

EDIR BUENO DA SILVA

**COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM INDÚSTRIA BENEFICIADORA DE GRÃOS COM
AUTO PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa campus Alegrete.

Orientador: Prof. Dr. José Wagner Maciel
Kaehler

**ALEGRETE
2011**

EDIR BUENO DA SILVA

**COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM INDÚSTRIA BENEFICIADORA
DE GRÃOS COM AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte das atividades para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica na
Universidade Federal do Pampa.

Trabalho apresentado e aprovado em: 22 de Dezembro de 2011.
Banca Examinadora:



Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler
Orientador
Engenharia Elétrica - UNIPAMPA



Prof. Msc. Luciano Lopes Pfitscher
Engenharia Elétrica - UNIPAMPA



Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos
Engenharia Elétrica - UNIPAMPA

“Dedico este trabalho àquelas pessoas que sempre me apoiaram em toda trajetória de estudo e aprendizagem, em especial a meus pais que sempre me deram toda base e apoio para sempre seguir em frente, e também a colegas e amigos sem os quais a minha formação não teria feito sentido”

“Um homem demonstra ter verdadeira inteligência quando toma um assunto que é misterioso e grandioso por si mesmo e o desvenda e simplifica, de modo que até uma criança consiga compreendê-lo.”

John Taylor

RESUMO

O setor industrial brasileiro consome praticamente a metade da energia elétrica do país. Este vem registrando uma elevação das perdas de energia nos diferentes segmentos industriais, apesar de existirem políticas Governamentais para incentivem ao uso racional de energia e práticas de sucesso já documentadas.

O trabalho descrito neste documento foi realizado na planta industrial da Cooperativa CAAL, em Alegrete, pertencente ao setor de beneficiamento de grãos. Teve como objetivo principal analisar e propor a redução dos custos da empresa, relacionados com a fatura de energia elétrica. Buscando promover a eficiência energética industrial, ateu-se, inicialmente, na compensação dos reativos requeridos pela força motriz utilizada pelo processo industrial.

Estudos foram realizados para melhorar as condições de sua autoprodução e consumo de energia elétrica, analisando projetos, serviços de produção e pessoal envolvido.

Dados concretos foram obtidos no tratamento matemático de algumas amostras de qualidade energética obtidas em partes da planta, ou seja, naquelas onde se efetuou a intervenção prática.

Primeiramente, foi necessário um levantamento completo dos volumes de produção, dos equipamentos de beneficiamento utilizados e medidas das grandezas elétricas que conformam a indústria. A seguir procedeu-se a análise das necessidades de correção da compensação reativa, buscando a melhor composição e localização dos elementos capacitivos, suficientes para prover a correção dos problemas encontrados.

Como resultados, as melhorias propostas embasaram outras recomendações para continuidade e, principalmente, viabilidade das ações de eficiência energética a serem aplicadas na planta.

Palavras-chave: fator de potência, capacitores, energia, qualidade, indústria.

ABSTRACT

The Brazilian industrial sector consumes, practically, half of the electric power of the country. It was observed in the last years, an elevation of the energy losses in the different segments, in spite of Government politics to motivate the rational use of energy and success practices documented already.

The work described in this document was accomplished in Cooperativa CAAL's industrial plant, in Alegrete, belonging to the grains processing area. It had as main objective to analyze and to propose reductions of costs of the company with base in the study of the electric power invoices. Looking for to promote the electric energy efficiency and compensation of the reactive power requested by the driving force used in the industrial process.

Studies were accomplished to improve the conditions of the production and of the electric power consumption, through analysis of the projects, production and involved professionals.

Real data were obtained through mathematical analysis of some samples of power quality obtained in parts of the plant, in other words, in those where it occurred the practical intervention.

Firstly, it was necessary a complete register of the production volumes, the improvement equipments used and measures of the electric greatness that it conforms to the industry. Then we started with the analysis of correction of the reactive compensation, seeking the best composition and location of the capacitive elements sufficient to provide the correction of the problems found.

As results, the proposed improvements have shaped others recommendations for continuity and, especially, the viability of energy efficiency measures to be applied in the plant.

Word-keys: power factor; capacitors; energy, quality, industrial.

ÍNDICE DAS FIGURAS

FIGURA 1: EXEMPLO DE BANCO DE CAPACITORES COM AS RESPECTIVAS PROTEÇÕES E CONTROLE.....	16
FIGURA 2 – DISPOSITIVOS E CIRCUITOS DE CONTROLE TÍPICOS: (A) CONEXÃO ESTRELA ATERRADO; (B) CONEXÃO ESTRELA FLUTUANTE, E (C) CONEXÃO ESTRELA-ESTRELA.....	19
FIGURA 3 – EXEMPLO DO CÁLCULO DO RISCO DE RESSONÂNCIA.....	20
FIGURA 4: RELAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA ATIVA E REATIVA ALIMENTANDO CARGAS INDUTIVAS.....	27
FIGURA 5 – RELAÇÃO VARIAÇÃO DE CARGA EM MOTOR COM FP.....	28
FIGURA 6 – TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS.....	29
FIGURA 7: IMPACTO DO FATOR DE POTÊNCIA DO DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES ELÉTRICOS.....	31
FIGURA 8 – DIAGRAMA METÓDICO DE ESTUDO DA PLANTA INDUSTRIAL.....	37
FIGURA 9: VISTA AÉREA DA PLANTA INDUSTRIAL CAAL.....	38
FIGURA 10: FOTO DA FACHADA DA UTE - CAAL.....	39
FIGURA 11: VISTA AÉREA DE DETALHES DA PLANTA INDUSTRIAL CAAL.....	40
FIGURA 12: DETALHE DO SETOR ALIMENTADO PELA SUBESTAÇÃO 4.....	40
FIGURA 13: DETALHE DO SETOR ALIMENTADO PELA SUBESTAÇÃO 1.....	41
FIGURA 14: FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO DA PLANTA CAAL.....	42

FIGURA 15: DIAGRAMA MULTIFILAR SUBESTAÇÃO 1 CAAL.....	45
FIGURA 16: FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO DA PLANTA CAAL.	47
FIGURA 17A: DADOS DE MULTAS POR ULTRAPASSAGEM DE FER E DEMANDA CONTRATADA – 2009.....	50
FIGURA 17B: DADOS DE MULTAS POR ULTRAPASSAGEM DE FER E DEMANDA CONTRATADA – 2010.....	51
FIGURA 17C: DADOS DE MULTAS POR ULTRAPASSAGEM DE FER E DEMANDA CONTRATADA – 2010.....	51
FIGURA 18: MONTAGEM QUADRO DE COMPENSAÇÃO QC SUB 4. (A) VISTA GERAL; (B) DETALHES BARRAMENTO; (C) QC MONTADO; (D) BANCO DE CAPACITORES MONTADOS EXTERNAMENTE AO QUADRO.....	54
FIGURA 19: MOSTRADOR DE FP DO QUADRO DE COMPENSADORA SUBESTAÇÃO 4.	56
FIGURA 20: ANÁLISE DA POTÊNCIA ATIVA COM CARGAS APENAS NO TRAFIO 225 KVA.	57
FIGURA 21: ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA COM CARGAS APENAS NO TRAFIO 225 KVA.....	58

ÍNDICE DAS TABELAS

TABELA 1: COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DE CONTROLES DE CAPACITORES.....	18
TABELA 2: ESCALA DE ENGENHO E POTÊNCIA INSTALADA.....	23
TABELA 3: ESCALA DE ENGENHO E POTÊNCIA INSTALADA.....	23
TABELA 4: DADOS DOS TRANSFORMADORES DA PLANTA ELÉTRICA CAAL.....	43
TABELA 5: DADOS DOS TRANSFORMADORES DA PLANTA ELÉTRICA CAAL.....	43
TABELA 6: DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS DO SISTEMA ELÉTRICO DA PLANTA INDUSTRIAL CAAL EM OUTUBRO DE 2011.....	44
TABELA 7: DESCRITIVO DOS ITENS ENCONTRADOS NA SUBESTAÇÃO 1	46
TABELA 8: DADOS DOS TRANSFORMADORES ELÉTRICOS DA PLANTA INDUSTRIAL CAAL EM OUTUBRO DE 2011.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS

P	- Potência elétrica – watt [kW]
V	- Tensão elétrica – volt [kV]
i	- Corrente elétrica – ampère [A]
I_o	- Corrente a vazio do motor (para carregamento 0 %)
I_n	- Corrente nominal [A]
FP	- Fator de Potência
$\cos \varphi$	- Fator de Potência
E	- Energia elétrica – quilowatt-hora [kWh]
η	- Eficiência nominal do motor [% ou PU]
S	- Potência aparente – volt-ampère [VA]
C	- Capacitância – farad (F)
Q	- Potência reativa – volt-ampere [VAr]
E	- Tensão nominal [V]
I_s	- Corrente aparente [A]
FDR	- Faturamento da demanda de reativo excedente
FER	- Faturamento do consumo de reativo excedente
THD	- Distorção total de harmônicas de tensão – por cento [%]
F	- Fator de multiplicação para cálculo de FP
V_{FF}	- Tensão fase-fase [V]
I_{nc}	- Corrente nominal do capacitor [A]
I_{nf}	- Corrente para proteção curto-circuito capacitor [A]
E_p	- Tensão no primário transformador [V]
E_s	- Tensão no secundário transformador [V]
P_n	- Potência nominal transformador [kW]
P_{cc}	- Potência de curto-circuito transformador [kW]
I_{mag}	- Corrente de magnetização transformador [A]
Z	- Impedância do transformador – ohms [Ω]

