-20 mA informa qual a porcentagem de carga que esta trabalhando o compressor. Analisa-se também a temperatura de saída do condensador e pressão de saída do compressor. Se as mesmas mantiverem-se constantes por cinco minutos e a carga de cada compressor estiver abaixo de 50%, automaticamente o sistema retira uma unidade de operação e acompanha o carregamento automático da unidade que permanece em operação. Da mesma forma, programou-se o sistema para que quando uma unidade atingir 95% de carga e a pressão de saída do compressor começar a cair e coloca-se outro compressor em operação após cinco minutos.

Estipulou-se um tempo de cinco minutos, porque existe pequenas variações no fluxo de gás da estação de purificação. Mediu-se após a implantação do sistema que a potência consumida pelas duas máquinas em uma hora de operação com produção de 3 ton/h se reduziu a 208 kWh.

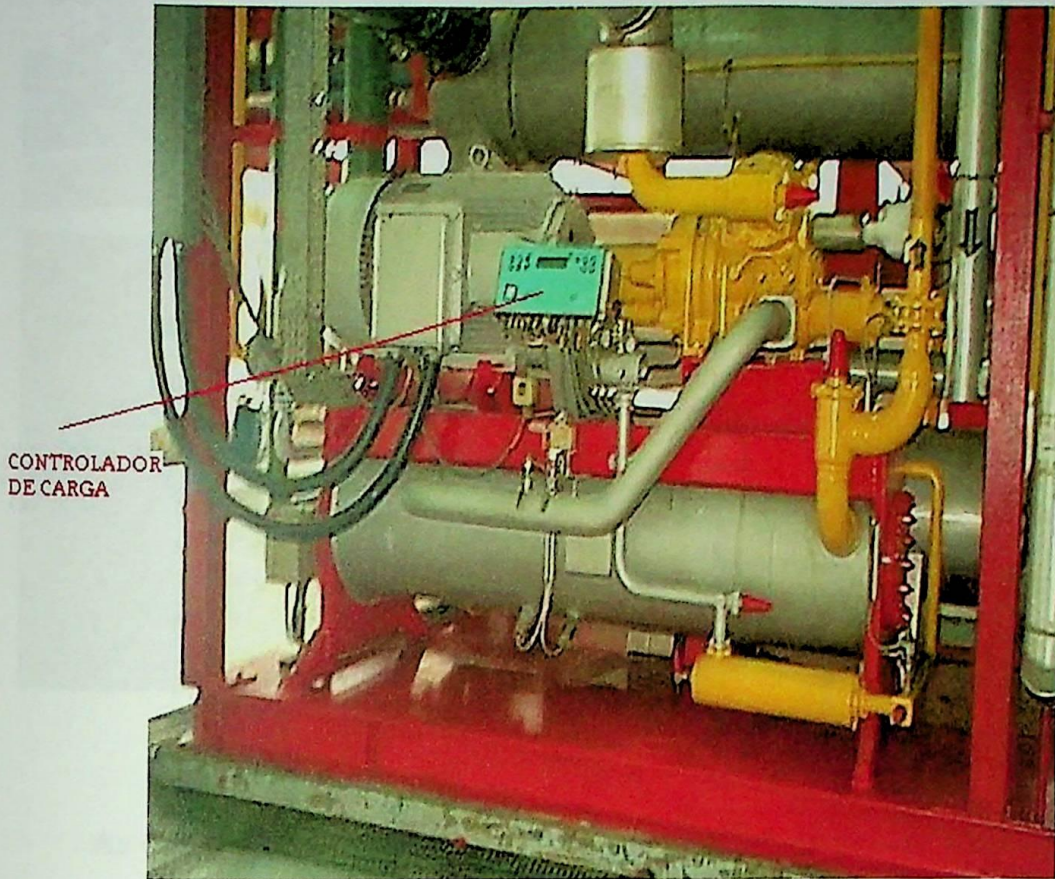


Figura 7.2 – Compressor de amônia para sistema de condensação de CO₂

Na figura 7.2 , ilustra-se um dos compressores com seu controlador de carga.

VII.3 – CASO II : COMPRESSORES PARAFUSO PARA SISTEMA DE AMÔNIA

Neste sistema utilizam-se seis motores acionando compressores tipo parafuso que trabalham numa central de refrigeração. Cada motor aciona um compressor com capacidade de 4.137.000 kcal/h. Ilustra-se na figura 7.3 cada unidade de compressão.



Figura 7.3 – Unidade de compressão sistema de amônia

As características do motor estão descritas a seguir e sua curva de carga e fator de potência na figura 7.4.

Características dos motores :

Fabricante	WEG
Tensão de alimentação (V)	4.000
Potência (CV)	1.900
Potência (kW)	1.400
Corrente nominal (A)	241
Rotação (rpm)	3.570
Categoria	N
Classe de isolamento	F
Regime	S1
I_p/I_N	6
Fator de potência	0,88
Fator de serviço	1,15

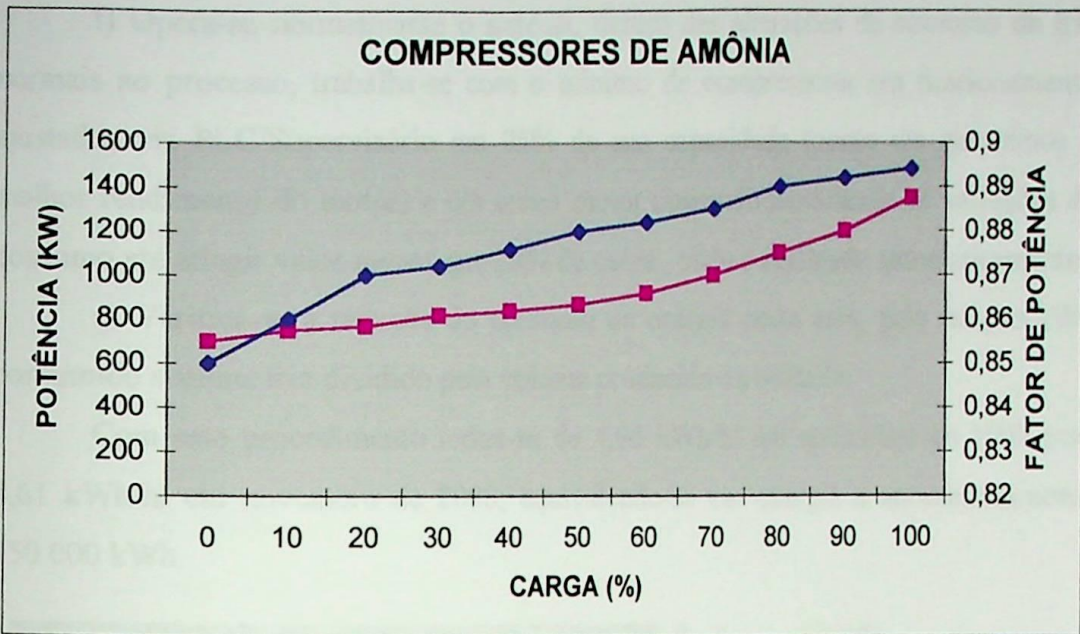


Figura 7.4 – Curva de carga e fator de potência para compressor de amônia

Cada unidade de refrigeração possui controlador individual de carga e sistema automático de controle de pressão e temperatura para sucção e descarga do compressor. Observa-se pela curva, que em operação com baixa carga têm-se uma considerável redução do fator de potência. Estes compressores correspondem em média por 30% do consumo da planta e passou-se a opera-los por sistema automatizado da seguinte forma:

a) Parte-se o novo compressor na planta somente quando a pressão de sucção ultrapassar 2,1 bar por 30 segundos, sendo que se efetuou um ajuste no “set-point” dos controladores individuais dos compressores para 1,9 bar.

b) Desliga-se o compressor do sistema quando sua carga for inferior a 20% e se estiver operando com pressão de sucção inferior a 1,7 bar por 90 segundos.

c) Ajusta-se temperaturas dos controladores locais : a temperatura de sucção entre -5°C e 20°C e a temperatura de descarga entre 40 e 60 °C ou conforme orientação do fabricante.

d) Implementa-se o controle de pressão no controlador local para que se trabalhe com pressões de descarga entre 12 e 14 bar ou até sete vezes a pressão de sucção como proteção ao compressor.

e) Elabora-se uma fila de operação ,em que o último compressor desligado será o ultimo a retornar ao sistema. Implementa-se proteção térmica aos motores com intervalos de 15 minutos entre partidas e máximo de duas partidas por hora.

f) Opera-se normalmente o sistema, dentro das alterações de consumo de frio normais ao processo, trabalha-se com o mínimo de compressores em funcionamento ajustados via PLC/Supervisório em 95% de sua capacidade (ponto em que temos o melhor rendimento do motor) e um único motor operando modulando as variações de consumo até atingir valor menor que 20% de carga, onde é desligado automaticamente.

g) Verifica-se a redução do consumo de energia nesta área, pela relação kWh consumido sistema frio dividido pelo volume produzido na unidade.

Com este procedimento reduz-se de 4,96 kWh/hl em novembro de 1999 para 4,61 kWh/hl em novembro de 2000, equivalendo-se em energia a aproximadamente 450.000 kWh.

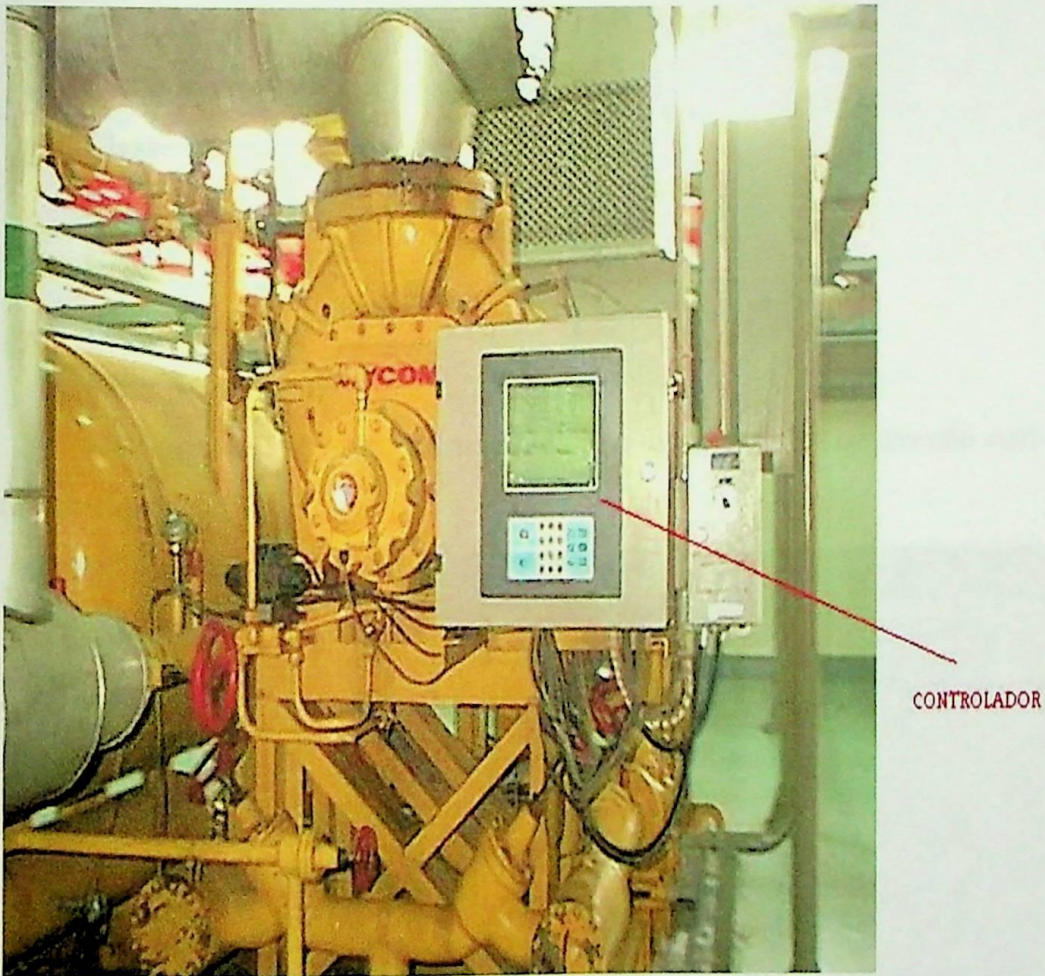


Figura 7.5 – Compressor tipo parafuso com controlador local

Ilustra-se na figura 7.5 o compressor e seu controlador de carga

VII.4 – CASO 3 : COMPRESSORES DE AR

Para alimentação de ar para sistemas de instrumentação, turbinas, etc, utilizam-se três motores com as dados de fabricação relacionados a seguir.

Características dos motores

Fabricante	WEG
Tensão de alimentação (V)	4.000
Potência (CV)	600
Potência (kW)	442
Corrente nominal (A)	77
Rotação (rpm)	3.555
Categoria	N
Classe de isolamento	F
Regime	S1
I_p/I_N	7,2
Fator de serviço	1,15
Fator de potência	0,89

Na figura 7.6 têm-se a ilustração de uma das unidades de compressão com seu controlador local.

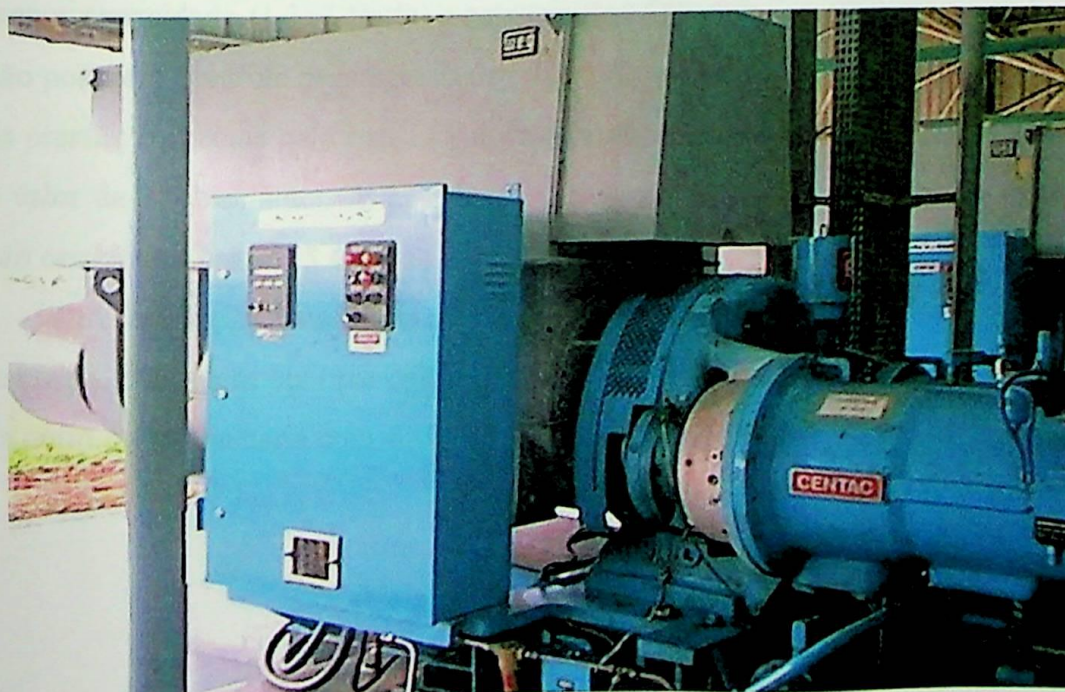


Figura 7.6 – Unidade de compressão de ar

Cada unidade possui capacidade de fornecer 3.271 Nm³h e suas curvas de carga e fator de potência apresentam-se com as características ilustrada na figura 7.7.

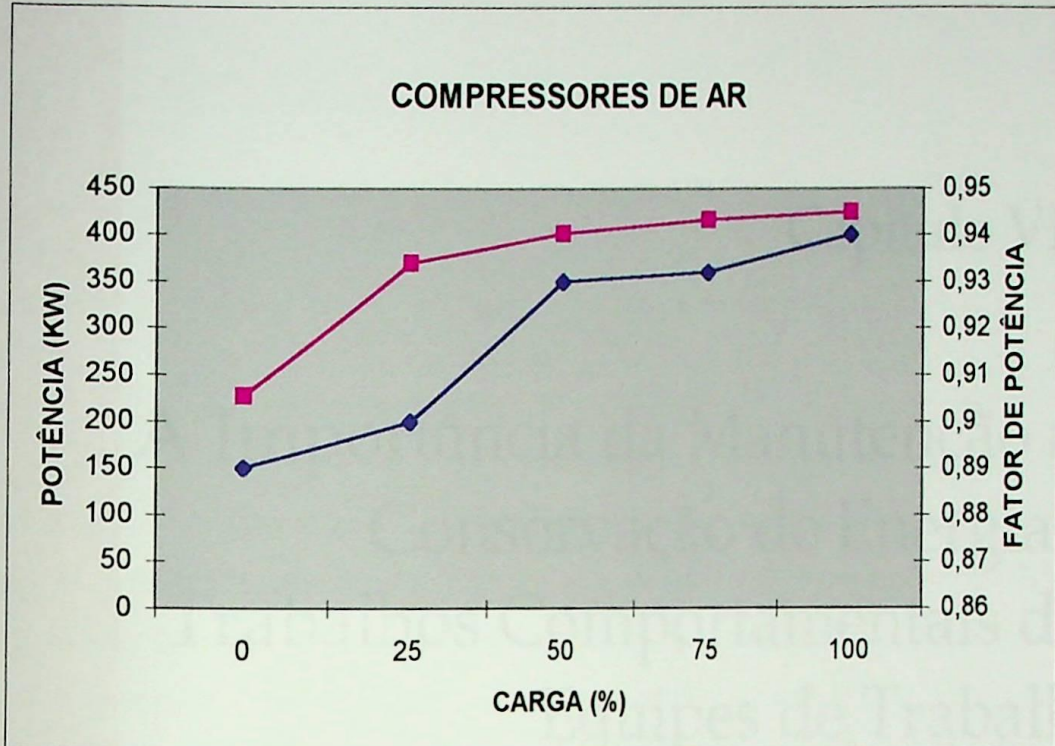


Figura 7.7 – Curvas de carga e fator de potência para compressor de ar

Nesta ação ainda em fase de implantação, instalou-se compressor de ar com menor capacidade (1.357 Nm³h) e consumo (250 CV). Como os compressores maiores não possuem controle proporcional de carga, optou-se por elaborar um controle através da pressão fornecida pelo sistema que deve trabalhar entre 6,8 e 7,5 bar. Quando atingir o valor de 7,5 bar, automaticamente um compressor retira carga e desliga se a mesma não cair de 6,8 bar por 5 minutos.

A instalação do compressor menor visa atender a fábrica quando com produção reduzida, em que se opta por operar com um compressor que consome 225 kW no lugar de outro que trabalharia com 40% de carga e consumiria em torno de 370 kW.

INTRODUÇÃO

Capítulo VIII

A Importância da Manutenção na
Conservação de Energia -
Trabalhos Comportamentais das
Equipes de Trabalho



VIII.1 - INTRODUÇÃO

Em qualquer programa de conservação de energia é de fundamental importância a participação de todos os funcionários . O nível gerencial define a política de manutenção, ferramentas a serem utilizadas e sugere metas a serem alcançadas . A equipe de manutenção têm papel de destaque na conservação dos equipamentos e na coleta de dados/parâmetros para os trabalhos .A equipe operacional participa no acompanhamento das atividades e execução de trabalhos mais rápidos e a área de comunicação interna na divulgação dos resultados

VIII.2 – CONCEITUAÇÃO DA MANUTENÇÃO

Até a década de 80 as indústrias nos países ocidentais tinham um objetivo claro: obter-se o máximo de rentabilidade em seu investimento. Com a infiltração dos ocidentais e mais recentemente com a globalização, um outro fator passou a ser considerado para atender ao consumidor: a qualidade dos produtos e serviços fornecidos.

Em 1975, caracterizou-se pela Organização das Nações Unidas como atividade fim de qualquer entidade organizada $Produção = Operação + Manutenção$ [UFRJ/UPADI 99] e atribuiu-se a manutenção as seguintes responsabilidades:

- Reduzir as paralisações dos equipamentos que afetam a operação
- Reparar, em tempo hábil, as ocorrências que reduzem o potencial de execução dos serviços.

- Garantir o funcionamento das instalações, de forma a que os produtos ou serviços atendam aos critérios estabelecidos pelo controle de qualidade e a padrões pré-estabelecidos

A história da manutenção acompanha o desenvolvimento técnico-industrial da humanidade. Até 1914, a manutenção tinha papel secundário. Com a 1ª Guerra Mundial e a implantação dos conceitos de produção em série, as fábricas passaram a adotar programas de produção e surgiu a necessidade de se criar equipes especiais para efetuar reparo nas máquinas em menor tempo possível.

Este tipo de tratamento administrativo prosseguiu até a 2ª Guerra Mundial onde a devido a necessidade de rapidez de produção, pensou-se não somente em corrigir as falhas, mas também em evitar-se suas ocorrências.

Após 1950, os esforços industriais pós-guerra, evolução da aviação comercial e da indústria eletrônica, foram-se analisados os tempos gastos nos diagnóstico e correção de falhas ilustrados na Tabela 8.1 [UFRJ/UPADI 99] e se verificou a necessidade de um órgão para assessoramento dos trabalhos conhecida como Engenharia de Manutenção.