E_{CC}	- Tensão curto-circuito transformador [V]
I_{CC}	- Corrente de curto-circuito secundário transformador [A]
P_{CC}	- Potência curto-circuito secundário transformador [kW]
$I_{RMS_{máx}}$	- Corrente eficaz máxima [A]
X_C	- Reatância capacitiva [Ω]
f_o	- Suporte a picos de tensão de alta-frequência
sc	- Curto-circuito alimentação
c	- Referente a capacitor
f_r	- Frequência de ressonância
kVA_{sc}	- Potência de curto-circuito (trifásico)
kVA_c	- Potência do banco de capacitores

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABELAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contexto geral dos insumos.....	14
1.2 O impacto de energia elétrica no beneficiamento de grãos	15
1.3 Da aplicação de capacitores em Sistemas Produtivos Industriais.	16
1.4 Sobre este trabalho.....	21
2 COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM INDÚSTRIA BENEFICIADORA DE GRÃOS COM AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	22
2.1 Uso da energia elétrica no beneficiamento de grãos	22
2.2 Preocupação pela eficiência energética na indústria.	24
2.3 Exemplos de ações que podem ser empregadas para melhorar a eficiência energética.....	25
2.4 Distribuição e manobra da energia gerada oriunda da queima de casca de arroz. ...	26
2.5 Tarifação de energia elétrica.....	26
2.6 A problemática do baixo fator de potência na indústria de beneficiamento de grãos 27	
2.6.1 Principais causas de um baixo FP.....	27
2.6.2 Consequências de um baixo FP.....	29
2.7 Como melhorar o fator de potência	30
2.8 Os bons resultados de um alto FP.....	30
2.9 Forma de Faturamento do Fator de Potência.....	31
2.10 Forma de avaliação de Fator de Potência	33
2.10.1 Levantamento de dados:	33
2.10.1.1 Transformador	34
2.10.1.2 Medições.....	34
2.10.2 Conta de energia elétrica (12 meses).....	35
2.11 Harmônicas.....	35

2.12	Determinação da potência reativa.....	35
2.12.1	Cálculo do capacitor	36
2.12.2	Condutores:.....	36
3.	DIAGNÓSTICO E DEFINIÇÃO DA LINHA DE BASE NA PLANTA CAAL	37
3.1	Levantamento das Instalações Físicas	38
3.1.	Funcionamento Operacional da Planta.....	45
3.2	Levantamento do consumo de energia elétrica na Empresa.....	47
3.3	Levantamento do sistema elétrico de potência da planta	48
3.3.1	Levantamento de dados e necessidades:.....	48
3.3.1.1	Transformador:	49
3.3.1.2	Medições:.....	50
3.3.1.3	Faturas de energia elétrica:	50
3.3.1.4	Harmônicas:	52
3.3.2	Problemas iniciais de eficiência encontrados:.....	52
3.4.1.	Propostas pontuais de solução para alguns dos problemas encontrados	53
3.3.3	Solução de problemas iniciais	53
3.3.4	Estudos de compensação da subestação 1 (Trafo 225kVA):.....	56
3.3.5	Resultados obtidos com a aplicação da solução	60
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXOS	66

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho objetiva mostrar o quanto impacta o uso inadequado da energia elétrica, em particular na inadequada compensação dos reativos, no beneficiamento de grãos. E da necessidade de se obter maior eficiência energética com o uso racional da energia no processo produtivo por meio de estudo prático de uma planta industrial real.

Tomou-se por base a metodologia aplicada à correção de reativos em subestações de energia elétrica pelas técnicas já existentes e difundidas.

A análise dos problemas e a solução proposta orientaram-se pela praticidade da intervenção que propiciaria melhor custo-benefício no curto espaço-tempo disponível.

O presente estudo de caso pretende aplicar e avaliar, pelo período que for permitido, ações de eficiência energética na planta industrial escolhida.

Tomando por análise algumas das opções pela melhoria do consumo de insumos energéticos, optou-se por acompanhar trabalho já em andamento para correção de reativos e sugerir plano de ação para soluções ainda a serem aplicadas.

1.1 Contexto geral dos insumos

Conforme citado por Solo (2006), no Brasil, em torno de 76,5 % da energia elétrica vêm das de hidroelétricas, enquanto 13 % de termelétricas, 2,5 % de origem nuclear e 8 % são de importação. No mundo, 39,0 % da energia elétrica origina do carvão mineral, 19,1 % do gás natural, 16,2 % hidráulica e 16,6 % nuclear. Isso coloca o Brasil em condição privilegiada em relação à utilização de energia limpa.

1.2 O impacto de energia elétrica no beneficiamento de grãos

A alta do preço do barril de petróleo no mercado internacional, as limitações e os custos da energia hidroelétrica e as pressões sócio-ambientais para a adoção de fontes de energias alternativas deram à biomassa um papel de destaque no suprimento de parte da demanda energética (RIBAS, 2008).

Para Diniz et al (2004), o aproveitamento de resíduos florestais e agrícolas vem se tornando cada vez mais atrativo, dada a característica de não contribuir para o fenômeno do aquecimento global, constituir fonte renovável de combustíveis limpos e de insumos para a indústria.

De acordo com Foletto (2005), na indústria do arroz têm-se, como subproduto mais volumoso, as cascas de arroz, as quais podem ser aproveitadas de diversas maneiras. A geração de energia através da queima da casca de arroz é uma alternativa praticável do ponto de vista tecnológico, viável do ponto de vista econômico e ética do ponto de vista ecológico, uma vez que existe tecnologia para a conversão, a matéria- prima é abundante na região e todo CO₂ produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre.

A produção de arroz gera grande quantidade de casca, podendo ser utilizada de maneira sustentável na autoprodução de energia térmica e elétrica. No Brasil, o potencial de geração de eletricidade a partir da casca de arroz está entre 250 e 510 MW (MAYER et al., 2007).

A relação eficiência energética por cogeração de energia elétrica é muito atrativa do ponto de vista técnico, mas, como se verá adiante, ainda pouco aproveitada.

A oportunidade de realizar uma observação *in loco* de uma planta industrial de beneficiamento de arroz que pretende ser autossustentável em energia elétrica mostrou-se a motivação do trabalho por ser tema de interesse crescente e de aplicação viável e necessária.

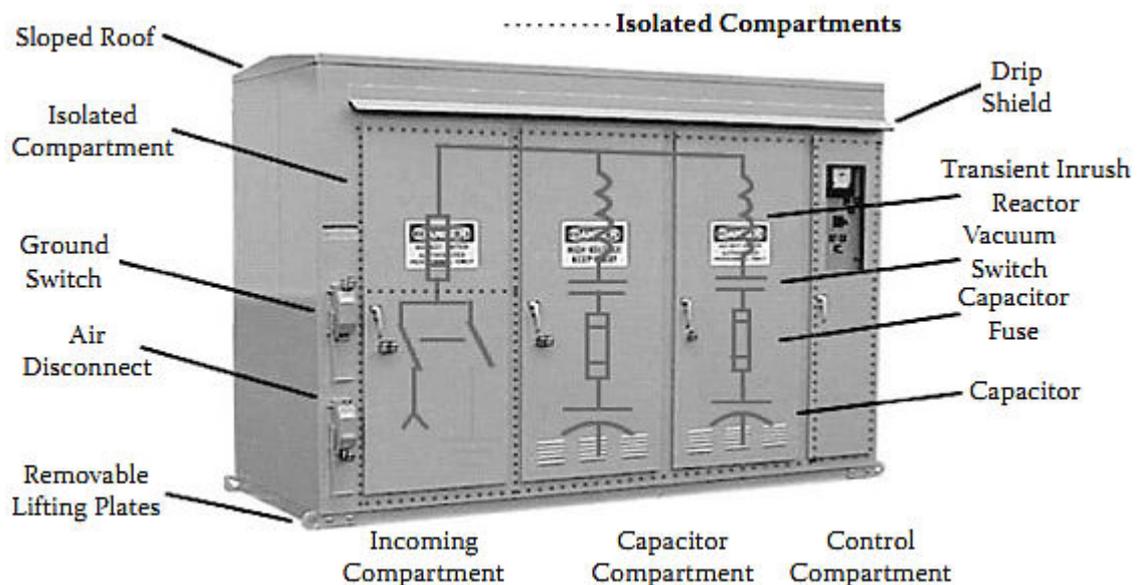
O objetivo é de acompanhar problemas reais da fase de implantação de um projeto em tempo real, procurando observar a dinâmica das ações, solidificando as bases teóricas sobre o assunto, tornando parte como ator de soluções.

1.3 Da aplicação de capacitores em Sistemas Produtivos Industriais.

Conforme Khan (2008) os capacitores são empregados industrialmente para corrigir o FP e tensões dentro da planta. Estes podem ser empregados individualmente atrelados à carga, em bancos (associações de capacitores) fixos ou ainda controlados.

Quando aos bancos controlados, estes precisam de um sistema de chaveamento e manobra que permitam não somente a troca de potências para adequada adaptação às cargas utilizadas como também proteção dos próprios bancos. Assim, se deve prover que o banco seja protegido contra correntes de curto-circuito e sobretensões.

Uma instalação de bancos de capacitores típica de média tensão industrial pode ser observada na Figura 1:



Fonte: KHAN.

FIGURA 1: Exemplo de banco de capacitores com as respectivas proteções e controle.

Ao se projetar bancos de capacitores uma avaliação sobre as correntes de curto-circuito e picos de tensão de alta frequência (provocados inclusive pelo chaveamento dos bancos) deve ser realizada.

As equações 1.1, 1.2 e 1.3 auxiliam na determinação da corrente eficaz máxima ($I_{RMS_{m\acute{a}x}}$), a reatância capacitiva (X_C) e o suporte aos picos de alta-freqüência (f_o) para bancos de capacitores chaveados:

$$I_{RMS_{m\acute{a}x}} = I_C \left(1 + \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVA_c}} \right) = \frac{E_{L-N}}{X_C - X_L} \left(1 + \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \right) \quad (1.1)$$

$$X_C = \frac{kV_{L-L}^2}{3MVA_c} \quad (1.2)$$

$$f_o = f_s \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVA_c}} = f_s \sqrt{\frac{I_{sc}}{I_c}} \quad (1.3)$$

Já as subscrições “sc” e “c” referem-se ao curto-circuito interno e valores atrelados ao capacitor, respectivamente.

Outras equações de projeto para fins de aplicação distintos do que aplicamos neste trabalho podem ser verificados na norma IEEE C37.012.¹

A utilização de capacitores de maior potência pode garantir um número menor de células, mas isso se reflete nas necessidades dinâmicas da carga. Caso variem muito, as cargas precisam que o banco tenha maior autonomia de chaveamento.

Ainda conforme Khan (2008) é necessária atenção especial à temperatura de operação do banco de capacitores, que estão atrelados à tensão de operação e ao ambiente de instalação. Caso da falha de uma das unidades do banco de capacitores, os restantes não devem suportar cargas que demandem mais que 110% da capacidade de tensão das unidades restantes. O sistema de controle do banco deve ser capaz, então, não só de administrar as solicitações de cargas, mas também a efetiva proteção do banco (monitorando, agindo e reportando sobre sua situação).

¹ ANSI/IEEE C37.99-2000, “IEEE Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks,” 2000.

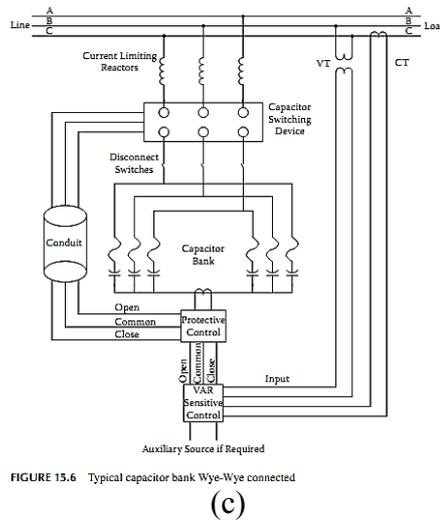
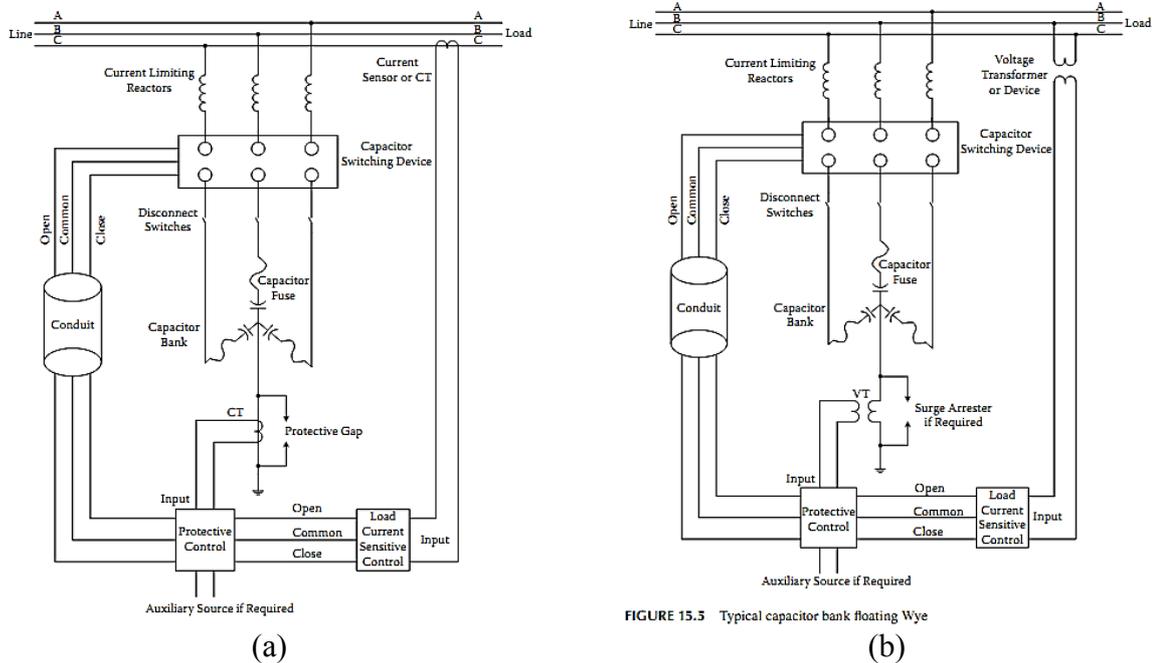
Na Tabela 1 que segue, é resumida as comparações de características de sistemas de controle empregados em bancos de capacitores:

TABELA 1: Comparação de Características Operacionais de Controles de Capacitores.

Tipos de controle	Vantagens	Desvantagens
Manual	Nenhum dispositivo de controle necessário, desde que o banco controlado seja operado através de pessoal de subestação.	Requer atividade humana na subestação.
Tempo	Por não necessitar de tensão como referência permite aplicação a qualquer ponto no circuito.	Só pode ser aplicado em alimentadores onde o fator de potência e a demanda tenham uma variação diária regular que semanalmente está repetida; seu uso é limitado a locais onde mudanças horário não causarão alta tensão em feriados ou durante outros períodos de carga anormalmente desligadas; é insensível a condições de anormais de tensão.
Temperatura	Permite aplicação a qualquer ponto no circuito; conectando capacitores quando a temperatura ambiente externa exceder que uma temperatura de <i>setpoint</i> .	Somente pode ser aplicada onde pode ser estabelecida correlação direta entre aumentos de carga e temperatura, como cargas de ar condicionado.
Tensão	Chaveia capacitores quando as tensões do sistema operarem fora das tolerâncias de tensão permissíveis.	Só pode ser aplicado onde a tensão cai apreciavelmente abaixo de carga; mais difícil coordenar com reguladores de tensão e outros bancos de capacitores controlados; requer um transformador apropriadamente localizado.
Corrente	Pode ser aplicado a qualquer ponto no circuito onde a corrente de carga pode ser monitorada; não direcional; responde a mudanças de corrente.	Requer transformador de corrente; o ajuste é ligeiramente mais complexo que outros controles.
kVAr	Mais efetivo, minimizando perdas ou FP porque monitora fundamentalmente a necessidade corrigida (kVAr); disponibiliza fontes de corrente e tensão para teste geral nos alimentadores.	Método de controle mais caro; insensível a condições de tensão anormais; requer transformador de corrente e transformador de potencial.

Fonte: KHAN, 2008.

Exemplos de dispositivos ou circuitos para proteção de sobrecarga ou falha nos bancos de capacitores estão ilustrados na Figura 2:



Fonte: KHAN.

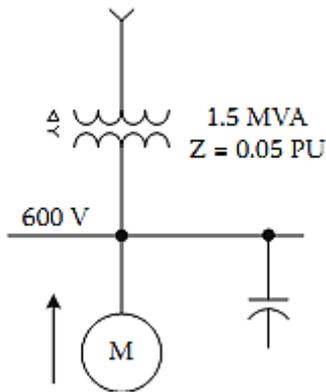
FIGURA 2 – Dispositivos e circuitos de controle típicos: (a) conexão estrela aterrado; (b) conexão estrela flutuante, e (c) conexão estrela-estrela.

Advertência deve ainda ser feita com respeito aos riscos de ressonância do banco de capacitores. A frequência de ressonância (f_r) para um banco proposto para os níveis de máximo e de mínimo é dada pela Equação 1.4:

$$f_r = f_{60} \sqrt{\frac{kVA_{sc}}{kVA_c}} \quad (1.4)$$

Onde kVA_{sc} é o valor de curto-circuito (trifásico) e kVA_c a potência do banco de capacitores.

Um exemplo de projeto e como é procedido este cálculo de kVA_c pode ser observado através da Figura 3 e das Equações 1.5 e 1.6 que seguem:



Fonte: KHAN.

FIGURA 3 – Exemplo do cálculo do risco de ressonância.

O projeto requer: Carga projetada (1,5 MVA), FP a ser corrigido (85%) e FP desejado (96%):

$$kVA_c = 1500[\sin(\cos^{-1} 0,85) - \sin(\cos^{-1} 0,96)] \quad (1.5)$$

$$kVA_c = 1500[0,527 - 0,28] = 370,5 \text{ kVA} \approx 400 \text{ kVA} \quad (1.6)$$

Com os parâmetros de: alimentação do sistema (600V) de 30MVA, alimentação presumida do motor (conectado em paralelo) de 8 MVA, tensão de barramento trifásica máxima (600V) de 38 MVA, e tensão de barramento trifásica mínima (600V) de 30 MVA. Assim, para a avaliação final de risco de ressonância temos (Equações 1.7 e 1.8):

$$f_r = \sqrt{\frac{38}{0,4}} \cong 9,7 \quad (1.7)$$

$$f_r = \sqrt{\frac{30}{0,4}} \cong 8,66 \quad (1.8)$$

O banco projetado acima é seguro desde que a tripla harmônica não ocorra, mas seria problemático se tal harmônica existisse.

1.4 Sobre este trabalho

Por haver excesso de demandas por soluções em eficiência energética na planta estudada, um único foco necessitou ser estabelecido neste primeiro trabalho.

Incluindo este CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO, o presente trabalho é apresentado em quatro capítulos. Este capítulo fornece uma visão geral do que se pretende realizar bem como da motivação pela escolha do tema, assim como o estado da arte da compensação de reativos nas indústrias.

No CAPÍTULO 2 – COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM INDÚSTRIA BENEFICIADORA DE GRÃOS COM AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – É feita uma revisão bibliográfica sobre alguns aspectos de práticas de eficiência energética e dada introdução ao tema de correção de reativos, que foi a solução aplicada sob nossa supervisão.