Tabela 8.1 – Tempos de diagnose e reparo em função da natureza

TEMPOS DE DIAGNOSE E REPARO DE EQUIPAMENTOS EM FUNÇÃO DE SUA NATUREZA CONSTRUTIVA		
NATUREZA	DIAGNÓSTICO	REPARO
MECÂNICO	10%	90%
HIDRÁULICO	20%	80%
ELÉTRICO	60%	40%
ELETRÔNICO	90%	10%

A partir de 1966 com a difusão dos computadores e sofisticação dos instrumentos de proteção e medição, criaram-se critérios para predição ou previsão de falhas, otimizando a atuação das equipes na execução de manutenções. Depois em 1980, desenvolveram-se os microcomputadores e softwares e o controle e armazenamento de dados, bem como, o tratamento dos dados com foco de tendências. Surgiu uma área de extrema importância conhecida como Planejamento e Controle da Manutenção (PCM), que esta em estágio de evolução com caracterização de redução de custos e garantia de

qualidade (através de confiabilidade e produtividade dos equipamentos) e atendimento de prazos (disponibilidade dos equipamentos).

Necessita-se para a apresentação dos tipos de manutenção conceituar dois itens importantes nesta avaliação .

Defeito – ocorrência em itens que não impedem seu funcionamento, todavia podem a curto ou longo prazo, acarretar sua indisponibilidade.

Falha – ocorrência em itens que impedem seu funcionamento .

Diante do cenário apresentado pode-se agora , conceituar a manutenção como se segue :

Manutenção Corretiva – Todos os serviços de reparos/substituições necessários quando da ocorrência de falhas.

Manutenção Preventiva – Todos os serviços de inspeções sistemáticas, ajustes, conservação e eliminação de defeitos, visando evitar falhas.

Manutenção Corretiva – Todos os serviços executados nos equipamentos em falha .

Manutenção Preditiva – Qualquer atividade de monitoramento capaz de fornecer dados suficientes para realizar uma análise de tendências.

E em uma fase mais avançada ,introduzir-se um novo conceito que já é usado e impacta em muito na redução de custos de manutenção com o decorrer dos anos:

Manutenção Proativa – Atividades que visam minimizar no projeto original os fatores de custo nas manutenções futuras (manutenabilidade) ,com a participação dos colaboradores da equipe de manutenção para adequação dos projetos, antecipando/visando defeitos, com criteriosa análise nos testes, inspeções, partida dos equipamentos e intervenções . Como resultado deste tipo de manutenção se espera um aumento de produtividade (máquina com maior disponibilidade) sem aumento de investimentos.

Seguindo-se a conceituação apresentada por [Nakajima 89], têm-se uma subdivisão da manutenção preventiva em : Preventiva por tempo ou preventiva por

estado e abaixo relaciona-se as subdivisões mais comuns utilizadas na planta em análise.

Inspeção ou Manutenção por Rotas – serviços de preventiva de alta frequência e curta duração , normalmente efetuada utilizando sentidos humanos e sem acarretar indisponibilidade dos equipamentos com o objetivo de acompanhar o desempenho dos componentes . Esta atividade é desenvolvida pela equipe de operação , e algumas vezes pela equipe de manutenção , tem controle simplificado e preenchimento de check-lists e etiquetagem na área.

Lubrificação – serviços de adição, troca ,complementação ou exames , em alguns casos análises de lubrificantes, executadas pela operação ou equipe de manutenção. Exige controle simplificado, com indicação dos pontos a lubrificar, tipo de lubrificante , dosagem e frequência da lubrificação .

Manutenções Periódicas – serviços em que o equipamento para após um período de funcionamento, para que sejam feitas medições, ajustes e ,se necessário troca de peças, em função de programa pré-estabelecido a partir de dados operacionais ,recomendações do fabricante ou referências externas. É necessário montar históricos , e as periodicidades podem até ser alteradas com base nas experiências dos profissionais de manutenção e dados obtidos com o passar do tempo.

Manutenção Preditiva ou Previsiva – serviços de acompanhamento de desgaste ou tendência de falhas em peças ou componentes de equipamentos prioritários , visando evitar paradas não programadas e danos maiores , com perda de produção.

Reparo de Falha (emergencial) – serviços de reparo em equipamentos que apresentam variações em seu estado,como caracterizado em falha.

Reparo de Defeito ou corretiva programada – serviços de reparo em equipamentos que apresentam variações em seu estado, com um caracterizado defeito .

VIII.3-CONHECENDO E AVALIANDO A IMPORTÂNCIA DA TERMOGRAFIA

Para abordar a importância da inspeção termográfica e identificar-se seus ganhos em conservação de energia, deve-se conhecer um pouco mais sobre esta poderosa ferramenta de manutenção.

A tabela 8.2 nos mostra como divide-se as faixas de comprimento de onda, que causam determinada impressão de cor no olho humano

Tabela 8.2 – Cores características ao olho humano de comprimentos de onda

COR	COMPRIMENTO DE ONDA
Violeta	0,38 ≈ 0,436 μm
Azul	0,436 ≈ 0,495 μm
Verde	0,495 ≈ 0,566 μm
Amarelo	0,566 ≈ 0,589 μm
Laranja	0,589 ≈ 0,627 μm
Vermelho	0,627 ≈ 0,780 μm

Os termovisores que são os instrumentos utilizados para a termografia utilizam radiação infravermelha para este fim. Em teoria se diz que: Todo corpo aquecido emite radiação infravermelha. O infravermelho é dividido em quatro partes:

- Infravermelho próximo (0,75 a 3 μm)
- Infravermelho médio (3 a 6 μm)
- Infravermelho distante (5 a 15 μm)
- Infravermelho extremo (15 a 1000 μm)

Nos termovisores deve-se observar alguns fatores para uma correta medição [Rangel 99]:

- Emissividade: variável com o tipo e a cor do material, bem como com a temperatura
- Distância do objeto: quanto maior distância menor a quantidade de energia que chega ao equipamento, portanto, exige-se uma compensação
- Temperatura ambiente: ou seja, temperatura onde se encontra o objeto
- Velocidade do vento: quanto maior a velocidade, maior quantidade de calor retira-se do objeto por convecção. Acima de 10 m/s recomenda-se correção da temperatura

- Ambiente : alguns gases são extremamente atenuantes para a radiação infravermelha, e se existirem compensa-se a temperatura lida
- Reflexo solar : Deve ser evitado ou filtrado esta radiação indesejada

A termografia tem um papel importante na identificação de falhas em contatos elétricos. Os contatos elétricos ou terminais de conexão têm sua zona ativa na região de união , onde a corrente circula de uma peça para outra . Nessa região, surge uma resistência de contato, causando aquecimento pelo efeito Joule e também ocorre o envelhecimento devido às reações químicas com a atmosfera ambiente.

Quando uma peça de metal é encostada em outra , o contato não é feito em toda área física, ou área de contato aparente, mas sim, em pequenas regiões ou pontos como mostrado na figura 8.2.

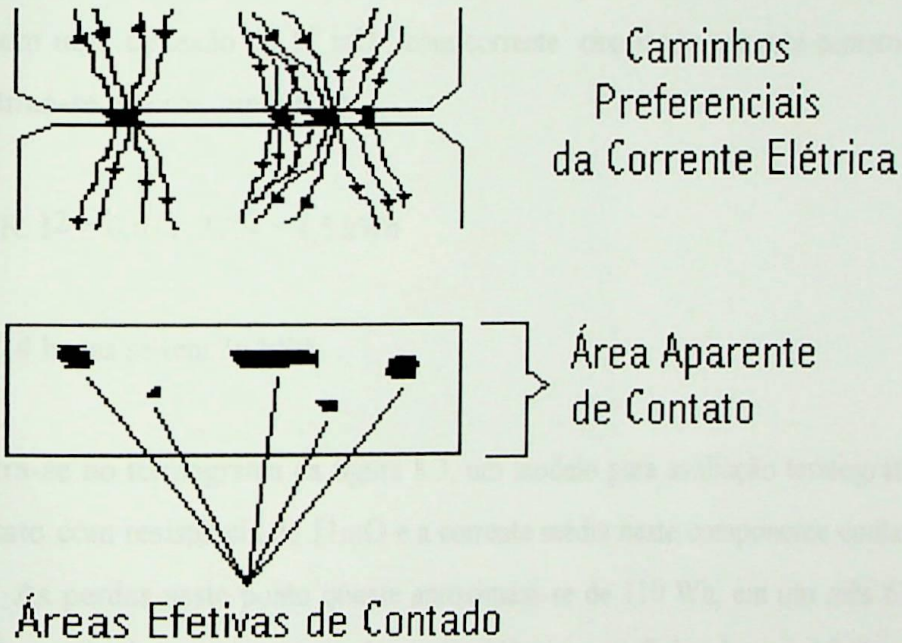


Figura 8.2 – Zonas de Contato

Sabe-se que existe a possibilidade de haver impurezas na interface do contato , além da possibilidade de uma fina camada de ar e de óxido estarem presentes, comprometendo o desempenho do contato.

Em [Rangel 99] apresenta-se um modelo matemático para verificar a influência da temperatura na vida útil de contatos , seguindo a fórmula (8.1):

$$K_i = 2^{(\Delta T_{i1} - \Delta T_{i2})/\Delta i} \quad (8.1)$$

Exemplo : Um contato com temperatura inicial de 35 K, $\Delta i = 6$ K . Se ocorrer uma sobrecarga , e a temperatura passar a ser 45 K, sua vida estará sendo reduzida em :

$$K_i = 2^{(35-45)/6} = 0,315$$

Isto é, vida dividida em aproximadamente por 3,2

sendo : Δi = elevação da temperatura do componente em relação ao fluido envolvente

Resistências de contato altas causam : Perdas de potência, queda de tensão, aquecimento e danos aos conectores. Cita-se como exemplo de perdas um circuito com resistência em uma conexão de 11 m Ω , com corrente circulando por este contato de 370 A . Estima-se a perda em kW por :

$$P = R \cdot I^2 = 0,011 \cdot 370^2 = 1,5 \text{ kWh}$$

Em 24 horas se tem 36 kWh

Ilustra-se no termograma da figura 8.3, um modelo para avaliação termográfica em um contato com resistência de 11m Ω e a corrente média neste componente contator de 100 A . As perdas neste ponto quente aproximam-se de 110 Wh, em um mês 63,3 kWh, ou seja, equivalente ao consumo de uma residência monofásica durante 15 dias.

Encontram-se em média por inspeção termográfica 150 pontos quentes, decorrentes de causas diversas, como : Conexões frouxas, Terminais mal conectados/apertados, parafusos internos aos relés e contadores frouxos, entre outros.

Nas figuras 8.4 a) , b), c) , d) , e) , f), g) e h) ilustram-se outros exemplos de aquecimentos em partes de componentes elétricos de comando com as respectivas correntes médias que circulam pelos mesmos.