No CAPÍTULO 3 – DIAGNÓSTICO E DEFINIÇÃO DA LINHA DE BASE NA PLANTA CAAL – É neste capítulo onde se realizou a apresentação da planta industrial, suas carências e necessidades imediatas, bem como seu potencial.

Também neste capítulo é narrada a aplicação de uma das soluções necessárias para que a planta possa obter algum índice satisfatório de eficiência energética.

No CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS – Já neste capítulo final, é apresentado o impacto da solução aplicada (até onde o prazo permitiu avaliar), com as devidas comprovações e observações necessárias, e as soluções futuras que ainda precisam ser aplicadas à planta.

2 COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM INDÚSTRIA BENEFICIADORA DE GRÃOS COM AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

*“Quando o desempenho é avaliado, ele melhora.
Quando se avalia o desempenho e se presta contas dele,
ele melhora ainda mais rapidamente”.*

Thomas Spencer Monson

2.1 Uso da energia elétrica no beneficiamento de grãos

No processo de beneficiamento de grãos se podem destacar o uso de energia elétrica em maior volume na silagem (exaustores, ventiladores, etc.) e no acionamento dos motores de todas as demais etapas.

A queima de combustíveis sólidos (principalmente madeira, prática ainda comum em muitas regiões) no processo de silagem é uma das etapas que tem recebido atenção devido ao impacto ambiental agregado.

A casca de arroz é um resíduo agroindustrial, subproduto do beneficiamento do cereal, de extrema relevância no Brasil, tendo em vista a produção nacional que é de aproximadamente 13 milhões de toneladas, onde 46% do total são produzidos no Rio Grande do Sul (MAYER, 2006). Este potencial energético passa então a ser uma boa opção para geração de energia elétrica, em especial para a própria indústria de beneficiamento de grãos, a principal geradora de cascas.

De acordo com dados do (CUNHA, 1986), a potência instalada em um engenho de beneficiamento é de 5 kVA de capacidade por cada saca de 60 kg de arroz beneficiado, o que gera a Tabela 2. Lembrando que o regime operacional da planta, assim como o consumo de energia elétrica, varia também em períodos do ano.

TABELA 2: Escala de Engenho e Potência Instalada.

Escala (sacos/ h)	Potência instalada (kVA)
35	175
70	350
140	700

Fonte: CIENTEC, 1986

A produção nacional estimada de casca de arroz é apresentada na Tabela 3. Os cálculos efetuados para se chegar neste valor consideram o percentual de casca correspondendo a 22% da massa total do grão (CUNHA, 1986).

TABELA 3: Escala de Engenho e Potência Instalada.

Região	Produção e arroz		Produção de casca
	mil toneladas	mil sacas	mil toneladas
Nordeste	1.258,2	25.164,0	276,8
Norte	1.380,2	27.604,0	303,6
Centro-oeste	2.672,4	53.448,0	587,9
Sudeste	359,4	7.188,0	79,1
Sul	7.139,2	142.784,0	1.570,6
Rio Grande do Sul	5.877,8	117.556,0	1.293,1
Brasil	12.809,4	256.188,0	2.818,1

Fonte: Anuário Brasileiro do Arroz (2005).

Como é possível perceber pela Tabela 3, o potencial de utilização de casca de arroz como insumo energético é muito propício ao Rio Grande do Sul em reação ao restante do Brasil, o que faz questionar se este potencial está sendo devidamente aproveitado e em que condições, diminuindo, inclusive, o impacto ambiental.

“De forma associada a sua utilização energética, a cinza gerada pela queima controlada da casca de arroz pode ser usada em vários ramos industriais, tais como eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química, fabricação de células fotovoltaicas, entre outros. A casca de arroz é um resíduo de biomassa vegetal, resultante das agroindústrias de beneficiamento de arroz, tendo um Poder Calorífico Inferior” (PCI) médio de 3.200 kcal/kg (MAYER, 2006. p. 2).

Assim, a opção da Empresa foco deste estudo, pelo uso da casca de arroz como alternativa de produção de energia elétrica, é justificada pela potencialidade e benefícios observados.

Este estudo visa verificar a situação e sugerir as necessárias melhorias pontuais para aumentar a eficiência energética da planta CAAL com base na análise da qualidade da energia (consumida/ gerada), em especial o fator de potência do sistema.

2.2 Preocupação pela eficiência energética na indústria.

O setor industrial responde por 40,7% de toda energia consumida no Brasil (BEN, 2008)².

A Confederação Nacional da Indústria e a ELETROBRÁS, por meio do PROCEL Indústria (Programa de Conservação de Energia Elétrica) publicaram um diagnóstico detalhado das principais oportunidades e prioridades para o desenvolvimento do mercado de eficiência energética industrial.

De acordo com os dados da experiência nacional em eficiência energética pode ser observado com base nas necessidades pela efficientização do sistema elétrico industrial o panorama que se apresenta atualmente, reforçando a preocupação pela eficácia do uso dos insumos energéticos.

A pesquisa avaliou 13 setores da indústria referenciada pela utilização de Projetos de Eficiência Energética – PEE.³ Apresentando o Custo de Energia Conservada – CEC (duração média das ações de 10 anos e TRC (taxa de retorno de capital) de 12% a.a.), de R\$ 79,00/MWh médio. Foram analisados projetos cujo montante foi de R\$ 161 milhões.

Nos dados apresentados o setor de alimentos e bebidas possui um CEC de R\$ 73,00/MWh, o que, pelo custo marginal de expansão do sistema de energia elétrica de R\$ 138,00/MWh, torna a eficiência energética uma alternativa viável.

A pesquisa aponta ainda onde está a predominância de projetos para economia de eletricidade: troca de motores (19%), melhorias no sistema de iluminação (20%), e melhorias nos serviços de ar comprimido. Ações pela busca de efficientização de processos térmicos ocorrem com frequência bem menor (6%) apesar dos resultados expressivos nos casos de cogeração de energia.

A pesquisa cita dificuldades, como excesso de burocracia da obtenção de recursos (como os oriundos do PROCEL – Indústria e o PROESCO – BNDES), a cultura de aversão aos riscos técnicos de adoção de tecnologias novas, investimentos por racionalização competindo com demandas de outras áreas, precariedade de recursos humanos ou custos da capacitação de pessoal.

² Balanço Energético Nacional – BEN.

³ Lei 9.991/00), sob regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL

2.3 Exemplos de ações que podem ser empregadas para melhorar a eficiência energética.

No que se refere principalmente à indústria, algumas ações pontuais e gerais devem ser aplicadas na busca por uma melhor eficiência no uso de energia elétrica. Embora algumas destas ações geralmente sejam empregadas, algumas delas, em geral as mais simples, são esquecidas ou mesmo negligenciadas.

Para economia de energia elétrica com força motriz, etc.:

- Busca por contratação de fornecimento energia elétrica que mais se aproxime ao perfil de consumos da empresa, analisando, inclusive a potência a ser contratada com base em estudos do cotidiano da indústria.
- Correção do fator de potência de motores (que podem representar 60% ou mais do consumo) e transformadores;
- Reduzir ao máximo possível o consumo em horas de ponta, remanejando, inclusive, os horários de ponta para manutenções, etc.;
- Acumular frio (bancos de frio) ou calor (reservatórios térmicos);
- Não se descuidar da manutenção preventiva, inclusive limpeza;
- Não trabalhar com transformadores próximos de sua potência máxima de trabalho, onde a eficiência é muito menor, efetuando, inclusive, trocas caso estejam subdimensionados;
- Cuidar as distâncias entre subestações e cargas em virtude das perdas por queda de tensão;
- Dimensionar corretamente cabos e distribuir uniformemente cargas monofásicas quando em circuitos trifásicos;
- Evitar a utilização de energia elétrica como fonte térmica, pois possui rendimento inferior;
- Investir em automação.

Para economia de energia elétrica com iluminação (a energia para iluminação pode representar entre 20% e 25% do consumo):

- Implantar a cultura do “desligar se não em uso” em todos os níveis hierárquicos da empresa;
- Manter a limpeza do sistema de iluminação e efetuar a troca por refletores e lâmpadas mais eficientes ao local de aplicação;

- Efetuar cuidadoso estudo luminotécnico para melhor utilização da iluminação;
- Aproveitar ao máximo a luz natural;
- Utilizar cores claras e adequadas na pintura dos espaços;
- Planejar investimentos em automação e controle luminotécnico.

Sugere-se ainda a troca dos sistemas ou conservação das características dos equipamentos que garantam melhor eficiência no uso de energia elétrica, como menor desperdício e consumo. Aponta-se falta de manutenção ou estudos de avaliação como os principais inimigos da eficiência energética.

2.4 Distribuição e manobra da energia gerada oriunda da queima de casca de arroz.

Para que a biomassa possa efetivamente converter-se em energia elétrica para o sistema é necessário que na planta sejam instaladas múltiplas subestações de energia elétrica, para fins de manobra e controle desta energia gerada a ser distribuída.

A planta estudada não é desconectada permanentemente da rede elétrica da concessionária local, para fins de segurança energética, mas é autossuficiente em energia elétrica, permitindo inclusive vender seu excedente à própria concessionária que a abastece.

Ocorre que nesta atualização da planta para adequação é que houve o acréscimo de transformadores e outros elementos nas subestações instaladas, e toda rede elétrica precisa ser repensada para que a energia elétrica (produzida ou consumida) seja eficientemente utilizada.

2.5 Tarifação de energia elétrica.

A tarifação sobre energia elétrica no Brasil vem sendo construída desde a década de 30, mas está sendo aperfeiçoada efetivamente desde 2006 para permitir a livre negociação entre fornecedores e consumidores. A Lei 8.631-93, dada pelo Decreto 774-93 (vem sendo aperfeiçoada ou mesmo complementada por novas legislações), que rege o sistema de tarifação, proporcionou uma aceleração nos avanços legais para a reestruturação do atual sistema elétrico nacional.