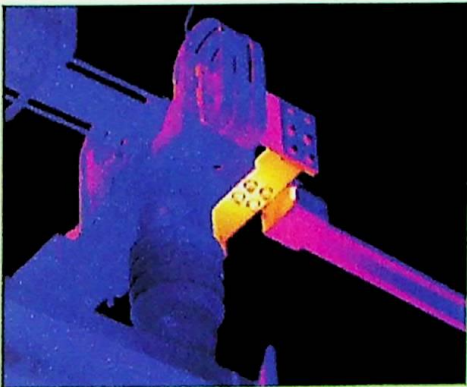
Inspeção Termográfica		INSP01_06/09/00	
TAG localização: CONTATOR A1		Cabine:	
Componente: CONTATOR			
Local Aquecimento: FASE R			
Descrição do Aquecimento: TERMINAL DE ENTRADA FASE R		Status: CRÍTICO	
Temperatura do Objeto: [°C]		FASE R	FASE S
		75 °C	81 °C
Temperatura Ambiente: [°C]	28 °C		
Temp.Máx. Admissível: [°C]	70 °C		
Velocidade do Vento : [m/s]	1,00		
Emissividade:	0,80		
Carga Medida: (%) ou [A]	100		
Carga Nominal: (%) ou [A]	100		
Temperatura Corrigida: [°C]		75 °C	81 °C
			75 °C
Ação Sugerida:	Fase R =>SUBSTITUIR TERMINAL		
	Fase S =>REAPERTAR		
	Fase T =>REAPERTAR		
Status da ação:			
			
Número da OS: _____	Data execução: _____		
Status da OS:	Executada []	Resolvida []	Reincidente []
Comentários:			

Figura 8.2 – Modelo de relatório para termografia

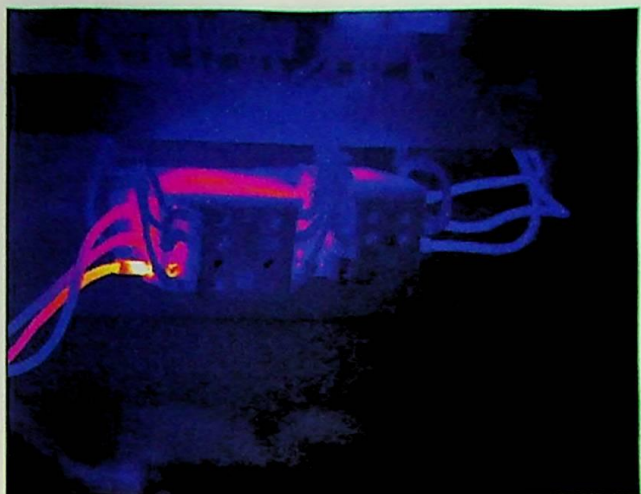


Figura 8.4 a) - 20 A



Figura 8.4 b) - 45 A

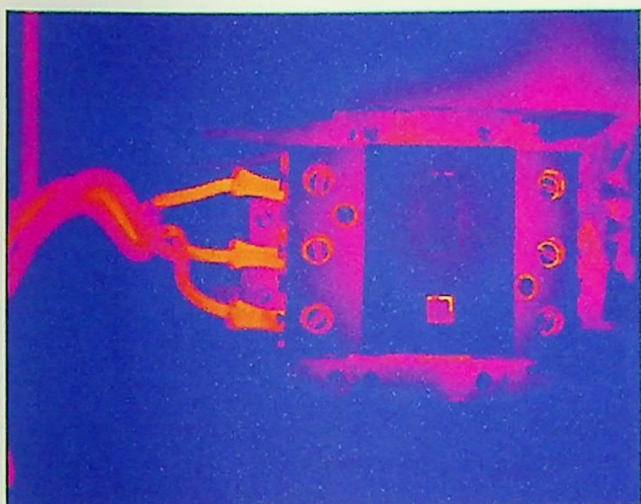


Figura 8.4 c) - 25 A

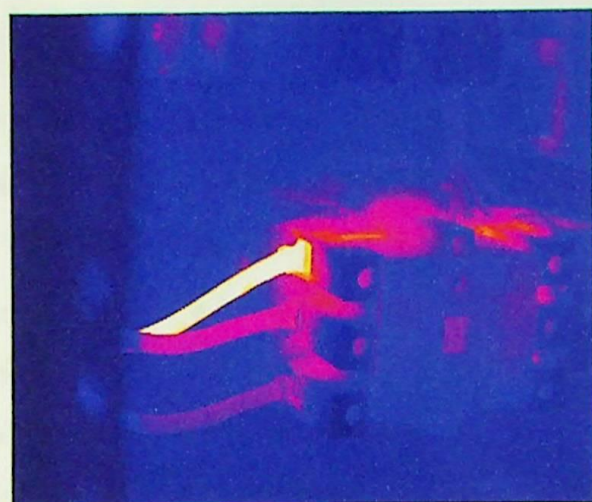


Figura 8.4 d) - 50 A



Figura 8.4 e) - 25 A



Figura 8.4 e) - 23 A

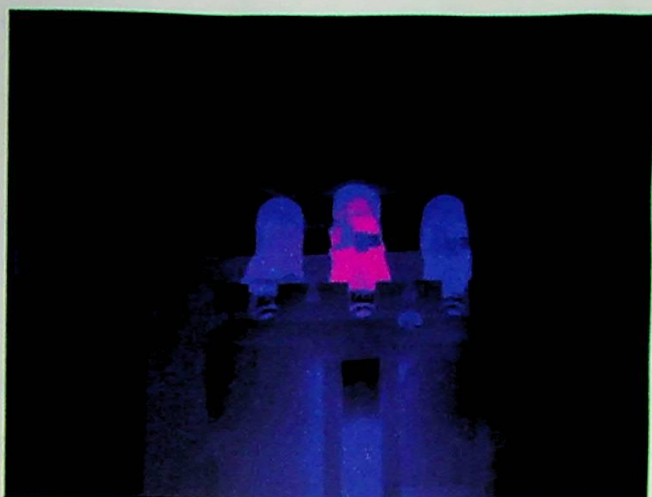


Figura 8.4 g) - 250 A



Figura 8.4 h) - 250 A

O caso c) apresentava resistência de contato de $126\text{ m}\Omega$ na fase R, $125\text{ m}\Omega$ na fase S e $121\text{ m}\Omega$ na fase T. Efetuando-se a manutenção de substituição dos terminais, obteve-se $20\text{ m}\Omega$ na fase R, $18\text{ m}\Omega$ na fase S e $19\text{ m}\Omega$ na fase T, ou seja, para a corrente de 25 A , circulando por este contator, eliminou-se a dissipação de 5.670 Wh/mês .

O caso g) apresentava resistência de contato de $1.840\text{ }\mu\Omega$ na fase R, $2.880\text{ }\mu\Omega$ na fase S e $1.860\text{ }\mu\Omega$ na fase T. Efetuando-se a manutenção de reaperto e limpeza nas conexões, obteve-se $35\text{ }\mu\Omega$ na fase R, $37\text{ }\mu\Omega$ na fase S e $36\text{ }\mu\Omega$ na fase T, ou seja, para a corrente de 250 A , circulando por este disjuntor, eliminou-se a dissipação de 1.165 Wh/mês .

Considerando-se em média 150 pontos identificados por inspeção termográfica, um bom trabalho da equipe de manutenção pode evitar um desperdício estimado de 450 kWh/mês . Com esta atividade evita-se paradas de equipamentos, troca prematura de componentes, danos a outras partes, perdas em condutores que dependendo do processo produtivo são incalculáveis.

VIII.4 - MANUTENÇÃO AUTÔNOMA E MONITORAMENTO POR ROTAS

A formação de equipes de manutenção autônoma com a operação é uma forma de implantar a filosofia “minha máquina cuida eu”, onde o colaborador executa pequenas manutenções como reaperto, limpeza, inspeções e lubrificações, diminuindo-se o tempo de máquina indisponível por uma falha maior no equipamento.

Gerenciando-se estas atividades por um sistema informatizado de manutenção, possibilita-se ao nível gerencial acompanhar este programa, e verificar os resultados principalmente pelos índices de TMEF (tempo médio entre falhas) e TMR (tempo médio para reparo).

A operação participando dos diagnósticos de manutenção, elaborando requisições de serviço para a equipe central de manutenção, acompanhando resultados de disponibilidade e rendimento de equipamentos, elaborando check-list's de inspeção, reaperto, limpeza e lubrificação, controlando custos de manutenção, criando lições de um ponto (murais com desenhos e descrições de atividades repetitivas sendo executadas na maneira correta) e participando do programa de melhorias (sugerindo alterações e criando facilidades para a operação e manutenção) são de vital importância nos ganhos de performance de equipamentos e conseqüentemente economia de energia.

Definem-se itens de controle e verificação para a operação e entre eles esta o índice de consumo de sua área, desta forma, se busca a participação de todos para atingimento da meta global da planta. Existe uma atenção especial para não deixar equipamentos ligados sem produção, luzes acesas desnecessariamente, eliminação de vazamentos de vapor, ar comprimido, água, CO₂ e produto. Lembrando que o impacto de vazamentos no consumo de energia pode ser verificado pela tabela 8.3 [Agência para Aplicação de Energia 93], que mostra os consumos de energia para suprir vazamentos em uma rede operando a uma pressão de 7 bar durante 6.000 horas ano.

O trabalho de monitoramento por rotas é executado pela equipe de manutenção e em alguns casos pela operação. Este trabalho consiste em inspeções normalmente quinzenais em setores previamente definidos, onde o colaborador por inspeção sensorial verifica vários pontos nos equipamentos em funcionamento. Relaciona-os

Tabela 8.3 –Consumo de energia para suprir vazamentos

VAZAMENTO		POTÊNCIA NECESSÁRIA PARA COMPRIMIR O AR PERDIDO (kW)	CONSUMO ANUAL (kWh)
diâmetro (mm)	superfície (mm ²)		
0,8	0,5	0,1	600
1,5	1,8	1	6.000
3	7	3,5	21.000
6	28	15	90.000

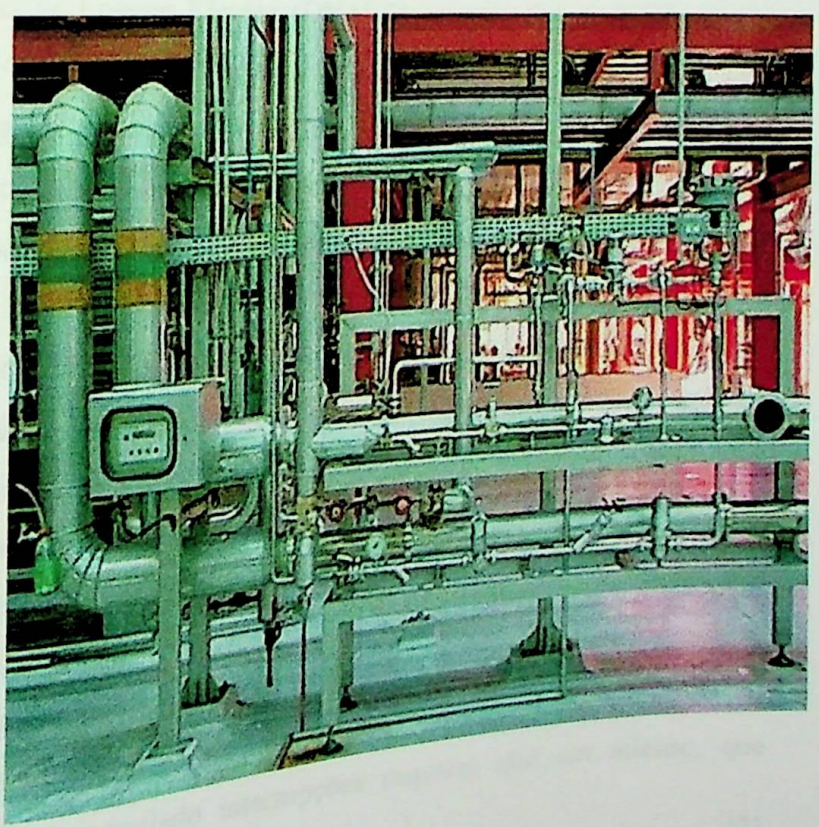
em ficha apropriada, etiqueta as anomalias na área por equipe a trabalhar na atividade a ser executada, abrem-se requisições de serviço no sistema informatizado de controle da manutenção e depois programa-se data da intervenção dentro de planejamento de paradas para solucionar o defeito ,antes da ocorrência de falha que possa causar perda de produção, parada do equipamento por muito tempo para manutenção ou indisponibilidade da máquina por acidente grave.

INTRODUÇÃO

Considerando-se a importância da qualidade de energia para a produtividade industrial, deve-se buscar, em primeiro lugar, a melhoria da qualidade de energia fornecida pelo sistema elétrico e posteriormente a melhoria da qualidade de energia consumida pelo sistema produtivo. Este trabalho tem como objetivo apresentar as principais características da qualidade de energia e as técnicas de avaliação da qualidade de energia na indústria de alimentos.

Capítulo IX

Avaliação da Qualidade de Energia na Indústria de Alimentos



IX.1 - INTRODUÇÃO

Considerando-se o nível de automação e a quantidade de equipamentos eletroeletrônicos instalados, deve-se atentar para que problemas com qualidade de energia afetem estes sistemas e possam causar danos ao processo. Neste capítulo, aborda-se o conceito de “power quality”, suas implicações aos sistemas alimentados e como melhor solucioná-los e monitorá-los em uma planta industrial.

IX.2 – HISTÓRIA E CONCEITUAÇÃO

A 30 anos atrás as reclamações de qualidade de energia , associavam-se somente às interrupções na alimentação. A partir de 1978, criou-se por intermédio do Departamento Nacional de Energia Elétrica (DNAEE), as primeiras regulamentações através das portarias 046 e 047, de 17 de abril de 1978 e 031 de 11 de abril de 1980, onde se definiram alguns índices para verificação de continuidade do serviço de fornecimento , chamados : DEC (duração equivalente de interrupção) e FEC (frequência equivalente de interrupção), onde não se incluem interrupções inferiores a três minutos e falhas causadas na própria instalação do consumidor, que não afetem outros consumidores e os índices DEKS e FEKS, em que se analisam todas interrupções que afetem as concessionárias ou pontos de interligação alimentados pela empresa fornecedora , independente de sua origem. Incluem-se nesta análise as interrupções programadas, (excetuando-se aquelas inferiores a um minuto e interrupções causadas por operação de dispositivos do próprio consumidor ou falha em seus sistemas, desde que não afetem a outras empresas).

Limitou-se também as variações de tensão no ponto de entrega ao consumidor , na faixa de +5% e -7,5% da tensão nominal do sistema. Observa-se que apesar destas regulamentações não está contemplado interrupções menores que um minuto, que

podem causar desarmes na proteção das empresas e levar a uma parada nos processos industriais por horas. Em 1999, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), desenvolveu um programa chamado “ARGUS”, que objetiva monitorar em tempo real todas as falhas da concessionária pelo consumidor, instalando em seu ramal de entrada um monitor que registra qualquer anomalia no sistema da concessionária e registra esta interrupção ou distúrbio em um banco de dados acompanhado periodicamente.

Conceitua-se “energia elétrica de boa qualidade” [Bronzeado 98] como aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem-estar das pessoas.

Percebe-se por esta conceituação que qualidade de energia não esta somente associada às concessionárias, visto que podem ocorrer distúrbios por fenômenos naturais e aqueles inerentes à operação do sistema, tais como, queimadas debaixo de linhas, vandalismo nos equipamentos de distribuição, curtos-circuitos , etc.

Deseja-se que as tensões devem ser senoidais, equilibradas, com amplitude e frequência constantes. Considera-se qualquer desvio na forma de onda de tensão como qualidade de energia. Desta forma, pode-se agrupar os principais fenômenos eletromagnéticos associados à qualidade de energia em:

- Variações instantâneas de tensão;
- Variações momentâneas de tensão;
- Variações sustentadas de tensão;
- Variações momentâneas de frequência;
- Distorção harmônica total, flutuação de tensão, cintilação e desequilíbrio de tensão.

Variações instantâneas de tensão : São variações súbitas do valor instantâneo da tensão.

Incluem-se neste tipo de anomalia:

- Surtos de tensão : Normalmente causados por descargas atmosféricas;
- Transitórios oscilatórios de tensão : Causados por chaveamentos de equipamentos e linhas de transmissão;
- Cortes de Tensão : Originados por curtos-circuitos fase-fase, durante o processo de comutação de conversores, por serem periódicos, são analisados como distorção harmônica, a figura 9.1 ilustra esta variação conhecida também por Efeito Notch;

Na tabela 9.1 ilustra-se algumas características relacionadas com a variação instantânea da tensão [Gama 98]:

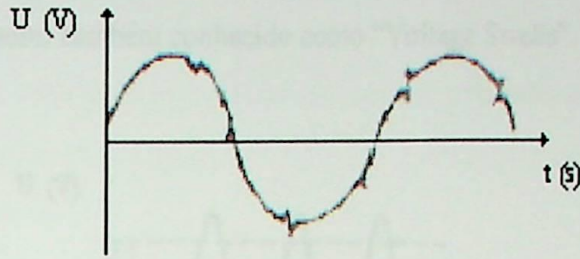


Figura 9.1 – Efeito Notch

Tabela 9.1 – Características das Variações de Tensão

Variações instantâneas da tensão	Conteúdo Espectral	Duração	Amplitude da Tensão
Surto de Tensão	Nanosegundo	5 ns	-
	microsegundo	1 μ s	-
	milissegundo	0,1 ms	-
Transitórios Oscilatórios de Tensão	Frequência Baixa	< 5 kHz	0 a 4 pu
	Frequência Média	5 até 500 kHz	0 a 8 pu
	Frequência Alta	0,5 até 5 MHz	0 a 4 pu

Variações momentâneas de tensão : São variações momentâneas do valor eficaz da tensão entre dois níveis consecutivos, com duração incerta e menor que um minuto.

- Subtensões ou afundamentos momentâneos de tensão : Decréscimos do valor eficaz da tensão, em uma ou mais fases para valores entre 10 e 90% do valor nominal com duração entre ½ ciclo e 1 minuto. A figura 9.2 ilustra este fenômeno também conhecido como “Voltage Sags”.

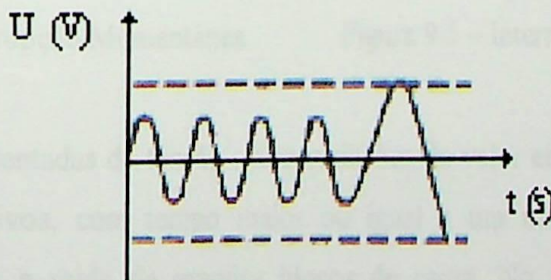


Figura 9.2 – Efeito Sags

- Sobretensões ou elevações momentâneas de tensão : Crescimento do valor eficaz da tensão em uma ou mais fases, para valores superiores a 110% da tensão nominal com duração entre $\frac{1}{2}$ ciclo e 1 minuto. A figura 9.3 ilustra este fenômeno também conhecido como “Voltage Swells”.

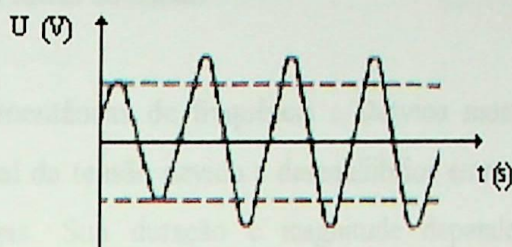


Figura 9.3 – Efeito Swells

- Interrupções momentâneas de tensão : Decréscimo do valor eficaz da tensão, em uma ou mais fases, para valores inferiores a 10% do nominal com duração entre $\frac{1}{2}$ ciclo a 1 minuto. Podem dividir-se em : interrupções de curtíssima duração (entre $\frac{1}{2}$ e 30 ciclos), curta duração (entre 30 ciclos e 3 segundos) e temporária (entre 3 segundos e 1 minuto). Na figura 9.4 e 9.5 ilustram-se as interrupções de curta duração e temporária, respectivamente.

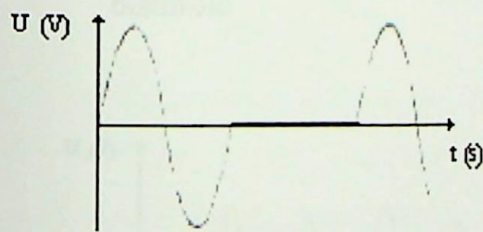


Figura 9.4 - Interrupção Momentânea

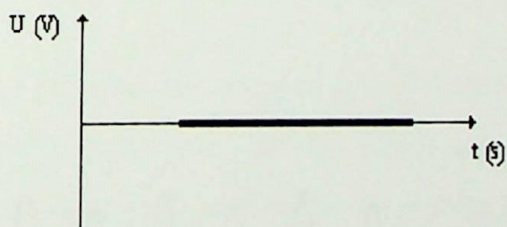


Figura 9.5 – Interrupção Temporária

Variações sustentadas de tensão : São variações do valor eficaz da tensão entre dois níveis consecutivos, com tempo maior ou igual a um minuto, normalmente, causados por entrada e saída de grandes blocos de carga. No sistema em análise, relacionam-se a entrada dos geradores, abertura da conexão com concessionária, partida dos compressores de amônia, entre outros. Classificam-se da seguinte forma:

- Subtensão Sustentada : Valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal;
- Sobretensão Sustentada : Valores de tensão superiores a 110% da tensão nominal;
- Interrupção Sustentada: Valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal ou faltas de tensão.

Variações momentâneas de frequência : Desvios momentâneos do valor da frequência fundamental da tensão devido a desequilíbrios entre a geração e a demanda solicitada pelas cargas. Sua duração e magnitude dependem essencialmente da dimensão do desequilíbrio, da característica dinâmica da carga e do tempo de resposta do sistema de geração às variações de potência.

Outros Distúrbios : São distúrbios “quase permanentes” causados pela operação de cargas não-lineares. Citam-se os mais comuns.