Conhecida também por tarifa binômica (tarifação **convencional e horo sazonal**), a lei citada definiu a diferenciação entre **potência** e **energia**, tarifando-as separadamente. O sistema horo sazonal (consumo de **ponta e fora de ponta**) e os períodos do ano compreendidos entre **seco** (maio a novembro) e **úmido** (dezembro a abril) foi definido, estabelecendo valores distintos para cada definição.

2.6 A problemática do baixo fator de potência na indústria de beneficiamento de grãos

Os motores, os transformadores e outros equipamentos (geralmente indutivos) de unidades consumidoras têm como força a energia elétrica, que é utilizada de duas formas distintas: a energia reativa e a energia ativa. Observe a ilustração na Figura 4.



FIGURA 4: Relação da energia elétrica ativa e reativa alimentando cargas indutivas.

A primeira delas, a energia reativa, medida em kVAr, não realiza trabalho efetivo, mas é necessária e consumida na geração do campo eletromagnético responsável pelo funcionamento de motores, transformadores e geradores.

Tanto para o capacitor como para o indutor, energia deve ser suprida para o carregamento durante o semiciclo positivo da curva de potência. Quando a energia é devolvida pelos elementos reativos, ela não retorna à sua forma original. Além disso, a energia sendo fornecida e devolvida está ocupando uma capacidade dos sistemas elétricos. Isso tudo tem custos para a companhia geradora e fornecedora de energia e estes custos são repassados ao consumidor. Muitos consumidores que utilizam muitos equipamentos reativos (motores, reatores de lâmpadas, fornos de indução para fusão de metais, fontes de computadores, etc.) são obrigados a pagar por essa demanda de energia reativa além da demanda de energia ativa dissipada (MUSSOI, 2006, p. 143).

De acordo com (MUSSOI, 2006) para que o fator de potência de uma unidade consumidora esteja de acordo com as exigências legais, deve ser realizada sua correção, quando esta for inferior a 0,92.

2.6.1 Principais causas de um baixo FP

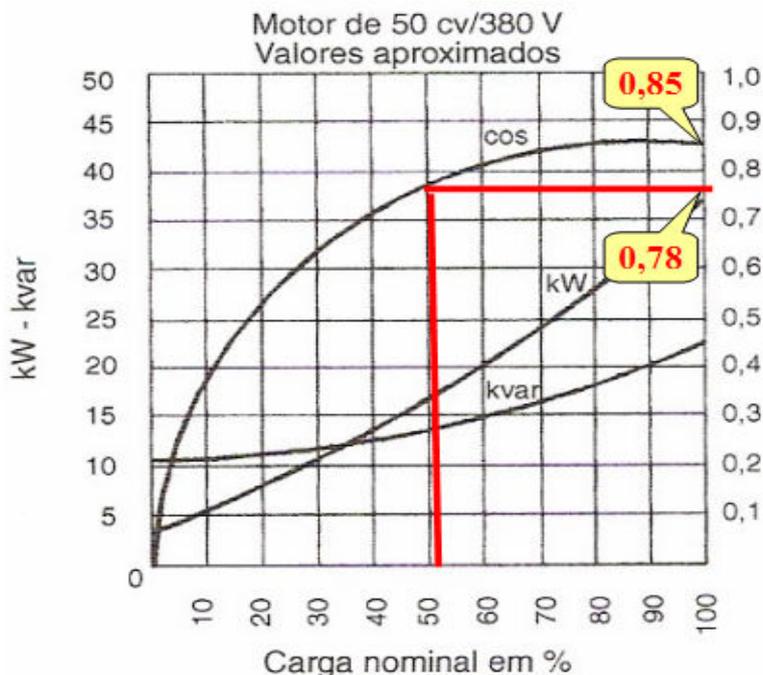
- Transformadores operando a vazio ou subcarregados durante longos períodos de tempo;
- Motores operando em regime de baixo carregamento;
- Utilização de grande número de motores de pequena potência;
- Instalação de lâmpadas de descarga (fluorescentes, de vapor de mercúrio e de vapor de sódio);
- Capacitores ligados nas instalações das unidades consumidoras horo sazonais no período da madrugada.

O fator de potência é definido como a relação entre a potência ativa P (em watts – W) e a potência aparente S (em volt-ampere – VA).

Como a grande maioria das cargas presentes nas plantas de beneficiamento de grãos estudada são indutivas (motores, transformadores), sem a devida correção, o FP fica em níveis inaceitáveis para os padrões de eficiência energética estipulados, arcando a indústria com as sobretaxas legais.

A potência reativa absorvida por um motor de indução aumenta um pouco desde a sua operação em vazio até a plena carga. Já a potência ativa (a que gera torque) cresce proporcionalmente com a solicitação da carga acoplada ao eixo do motor. Como resultado o fator de potência também varia proporcionalmente a esta variação.

No exemplo da Figura 5, reduzindo a solicitação de carga do motor em 50%, faz cair o FP de 0,85 (a plena carga) para 0,78. Se a redução na carga fosse para 75% o FP cairia apenas para 0,84.



Fonte: CEFETSP – UNED CUBATÃO

FIGURA 5 – Relação variação de carga em motor com FP.

Já pela Figura 6, pode se notar que a potência aparente S (kVA) nada mais é do que a soma vetorial da potência ativa P (kW) com a potência reativa Q (kVAr).

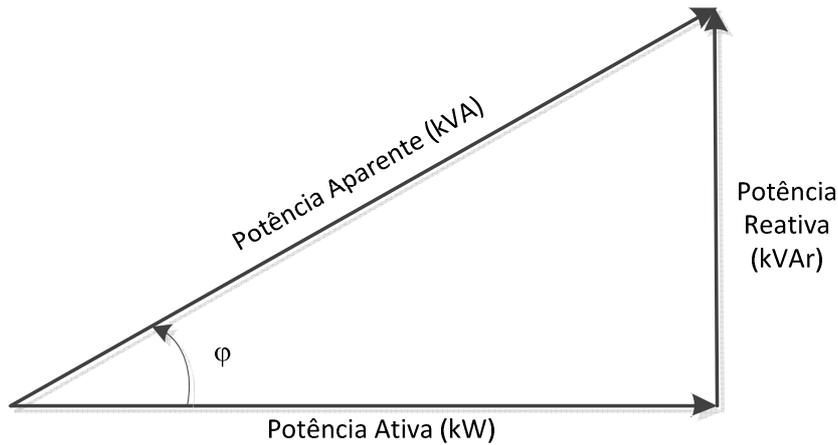


FIGURA 6 – Triângulo de potências.

Note que o ângulo φ é o valor de FP do sistema (fonte ou carga) considerados.

A potência aparente S é dada pela Equação 2.1:

$$S = \sqrt{3} \cdot E \cdot I_S \quad (2.1)$$

Onde E é a tensão nominal e I_S a corrente aparente, obtidas através de medidores específicos.

Para dimensionamento da potência reativa necessária para a correção por capacitores, basta subtrair o quando de reativos se necessita e aplicar a Equação 2.2.

$$Q_C (\text{VAr}) = Q_i - Q_f \quad (2.2)$$

Onde: Q_i é a potência reativa antes da compensação e Q_f após a compensação.

A capacitância necessária para o capacitor será dada pela Equação 2.3

$$C (\mu F) = \frac{Q_C}{2\pi f \cdot V_{RMS C}^2} \quad (2.3)$$

Onde C é a capacitância, Q_C a potência reativa, $V_{RMS C}$ a tensão eficaz de alimentação e f a frequência da rede elétrica de alimentação.

2.6.2 Consequências de um baixo FP

Um baixo FP indica que há baixa eficiência energética, no caso, desperdício. Nesse caso, podem ocorrer as seguintes situações:

- Aumento das perdas elétricas internas da instalação;

- Queda de tensão na instalação;
- Redução do aproveitamento da capacidade dos transformadores;
- Condutores aquecidos.

2.7 Como melhorar o fator de potência

O baixo FP pode ser corrigido com:

- O dimensionamento correto de motores e equipamentos;
- A seleção, utilização e operação correta de motores e equipamentos elétricos em geral;
- A utilização permanente de reatores de alto Fator de Potência;
- A instalação de capacitores ou banco de capacitores onde for necessário (de preferência próximo da carga);
- A instalação de motores síncronos em paralelo com a carga.

2.8 Os bons resultados de um alto FP

Quando o Fator de Potência é corrigido e elevado para 0,92, ou mais, a planta industrial passa a utilizar energia da forma mais correta e econômica:

- Desaparece o acréscimo cobrado nas contas de energia elétrica;
- Melhora o aproveitamento da energia elétrica para geração de trabalho útil;
- Diminuem as variações de tensão (oscilações);
- Melhora o aproveitamento dos equipamentos com menos consumo;
- Aumenta a vida útil dos equipamentos;
- Os condutores tornam-se menos aquecidos, diminuindo as perdas de energia elétrica na instalação;
- Devido à liberação de carga, a capacidade dos transformadores alcança melhor aproveitamento.

Um exemplo que pode resumir o que foi dito está demonstrado na Figura 4, que mostra o impacto do FP no dimensionamento dos condutores de uma rede elétrica.

Seção relativa	Fator de potência
1,00 ◦	1,00
1,23 ◦	0,90
1,56 ◦	0,80
2,04 ◦	0,70
2,78 ○	0,60
4,00 ○	0,50
6,25 ○	0,40
11,10 ○	0,30

FIGURA 7: Impacto do Fator de Potência do dimensionamento dos condutores elétricos.

Assim, a correção do baixo FP libera a planta para expansão de cargas sem a necessidade de contratação de nova demanda ou investimentos em transformadores ou condutores elétricos.

2.9 Forma de Faturamento do Fator de Potência

A ocorrência de excedente de reativo é verificada pela concessionária através do fator de potência mensal ou do fator de potência horário.