- Distorção harmônica total (THD/DHT) : Termo utilizado para quantificar o nível de distorção da forma de onda de tensão ou corrente em relação à forma de onda ideal (senoidal) à frequência fundamental.
- Flutuação de tensão : Variações de tensão sistemáticas e intermitentes dentro da faixa de 95 a 105% da tensão nominal. Na figura 9.6 ilustra-se este distúrbio

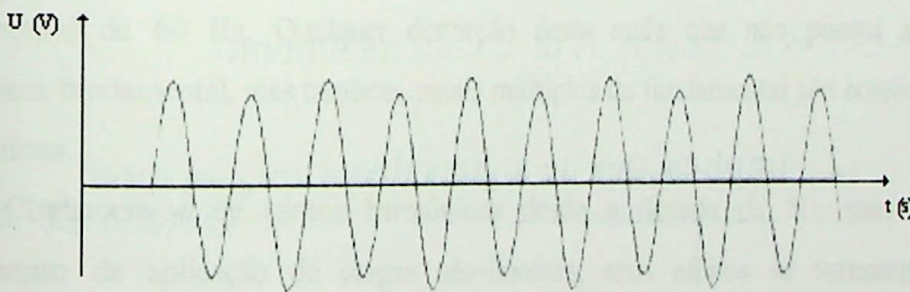


Figura 9.6 – Flutuação de Tensão

- Cintilação – É a impressão visual da variação do fluxo luminoso em lâmpadas submetidas a flutuações de tensão do sistema elétrico. Não se

considera como problema de qualidade de energia e se conhece este efeito pelo nome de “flicker”.

- Desequilíbrio de tensão – É a razão entre a componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva da tensão em um sistema trifásico. Considera-se prática, mas incorreta, medir-se o desequilíbrio de tensão através das magnitudes das tensões de fase, sem considerar os ângulos de fase entre elas.
- Ruído – Sinal elétrico indesejável oriundo de outros equipamentos. É um sinal esporádico e ilustra-se sua característica típica na figura 9.7.

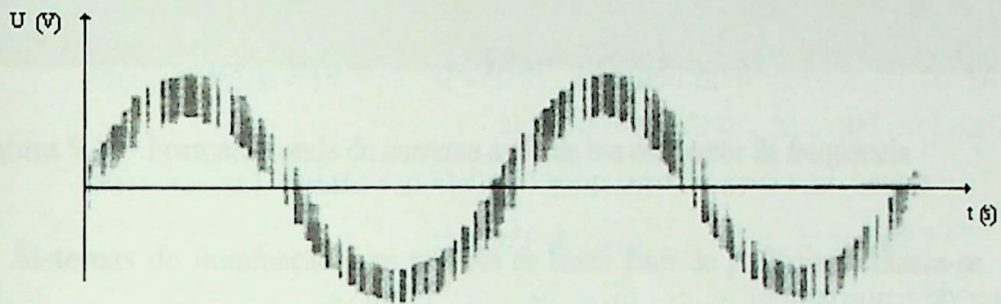


Figura 9.7 – Ruído de um sinal elétrico

IX.3 – O EFEITO “HARMÔNICOS”

Gera-se energia elétrica em ondas perfeitamente senoidais e com freqüência fundamental de 60 Hz. Qualquer distorção desta onda que não possui somente freqüência fundamental, mas também, sinais múltiplos da fundamental são considerados harmônicos.

Conhecem-se os efeitos harmônicos desde a década de 50, mas com o crescimento de aplicação de cargas não-lineares, seus efeitos se tornaram mais acentuados. Na indústria de alimentos, têm-se como principais fontes de harmônicos :

- Acionamentos de velocidade controlada – Ilustra-se forma de onda típica na figura 9.8.

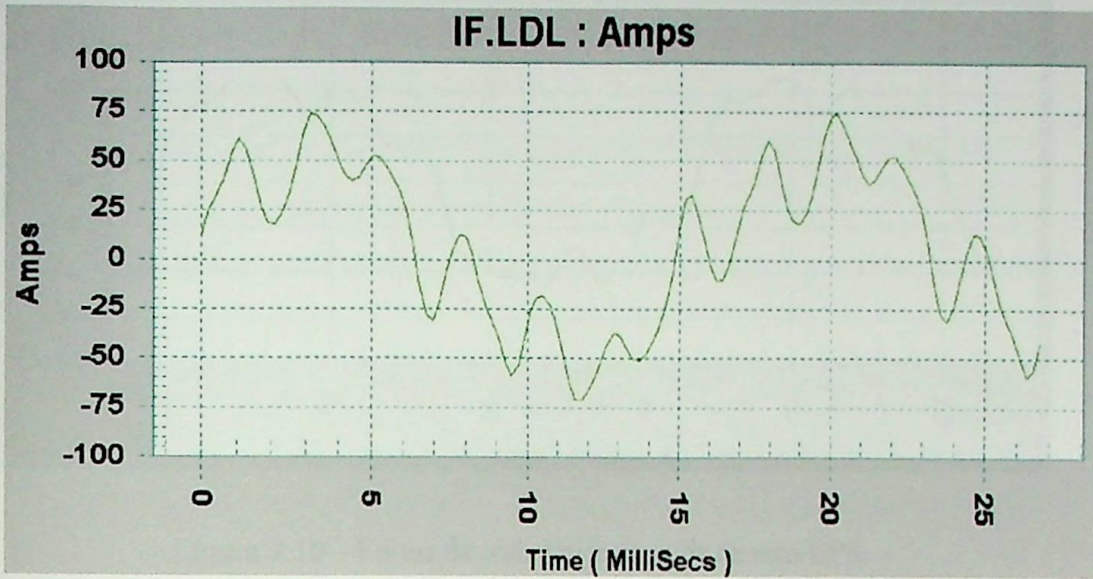


Figura 9.8 – Forma de onda de corrente saída de um conversor de frequência

- Sistemas de iluminação com reatores de baixo fator de potência - Ilustra-se forma de onda típica na figura 9.9.

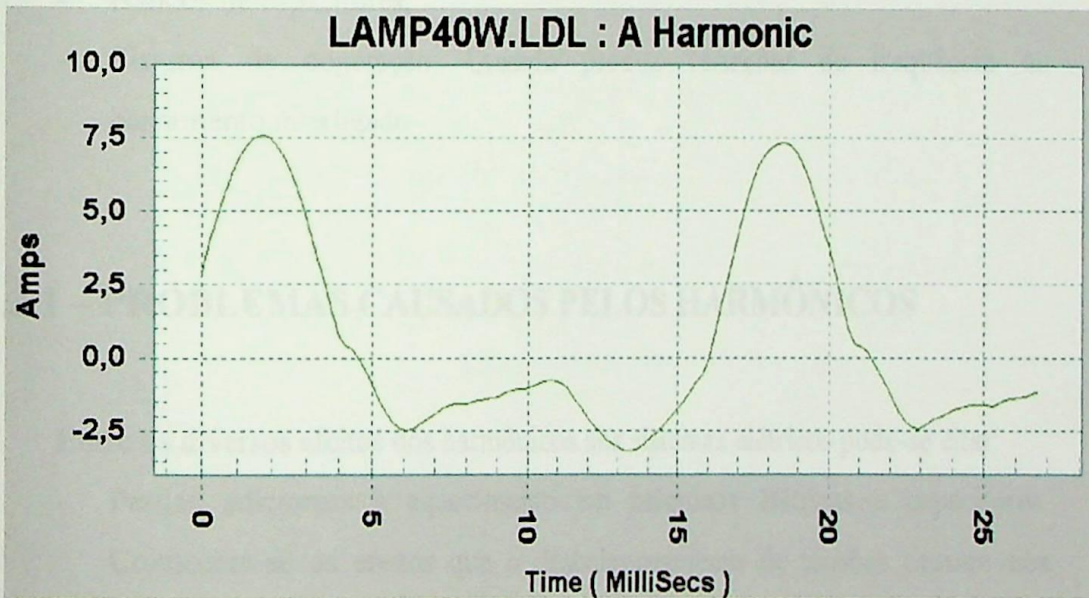


Figura 9.9 – Forma de onda típica lâmpada 40W com reator de baixo fator de potência

- Sistemas alimentados por UPS's (no-break's) – Ilustra-se forma de onda típica na figura 9.10.

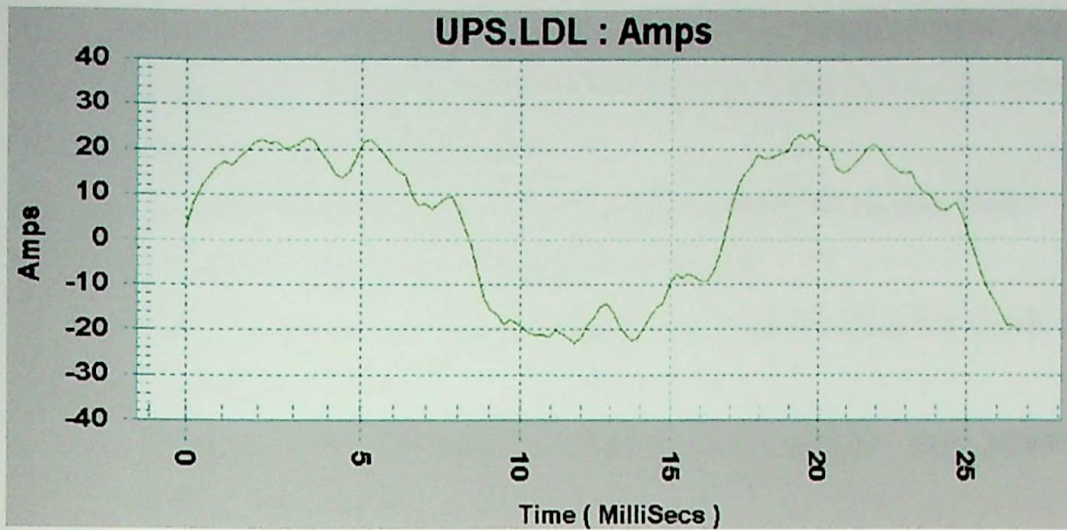


Figura 9.10 – Forma de onda típica na saída de uma UPS

- Carregadores de Baterias de Empilhadeiras;
- Microcomputadores – Em [Koval 97], apresenta-se estudo específico sobre as características de qualidade de energia em sistemas com vários computadores.;
- Bancos de capacitores;
- Sistema de cogeração: Quando produz variações de frequência ao barramento interligado

IX.3.1 – PROBLEMAS CAUSADOS PELOS HARMÔNICOS

Entre os diversos efeitos dos harmônicos aos sistemas elétricos pode-se citar:

- Perdas adicionais e aquecimento em máquinas elétricas e capacitores. Conhecem-se os efeitos que o desbalanceamento de tensões causam nos motores elétricos, devido a um aumento das perdas . Em [Mendes 98] apresenta-se um gráfico (Figura 9.11) que ilustra este efeito e em [EFEI/FUPAI 99] apresenta-se a tabela 9.2 onde se têm algumas características afetadas;
- Distorção de tensão nos barramentos, principalmente aqueles que alimentam grande numero de conversores;
- Sobretensões devido à ressonância;
- Interferências nos sistemas de comunicação e circuitos telefônicos;

- Disparos intempestivos em disjuntores. Nos termomagnéticos com disparador térmico e nos eletrônicos disparos aos valores de crista das ondas;
- Aumento da corrente de neutro;
- Aumento de perdas em condutores principalmente devido ao efeito “skin”.
- Redução da vida útil de lâmpadas incandescentes;
- Mal funcionamento de instrumentação nos processos industriais devido à flutuação de tensão;
- Desarmes das proteções do sistema de paralelismo para garantir operacionalidade da planta;
- Falhas esporádicas em PLC's , devido a falsas passagens em zero do sinal de tensão;