O fator de potência mensal é calculado com base nos valores mensais de energia ativa (“kWh”) e energia reativa (“kVAr”). O fator de potência horário é calculado com base nos valores de energia ativa (“kWh”) e de energia reativa (kVAr) medida de hora em hora.

A demanda de potência e o consumo de energia reativa excedentes, calculados através do **fator de potência horário**, serão faturados pelas expressões dadas nas Equações 2.4 e 2.5, definidas pela Resolução 456 (ANEEL) ⁴, especificamente a partir do Art. 64:

⁴ Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. RESOLUÇÃO N.º 456, de 29 de Novembro de 2000.

$$FER_{(p)} = \left[\sum_{t=1}^n \left[CA_t \left(\frac{0,92}{f_t} - 1 \right) \right] \right] TCA_{(p)} \quad (2.4)$$

$$FDR_{(p)} = \left[MAX_{t=1}^n \left(DA_t \cdot \frac{0,92}{f_t} \right) - DF_{(p)} \right] TDA_{(p)} \quad (2.5)$$

Onde:

FDR_(p) = Faturamento da demanda de potência reativa excedente por posto tarifário. Valor do faturamento, por posto horário “p”, correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “fr” no período de faturamento.

DA_t = Demanda de potência ativa medida de hora em hora.

$DF_{(p)}$ = Demanda de potência ativa faturada em cada posto horário.

$TDA_{(p)}$ = Tarifa de demanda de potência ativa

FER_(p) = Faturamento do **consumo** de reativo excedente por posto tarifário. Valor do faturamento, por posto horário “p”, correspondente ao consumo de energia reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “fr”, no período de faturamento.

CA_t = Consumo de energia ativa medida em cada hora.

$TCA_{(p)}$ = Tarifa de energia ativa

f_t = Fator de potência calculado de hora em hora

\sum = Soma dos excedentes de reativo calculados a cada hora

MAX = Função que indica o maior valor da expressão entre parênteses, calculada de hora em hora.

t = Indica cada intervalo de uma hora

p = Indica posto tarifário: ponta e fora de ponta, para as tarifas horosazonais, e único, para a tarifa convencional.

n = número de intervalos de uma hora, por posto horário no período de faturamento.

Já demanda de potência e o consumo de energia reativa excedentes, calculados através do **fator de potência mensal**, será faturado pelas expressões nas Equações 2.6 e 2.7:

$$FER = CA \left(\frac{0,92 - 1}{f_m} \right) TCA \quad (2.6)$$

$$FDR = \left(DM \cdot \frac{0,92 - DF}{f_m} \right) TDA \quad (2.7)$$

Onde:

FDR = Faturamento da demanda de reativo excedente.

DM = Demanda ativa máxima registrada no mês (kW).

DF = Demanda ativa faturável no mês (kW).

TDA = Tarifa de demanda ativa (R\$/ kW).

FER = Faturamento do consumo de reativo excedente.

CA = Consumo ativo do mês (kWh).

TCA = Tarifa de consumo ativo (R\$ / kWh).

f_m = Fator de potência médio mensal.

2.10 Forma de avaliação de Fator de Potência

De acordo com a WEG (2007) a correção do FP de uma planta já em operação segue os seguintes passos:

- a) Interpretar e analisar os parâmetros elétricos das instalações através das medições efetuadas;
- b) Ter em mãos e interpretar as especificações técnicas de todos os materiais que serão empregados na execução do projeto.

2.10.1 Levantamento de dados:

Dados a serem considerados

- Tipo de tarifação: Se horo sazonal ou convencional.

- Demanda contratada: Refere-se à potência que a concessionária irá disponibilizar para o uso da unidade consumidora. Os valores da demanda contratada (kW) são independentes do consumo registrado (kWh), e haverá cobrança de tarifa de ultrapassagem sempre que o consumidor ultrapassar dez por cento (10%) de seu contrato, pagando três vezes o valor da tarifa básica, independentemente se a ultrapassagem ocorreu no horário de ponta ou fora de ponta.

- Fator de potência registrado: Obtido através de medição com instrumentação apropriada.

2.10.1.1 Transformador

- Tensão no primário: Tensão nominal de entrada do transformador.

- Tensão no secundário: Tensão nominal da saída do transformador.

- Potência nominal: Capacidade de potência que pode ser suprida pelo transformador sem causar problemas de fornecimento.

- Potência de curto-circuito: Consiste da potência máxima suportada pelo sistema (condutores, etc.) com base na impedância deste na ocorrência de um curto circuito. Saber seu valor máximo e mínimo tem como uma das utilidades, por exemplo, o dimensionamento dos dispositivos de manobra e proteção, entre outras aplicações.

- Grau de ocupação: Consiste na quantidade de cargas atreladas ao circuito (dele dependentes). Leva em conta que a qualidade energética (consumo e perturbações no sistema) a destas cargas influem umas sobre as outras.

- Corrente de magnetização: É a corrente de energização do transformador. A corrente de magnetização de um transformador ocorre, entre outras, nas seguintes situações: Energização do transformador; Ocorrência de falta externa; Tensão de restabelecimento após a eliminação de uma falta externa; Mudança no tipo de falta durante uma contingência, como de falta fase-terra, para falta fase-fase-terra; Ao ligar em paralelo um transformador já energizado com outro.

- Impedância: Oposição à passagem de corrente alternada provocada nos enrolamentos do transformador.

- $\cos \phi$: Fator de Potência do transformador.

2.10.1.2 Medições

- Medir as tensões e as correntes (BT) nas seguintes condições: (1) Carga mínima, (2) Carga máxima.

2.10.2 Conta de energia elétrica (12 meses)

A estruturação sintetizada das faturas de energia elétrica da planta auxilia na contabilização dos prejuízos decorrentes da baixa eficiência no uso dessa energia proporcional aos valores de reativos registrados.

2.11 Harmônicas

Se o total de cargas não lineares ultrapassarem 20% da carga total instalada deverá ser efetuada uma medição detalhada dos níveis de harmônicas. Detectando-se a existência de harmônicas na instalação elétrica deve-se obedecer ao seguinte critério:

- Limite de distorção harmônica individual de tensão deverá ser menor ou igual a 3%;
- Limite de distorção total de harmônicas de tensão (THD) deverá ser menor ou igual a 5%.

Ultrapassando estes limites deverão ser instalados indutores de proteção anti-harmônicas nos capacitores ou filtros para as harmônicas significativas.⁵

2.12 Determinação da potência reativa

Para o dimensionamento de capacitores para correção do fator de potência que não tenha interferência significativa de harmônicas, pode se fazer uso das equações 2.8 e 2.9:

$$Q \text{ (kVAr)} = P(W). F \quad (2.8)$$

$$Q \text{ (kVAr)} = \frac{\%Carga . P(W). F}{\eta} \quad (2.9)$$

Onde:

F é o fator de multiplicação necessário para a correção do fator de potência existente para o desejado, obtido conforme ANEXO A:

η = é o rendimento do motor de acordo com a carga aplicada ao eixo.

Utiliza-se a Equação 2.8 para todos os casos, com exceção de motores, onde deverá ser utilizada a Equação 2.9.

⁵ Conforme IEEE Std. 519 “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.

2.12.1 Cálculo do capacitor

2.12.1.1. Capacitância:

O dimensionamento do capacitor pode ser dado pela Equação 2.10.

$$C (\mu F) = \frac{Q_C (kVAr)}{V_{FF}^2 2\pi f \times 10^{-9}} \quad (2.10)$$

2.12.1.2. Corrente nominal do capacitor:

É dada pela Equação 2.11.

$$I_{nc} (A) = \frac{Q_C (kVAr) \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot V_{FF}} \quad (2.11)$$

2.12.1.3. Proteção contra curto-circuito:

Já a proteção para curto-circuito é dada na Equação 2.12.

$$I_{nf} (A) = I_{nc} \cdot 1,65 \quad (2.12)$$

Onde:

I_{nf} = Corrente calculada do fusível (usar o valor comercial do fusível imediatamente superior);

I_{nc} = Corrente nominal do capacitor.

2.12.2 Condutores:

Utilizar condutores superdimensionados em 1,43 vezes (NBR 5060) a corrente nominal do capacitor e levar em consideração outros critérios, tais como: maneira de instalar, temperatura ambiente, etc.

3. DIAGNÓSTICO E DEFINIÇÃO DA LINHA DE BASE NA PLANTA CAAL

Para o diagnóstico da situação atual da planta analisada estabeleceu-se o cronograma de atividades por meio do diagrama da Figura 8.