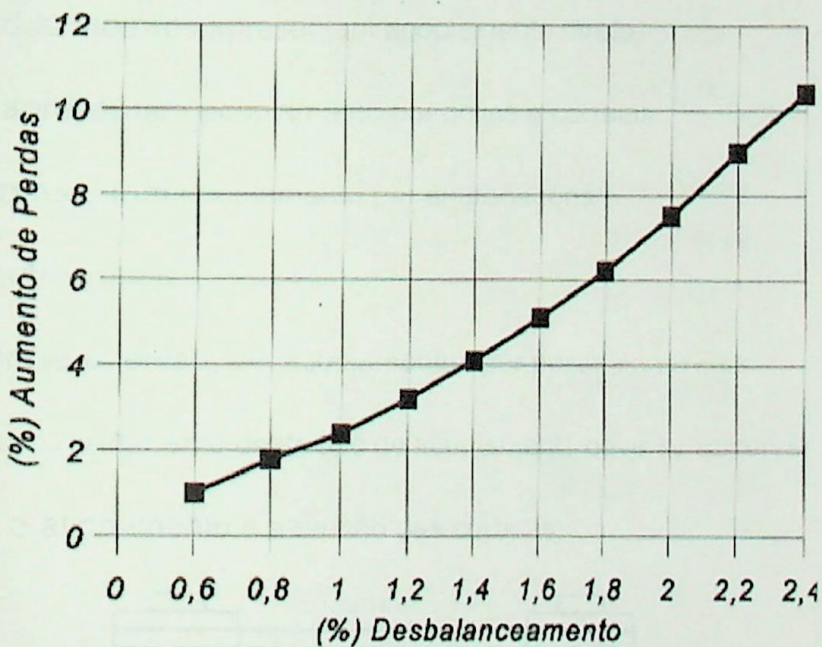


Figura 9.11 – Desbalanceamento x Aumento de Perdas

IX.4 – MEDIDAS PREVENTIVAS

Eliminar-se harmônicos é uma tarefa complexa. Em [Gray 96], recomenda-se como técnicas de controle utilizar: impedâncias de linha, filtros passivos e ativos e multiplicação de fases com aplicação de retificadores polifásicos. Existem no mercado ,

filtros específicos para determinadas frequências, mas quando o sinal é composto por diversas ordens de harmônicos, a aplicação se torna extremamente onerosa e em alguns casos impraticável.

Tabela 9.2 – Desempenho de motores de indução em função da tensão aplicada

CARACTERISTICA	Variação da tensão nominal	
	110%	90%
Torque de partida, máximo e de operação	Aumenta 21%	Diminui 19%
Rotação Síncrona Plena carga Escorregamento	Não se altera Aumenta 1% Diminui 17%	Não se altera Diminui 1,5% Aumenta 23%
Rendimento Plena carga 3/4 de carga 1/2 carga	Aumenta 0,5 a 1 ponto Pequena mudança Diminui 1 a 2 pontos	Decresce 2 pontos Pequena mudança Aumenta 1 a 2 pontos
Fator de potência Plena carga 3/4 carga 1/2 carga	Diminui 3 pontos Diminui 4 pontos Diminui 5 a 6 pontos	Aumenta 1 ponto Aumenta 2 a 3 pontos Aumenta 4 a 5 pontos
Corrente Partida Plena carga	Aumenta 10 a 12% Diminui 7%	Diminui 10 a 12% Aumenta 11%
Temperatura	Diminui 3 a 4 °C	Aumenta 6 a 7 °C
Capacidade de Sobrecarga	Aumenta 21%	Diminui 19%
Ruído de origem magnética	Aumenta levemente	Diminui levemente

Desta forma, utiliza-se na unidade em estudo a filosofia de acompanhamento de algumas grandezas nas diversas áreas, com medições semanais ou quinzenais de :

- Nível de tensão : Deve permanecer dentro do limite de $\pm 5\%$
- Distorção harmônica total de corrente : Deve ser no máximo 5% nos barramentos de centro de controle de motores;

- Fator de potência : Deve ser maior que 0,92 em todos os painéis;
- Medição das tensões neutro-terra : Devem ser menores que 3 V .

Quando se identifica qualquer alteração dos parâmetros desejados nas medições, utiliza-se as ferramentas da qualidade para identificação da causa e solução do problema para evitar maiores impactos ao sistema de energia. Como exemplo, cita-se um barramento que apresentou THDi de 16,7%, após criteriosa análise identificou-se defeito no filtro de RFI do conversor de frequência.

Outro exemplo, para ilustrar-se a metodologia, quando o nível de tensão da área de laboratório apresentou redução sem causa aparente. Após diagnóstico, identificou-se no circuito que o alimenta, através de no-break, falha na placa inversora do equipamento.

Deve-se ter cuidados especiais com as conexões de aterramento dos equipamentos. Medições periódicas das malhas de aterramento e acompanhamento das tensões fazem parte desta rotina. Em [Naylen 93] e [Reid 96] comenta-se sobre a importância do aterramento e boas conexões para o sucesso de uma aplicação de Velocidade Variável.

Na planta em estudo, efetuou-se um estudo de estabilidade dinâmica e seletividade para melhor ajustar as proteções às condições de partida dos equipamentos e proporcionar dados para a implantação de sistema de rejeição de cargas e controle de demanda confiáveis e que quando em operação, causem o menor distúrbio possível ao sistema.

IX.5 – IMPACTO ECONÔMICO DOS HARMÔNICOS

Sabe-se que os harmônicos muitas vezes são gerados pelas medidas de conservação aplicadas, como : instalação de conversores, lâmpadas compactas, banco de capacitores, controles de iluminação, etc.

Em [Gama 98], apresenta-se nova proposta tarifária para calcular-se o custo do fornecimento de energia elétrica frente a ambientes distorcidos. Observa-se na figura 9.11 o impacto que a DHT provoca no custo da energia .

O impacto ainda não mensurável está na redução da vida útil de equipamentos, falhas inesperadas causando perda de produção, desarmes sem causa aparente e comprometimento do funcionamento de sistemas com medições irreais.

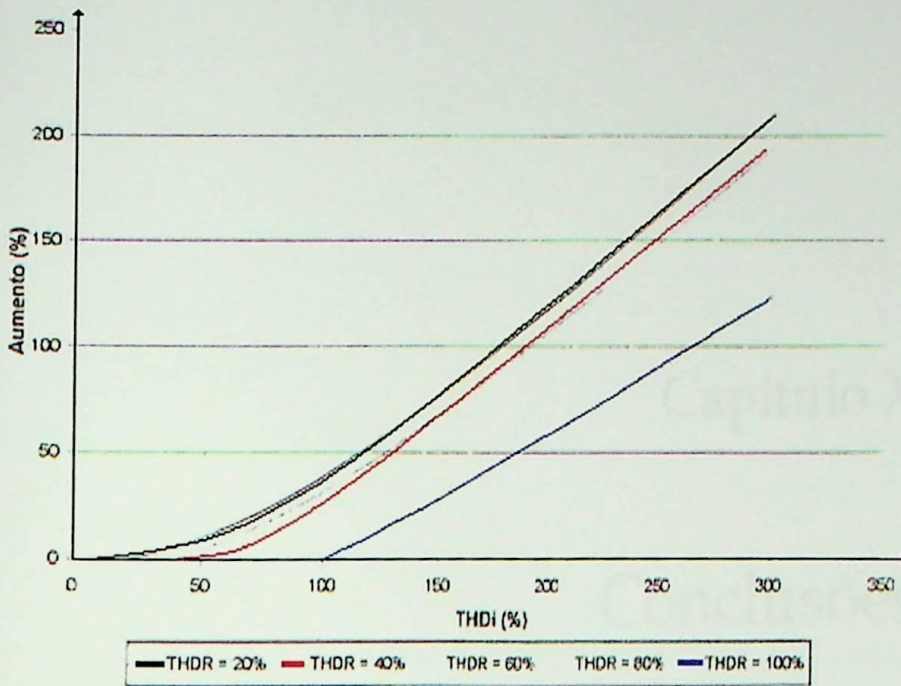
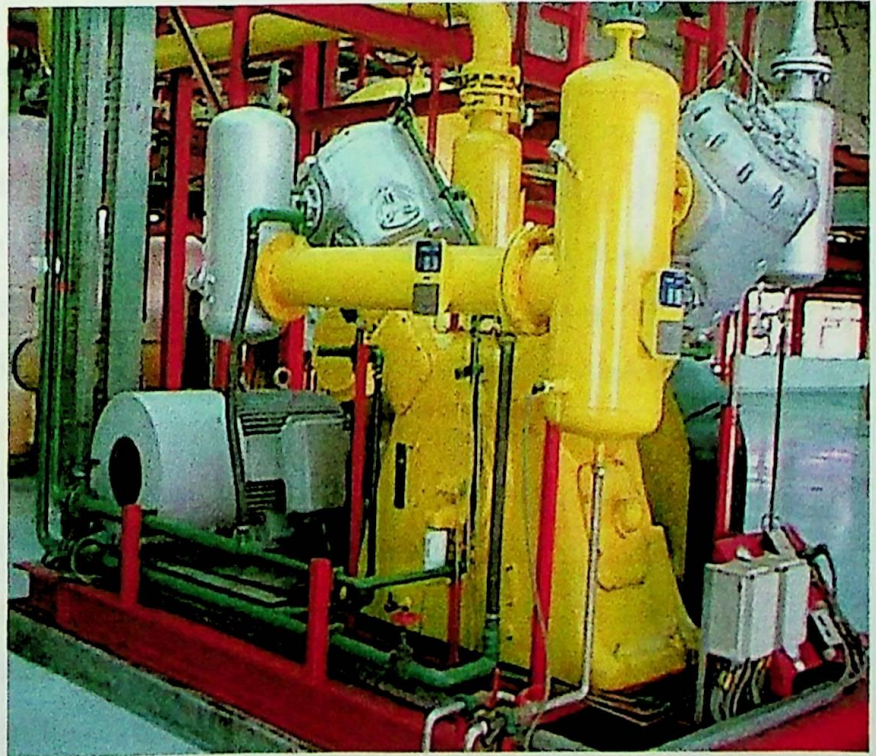


Figura 9.11 - Aumento no custo do consumo devido a vários valores de Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi)

CONCLUSÕES

Capítulo X

Conclusões



CONCLUSÕES

Procurou-se neste trabalho contribuir na avaliação das medidas de conservação possíveis dentro da indústria, em especial a industria alimentícia.

Apresentaram-se vários casos práticos implantados e seus resultados. Deve-se ressaltar que a avaliação da viabilidade ou não de uma medida de conservação se relaciona com a política técnico-administrativa de cada empresa.

Existem outras ações implantadas e que não foram relatadas neste trabalho e algumas em fase de estudo para implantação. Este trabalho iniciado em 1996, dentro do programa de Conservação de Energia da empresa têm obtido bons resultados.

O parâmetro utilizado para medição da eficácia do programa é o consumo mensal dividido pela produção líquida. Este valor está diretamente relacionado ao volume de produção e obteve-se os seguintes resultados nos últimos anos. 1997 – 9,85 kWh/hl, 1998 – 9,19 kWh/hl, 1999 – 9,69 kWh/hl (ocorreu redução em torno de 15% no volume em relação ao ano anterior) e tendência de 2000 – 9,1 kWh/hl.

Assim, demonstra-se que uma política de conservação traz efetivamente redução nos custos, visto que, 0,01 kWh/hl equivale a aproximadamente R\$ 10.000,00 no custo da energia. Para tal necessita-se de equipe treinada, avaliações de performance através de instrumentos adequados e desenvolvimento tecnológico dos equipamentos do mercado para atender as inovações pretendidas.

Com o crescente aumento do custo da energia elétrica e a possibilidade de racionamento nos próximos anos, desperta a todos o interesse na área de conservação de

Capítulo X - Conclusões

energia. Este estudo visou acrescentar aos trabalhos já existentes, novos casos aplicados e algumas tecnologias ainda não muito exploradas.

Uma medida de futuro próximo as grandes empresas será o desenvolvimento de equipes direcionadas a este tema e a implementação de ações de conservação em seus maiores parques fabris.

Cada tipo de indústria caracteriza um cenário com sua diversidade de equipamentos e uma priorização em medidas de conservação específicas podem trazer retorno bem satisfatórios.

Sugere-se o desenvolvimento de trabalhos similares para empresas com potencial de conservação elevados como : siderúrgicas, petrolíferas, químicas, entre outras.

Bibliografia



Bibliografia



BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 5416 - “Aplicação de cargas em transformadores de potência. Procedimento”, Brasil, 1981.

ABNT NBR 5440 - “Transformadores para redes Aéreas de Distribuição”, Brasil, 1984.

ABNT NBR 5456 - “Eletricidade Geral”, Brasil, 1987.

ABNT – NBR 7094

AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA, “Procedimentos de Manutenção para Economia de Energia”, São Paulo , 1993.

BODSON, J.M. ; DE HOE, J.M.; NEYENS,J. ; “Economia de energia e outras vantagens dos acionamentos de velocidade variável”- Revista Eletricidade Moderna, pp 74-85, Brasil, Novembro, 1995.

BONNETT, A.H. , “Understanding the Changing Requirements and Opportunities for Improvement of Operating Efficiency of AC Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.29, Nº 3, pp 600-609, May/June , 1993.

BONNETT, A.H. ; “Reliability Comparison Between Standard and Energy Efficient Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, Nº 1, pp 135-142, January/February , 1997.

BORTONI,E.C.; TIAGO FILHO,G.L.; SILVA, B.C. , “Controle de bombas centrifugas: Válvulas ou acionamento eletrônico? ”- Revista Eletricidade Moderna, pp 72-84, Brasil, Outubro 1998.

BRONZEADO, H.S.; RAMOS, A.J.P.; OLIVEIRA, J.C.; ABREU, J.P.G.; ARRUDA, A.C. and BRANDÃO, C.A. ; “Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições”- Revista Eletricidade Moderna, pp 50-56, Brasil, Março 1998.

BRONZEADO, H. ; LIMA, E.N. ; SILVA, D.S. - “Análise de desempenho de reatores eletrônicos e eletromagnéticos”- Revista Eletricidade moderna , pp 120-131, Brasil, Dezembro de 1999.

COGERAR – Sistemas de Energia . “Estudo Final de Cogeração de Energia – Produção de Energia Elétrica e Vapor – Caso Brahma”, Rev. 1, Abril, 1997.

COGO, J.R.; SÁ, J.S. ; OLIVEIRA, A . L.; “Economia de energia em motores de indução trifásicos”- Revista Eletricidade Moderna, pp 48-56, Brasil, Abril 1996.

CONTIN, M.C.; “Os Cuidados com o sistema de isolamento dos motores alimentados por conversores”, - Revista Eletricidade Moderna , pp 138-153, Brasil, março, 1998.

DANFOSS ; “Selection Guide – MSD Soft Starters”, catalogo MSD 1017-1835

DANFOSS A/S ; “Facts worth knowing about frequency converters”, 2ª edição , 1991

DANFOSS DO BRASIL; “MCD 3000 – Instruções de Operação “ , catalogo MG15A102, São Paulo.

EFEI/FUPAI . “Curso Tecnológico de Otimização Energética – COENE 99”, Apostilas, Itajubá , 1999.

ENERGYNEWS; www.energynews.com.br/

FARIA NETO, A . ; TORRES, G.L.; “Análise econômica da substituição de motores elétricos”- Revista Eletricidade Moderna, pp 30-37, Brasil, Fevereiro 1992.

GAMA, P.H.R.P., “A Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1998.

GLINKOWSKI, M.T.; SALON, S.; GHAFURIAN, A.R. ; KALINOWSKY, S.; YEC, A. ; “Impactos dos acionamentos de velocidade variável nos sistemas de potência”, - Revista Eletricidade Moderna, pp 106-116, Brasil, Outubro, 1995.

GRAY, J.W.; HAYDOCK, F.J., “Industrial Power Quality Considerations when Installing Adjustable Speed Drive Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, Nº 3, pp 646-652, May/June, 1996.

HAMER, P.S.; LOWE,D.M. ; WALLACE, S.E. ; “Energy-Efficient Induction Motors Performance Characteristics and Life-Cycle Cost Comparisons for Centrifugal Loads “, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, Nº 5, pp 1312-1320, September/October, 1997.

HENDERSON, R.D. ; ROSE, P.J. , “Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, Nº 3, pp 528-532, May/June 1994.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION – IEC 60947-4-2,
Suisse

KOVAL, D.O., “Power Quality Characteristics of Computer Loads”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, Nº 3, pp 613-620, May/June, 1997.

LIANG, F.; NOVOTNY,D.W.; FEI, R.W.; XU,X. , “Selection of the Pole Number of Induction Machines for Variable Speed Applications”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, Nº 2, pp 304-309, March/April, 1995.

MAMEDE FILHO, J. , “Instalações Elétricas Industriais”, 3ª edição, LTC, Rio de Janeiro, 1988.

MANZ, L. , “Applying Adjustable-Speed Drives to Three-Phase Induction NEMA Frame Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N° 2, pp. 402-407, March/April , 1997.

MASSEY, G.W. , “Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, N° 2, pp 485-489, March/April 1994.

MENDES, M.N.; “Economia de Energia em Motores Elétricos – Motores de Alto Rendimento Plus”- Centro de Treinamento WEG, Apostila TR000-48 ,Brasil, 1998.

NAILEN, R.L.; “Can Field Prove Motor Efficiency ? “, IEEE Transactions on Industry Applications , Vol.25, N° 3, pp 391-396, May/June , 1989.

NAILEN, R.L., “For a Successful ASD Installation . . . Look Beyond the Electronics”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, N° 1, pp 219-224, January/February, 1993.

NAILEN, R.L. ; “Utility Rebates for Efficient Motors – The Outlook for Demand-Side Management”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, N°1, pp 143-153, January/February , 1997.

NAKAJIMA, S.; “ Introdução ao TPM- Total Productive Maintenance”, São Paulo, 1989.

NOGUEIRA, L.A.H. and ALKMIN, J.T.D. ; “Metodologia para estimar o potencial Técnico e econômico de co-geração”- Revista Eletricidade Moderna, pp 86-95, Brasil, Abril 1996.

OLIVEIRA Jr.,N. ; NAGAI, S.E. ; “Aspectos a serem considerados na aplicação de Soft-starters”- Revista Eletricidade Moderna , pp 58-66, Brasil , Abril , 1996.

PADILLA, J.V. , “Critérios Práticos para elaboração de diagnósticos Energéticos e implantar com sucesso programas de Redução de custos e conservação de energia nas Empresas”, In: Enershow 98 – Feira e Congresso, São Paulo. Anais , 1998, pp. 15-22

POHLMEIER, B. and DRUFFNER, C. ; “Características e vantagens dos sistemas de equipamentos de baixa potência “- Revista Eletricidade Moderna, pp 44-50, Brasil, Novembro 1995.

RANGEL, L.P.S. – “Inspeção Termográfica em Instalações Elétricas”, ABB Service, 1999.

REID, W.E., “Power Quality Issues – Standards and Guidelines”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, Nº 3, May/June ,1996.

SILVA, M.V.M. – “Lâmpadas Incandescentes ou PL* Electronic ? Um estudo de caso”, In: VII Congresso Brasileiro de Energia, vol. IV, 1996, pp. 2147-2155. Anais

SILVA NETO, P.C. ; ROLIM, G.D. ; GONZAGA, N.A. ; DUARTE, D.M.; “Análise técnico-econômica da substituição de motores de baixa potência” – Revista Eletricidade Moderna, Brasil, Março 1999.

SPIRAX SARCO ; Ministério das Minas e Energia – Série Economia de Óleo Combustível , “Como otimizar o uso de condensado”, Volume 4.

SPIRAX SARCO ; Ministério das Minas e Energia – Série Economia de Óleo Combustível, ”Custo de vapor e economia de combustível”, Volume 5.

SPIRAX SARCO ; Ministério das Minas e Energia – Série Economia de Óleo Combustível , “A espessura econômica do isolamento Térmico” , Volume 8.

UFRJ/UPADI , “Curso de Especialização em Engenharia de Manutenção”, Apostilas, Rio de Janeiro, 1999.

VERBAND DEUSTSCHER ELEKTROTECHNIKER - VDE 0160 , Berlin.

VERDERBER, R.R.; MORSE, O.C., “Harmonics from Compact Fluorescent Lamps”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.29, N°3, pp 670-674, May/June, 1993

YAMACHITA, R.A . , “Conservação de Energia Elétrica utilizando Sistemas de Iluminação”, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1998.

WEG – Especificação de Transformadores – Informações Técnicas DT-11 , Brasil, 1998.

WEG – Manual para Correção do Fator de Potência , Brasil ,1998.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

DANFOSS ; “VLT 5000 – Especificações Técnicas “, catalogo MD50A828, São Paulo.

FORTES, M.Z. , “Propostas para conservação de Energia na Indústria”, In: I Congresso Sul Fluminense de Engenharia, 2000, Vassouras . Anais : Universidade Severino Sombra.

HELFONT – Catalogo de Reatores , Brasil.

NAGAI, S.E. – “Influência de Soft Starter em Power Quality”, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI , 1997.

PEREIRA, A. C. C. – “Influência dos Inversores PWM na Qualidade de Energia”, Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI, 1997.

PEREIRA, C.A.A. ; SANTÉRIO,E.L. ; LAGEMANN, V. ; “Geração e Distribuição de Vapor”, Setor de Desenvolvimento de Tecnologia de DRH – Petrobrás, 1992

PHILIPS – Noções Básicas de Iluminação , Brasil , 1988.

WEG – **Manual de Transformadores** , Brasil , 1998.

[www.inee.org.br / for/for.htm](http://www.inee.org.br/for/for.htm)