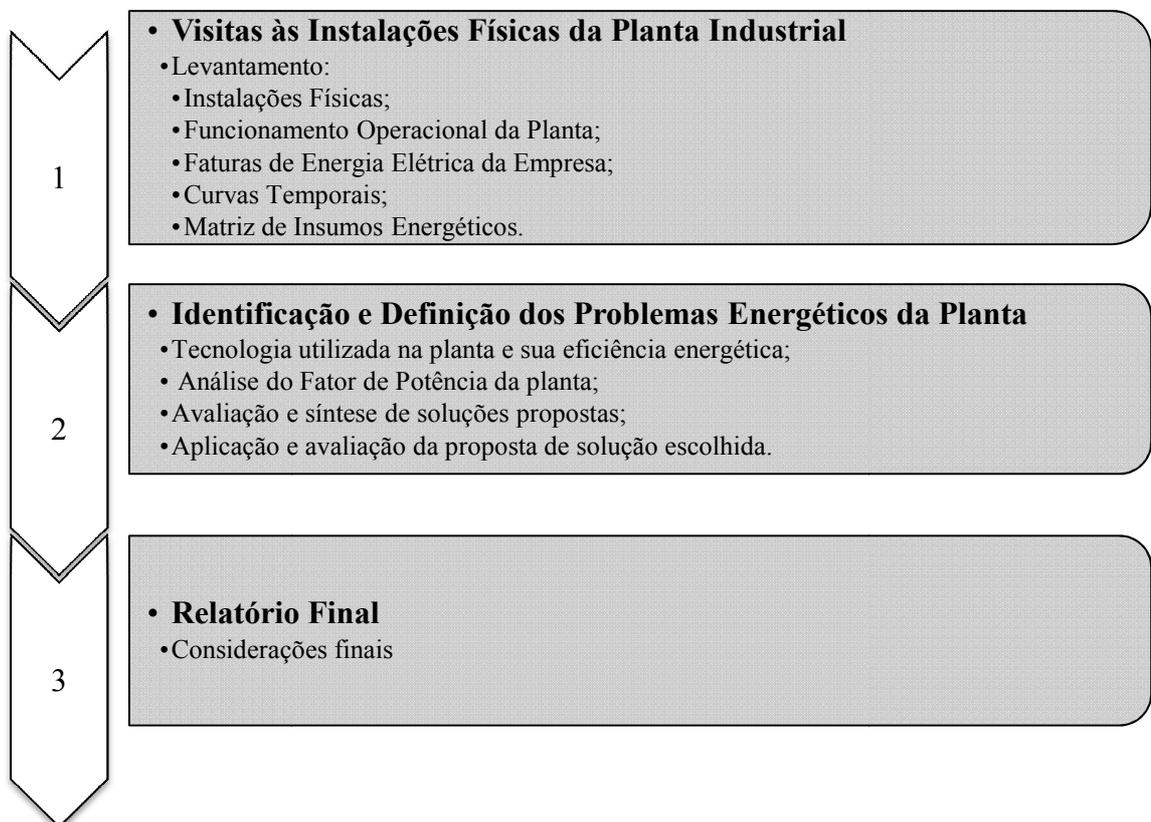


FIGURA 8 – Diagrama Metódico de Estudo da Planta Industrial.

Os resultados de cada etapa são abordados nos itens que se seguem.

3.1 Levantamento das Instalações Físicas

A Cooperativa Agroindustrial Alegrete – CAAL – Unidade de Beneficiamento de Grãos e Produção de Rações, está situada às margens da BR 290, Avenida Pedreiras, S/N, no município de Alegrete, RS.

A planta industrial é composta basicamente de quatro (04) subestações de abastecimento de energia elétrica que alimentam: setor de acesso (guarita, vestiário, refeitório e ambulatório) dois grupos de silos (27 silos no total), a unidade fabril de rações, dois (02) blocos secadores; o bloco de sementes; a expedição, a armazenagem, o setor de manutenção, o setor de saída (balança e escritório administrativo), a unidade UTE (Usina Termoeletrica) alimentada por biomassa (casca de arroz) oriunda dos subprodutos do próprio beneficiamento de grãos da planta.

A visualização aérea da planta pode ser observada na Figura 9:



Fonte: Google

FIGURA 9: Vista aérea da planta industrial CAAL.

Já a Usina Termoeletrica (o detalhe marcado na Figura 9), pode ser observada na Figura 10.



FIGURA 10: Foto da fachada da UTE - CAAL.

Além de produzir energia elétrica para consumo próprio, a planta da UTE da cooperativa objetiva vender o excedente para a concessionária local de energia elétrica. A planta da UTE está em processo de conclusão e correções no sistema de potência de toda a unidade fabril precisam ser realizadas para obter eficiência no uso e produção de energia elétrica.

Atualmente a UTE CAAL tem capacidade de produção de 3,8 MW e atualmente está produzindo 2,4 MW para suprimento da carga interna.

Na Figura 11 é possível ter uma visão aérea mais detalhada dos setores da planta industrial, onde as cores identificam os respectivos setores alimentados por cada subestação.

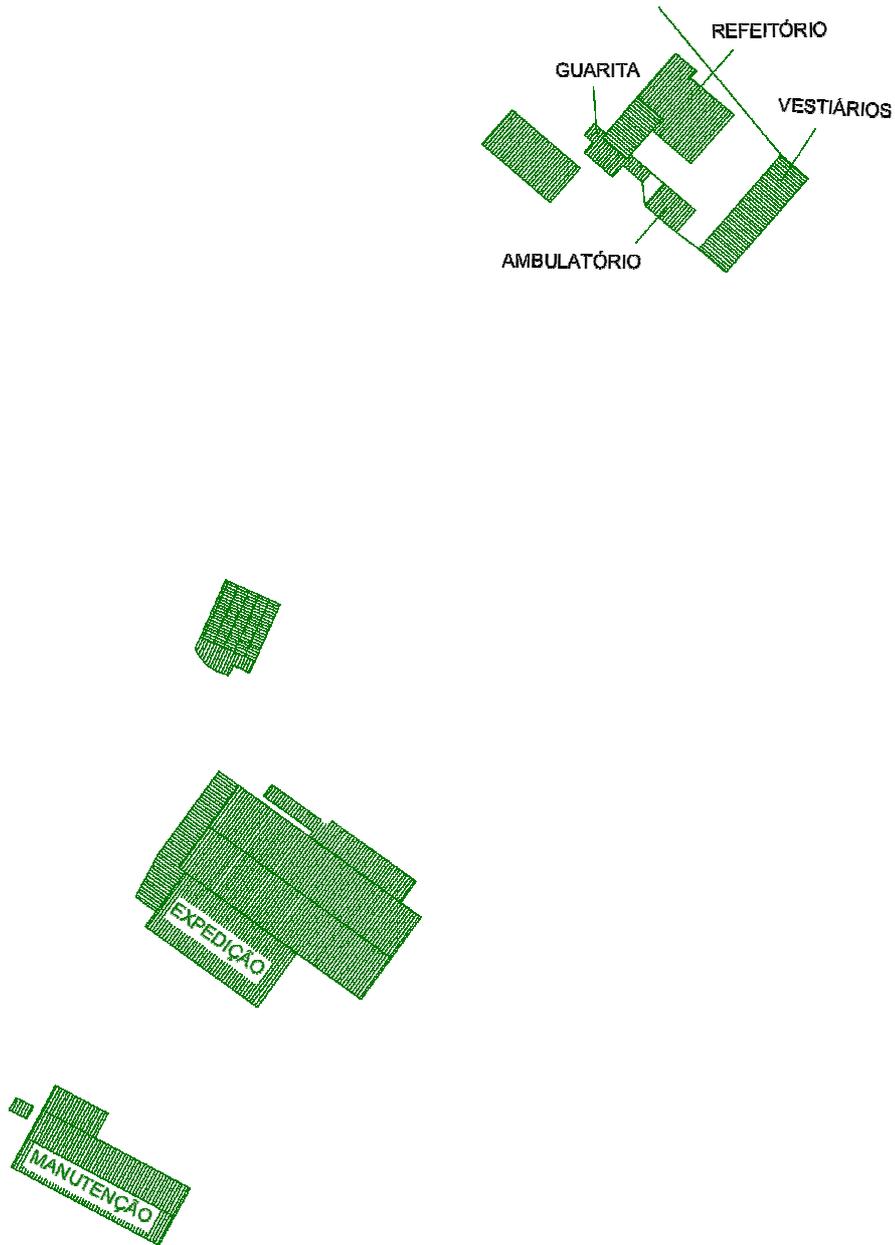


Figura 13: Detalhe do setor alimentado pela Subestação 1.

O diagrama unifilar simplificado da planta pode ser observado na Figura 14.

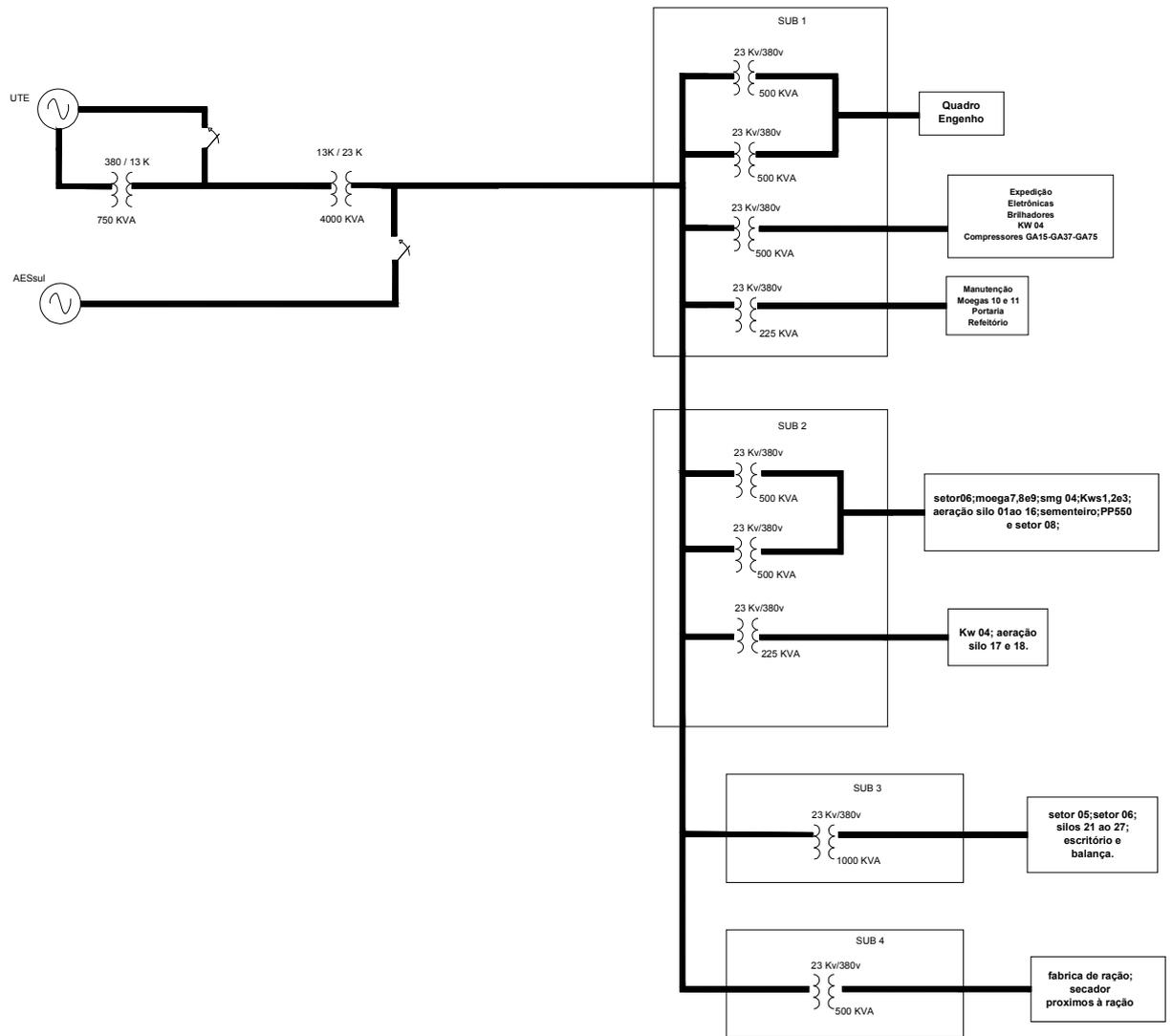


FIGURA 14: Fluxograma de operação da planta CAAL.

Alguns dados sobre as os transformadores e correções existentes nas subestações vistas na Figura 14 do diagrama unifilar podem ser conferidos nas TABELAS 4 e 5 que seguem.

TABELA 4: Dados dos Transformadores da Planta Elétrica CAAL

Subestação	Trafos	kVA	Marca	Relação de transformação	Impedância (%)
1	D	500	União	23kV/ 380V	5,02
	C	500	União	23kV/ 380V	5,02
	O	225	Trafo	23kV/ 380V	4,65
	A	500	União	23kV/ 380V	3,72
	E	500	Trafo	23kV/ 380V	4,79
2	F	500	Trafo	23kV/ 380V	4,79
	B	225	Trafo	23kV/ 380V	4,62
3	H	1000	Weg	23kV/ 380V	5,87
4		500	Trafo	23kV/ 380V	5,38

TABELA 5: Dados dos Transformadores da Planta Elétrica CAAL

Subestação	Trafo	Sistema	Banco de capacitores	Reativa total
1	D	Paralelo	9x60 kVAr - 4x40 kVAr - 1x35 kVAr	655 kVAr
	C			
	O	Individual	-	-
2	A	Paralelo	12x40 kVAr	480 kVAr
	E			
	F	Individual	4x20 kVAr	80 kVAr
3	H	Individual	12x40 kVAr	480 kVAr
4		Individual	-	-

Já a Tabela 6 resume a distribuição dos circuitos elétricos das subestações de potência internas da planta industrial e dá outros detalhes.

TABELA 6: Distribuição de Cargas do Sistema Elétrico da Planta Industrial CAAL em Outubro de 2011.

Circuito Inicial	Cubículo	Potencia kVA	Proteção		Disjuntores BT (A)	Sistema	Circuitos Alimentadores (kVA)	Sub.	Consumidores
			Elo	Tipo HH					
D	8	500	15k	25	800	Paralelismo	CD 1000	1	Engenho
C	7	500	15k	25	800				
O	6	225	6k	12,5	350	Individual	O 225	1	Manutenção, portaria, moega 10 e 11, refeitório, almox, SLC.
A	5	500	15k	25	800	Individual	D 500	2	Eletrônicas, polidores, compressores, expedição.
E	5	500	15k	25	800	Paralelismo	EF 1000		Setor 06, moega 7, 8 e 9; SMG 04, KWS 1, 2 e 3; aeração silo 01 ao 16, sementeiro, PP550 e setor 08;
F	4	500	15k	25	800				
B	3	225	6k	12,5	350	Individual	B 225	2	KW 04, aeração silo 17 e 18.
H	1	1000	*	*	*	Individual	H 1000	3	Setor 05, setor 06, silos 21 ao 27; escritório e balança.
*	*	500	15k	25	800	Individual	500	4	Fabrica de ração; secadores próximos à ração.

* Registros não encontrados.

3.1. Funcionamento Operacional da Planta

Como já se pode ter percebido, as subestações 1 (em parte) e 4 encontravam-se sem compensação.

Enquanto este trabalho está sendo realizado, procedimentos de correção da subestação 4 estão em andamento e em fase de conclusão. Como será observado posteriormente neste documento, a análise realizada neste trabalho foca nos problemas na subestação 1 (cuja uma parte encontrava-se problemática) e na subestação 4, na qual não havia qualquer compensação.

A Figura 15 mostra o diagrama de fiação da subestação 1:

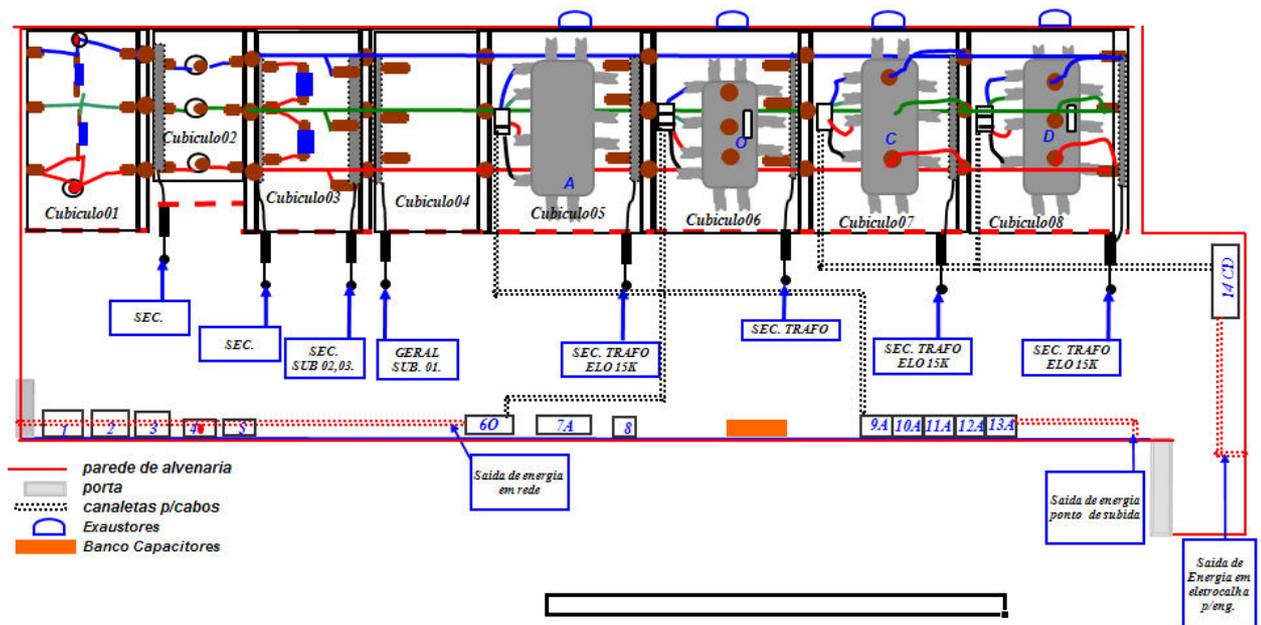


FIGURA 15: Diagrama Multifilar Subestação 1 CAAL.

Já a Tabela 7 descreve os itens vistos na FIGURA 15.

TABELA 7: Descritivo dos Itens Encontrados na Subestação 1

Local	Descritivo	Local	Descritivo
Painel 1	Medição	Cubículo 01	Medição Concessionária
Painel 2	Placa CCK	Cubículo 02	Chave seccionadora geral e disjuntor geral de AT
Painel 3	Distribuição CCK	Cubículo 03	TP p/ parada de emergência e seccionadora da sub 02 e 03
Painel 4	Parada de Emergência	Cubículo 04	Geral da sub 01
Painel 5	Tensão do TP p/ Emergência	Cubículo 05	Trafo de 500 kVA do circuito A
Painel 6O	QGBT	Cubículo 06	Trafo de 225 kVA do circuito O
Painel 7A	Quadro de Acionamento dos Capacitores	Cubículo 07	Trafo de 500 kVA do circuito C
Painel 8	Comando dos Exaustores	Cubículo 08	Trafo de 500 kVA do circuito D
Painel 9A	Sem função, energizado.	Circuito A	Alimenta expedição, eletrônicas, polidores e expedição.
Painel 10A	Chave expedição e eletrônicas	Circuito O	Manutenção, moega 10 e 11, portaria, refeitório, almox, SLC e rampa.
Painel 11A	Disjuntor geral de circuito A	Circuito C	Um dos alimentadores do engenho
Painel 12A	Sem função, energizado.	Circuito D	Um dos alimentadores do engenho
Painel 13A	Saída para os compressores e polidoras		
Painel 14CD	QGBT do engenho		

Observe que as linhas grifadas tratam do circuito que será detalhado na correção desta subestação. A subestação 1 é responsável principalmente pelo setor de beneficiamento dos grãos e setores administrativos.

O fluxograma de produção, visto na Figura 16, mostra os procedimentos setoriais de produção de parte da subestação 1 relacionados à produção de arroz. Lembrando que este fluxograma mostra apenas a parte da subestação que teoricamente não apresentaria problemas por já ter sido corrigida (três de quatro transformadores).

Com base neste fluxograma é possível verificar o que cada um dos três (03) transformadores compensados (circuitos CD e A, vide Tabela 5) de 500 kVA está alimentando.

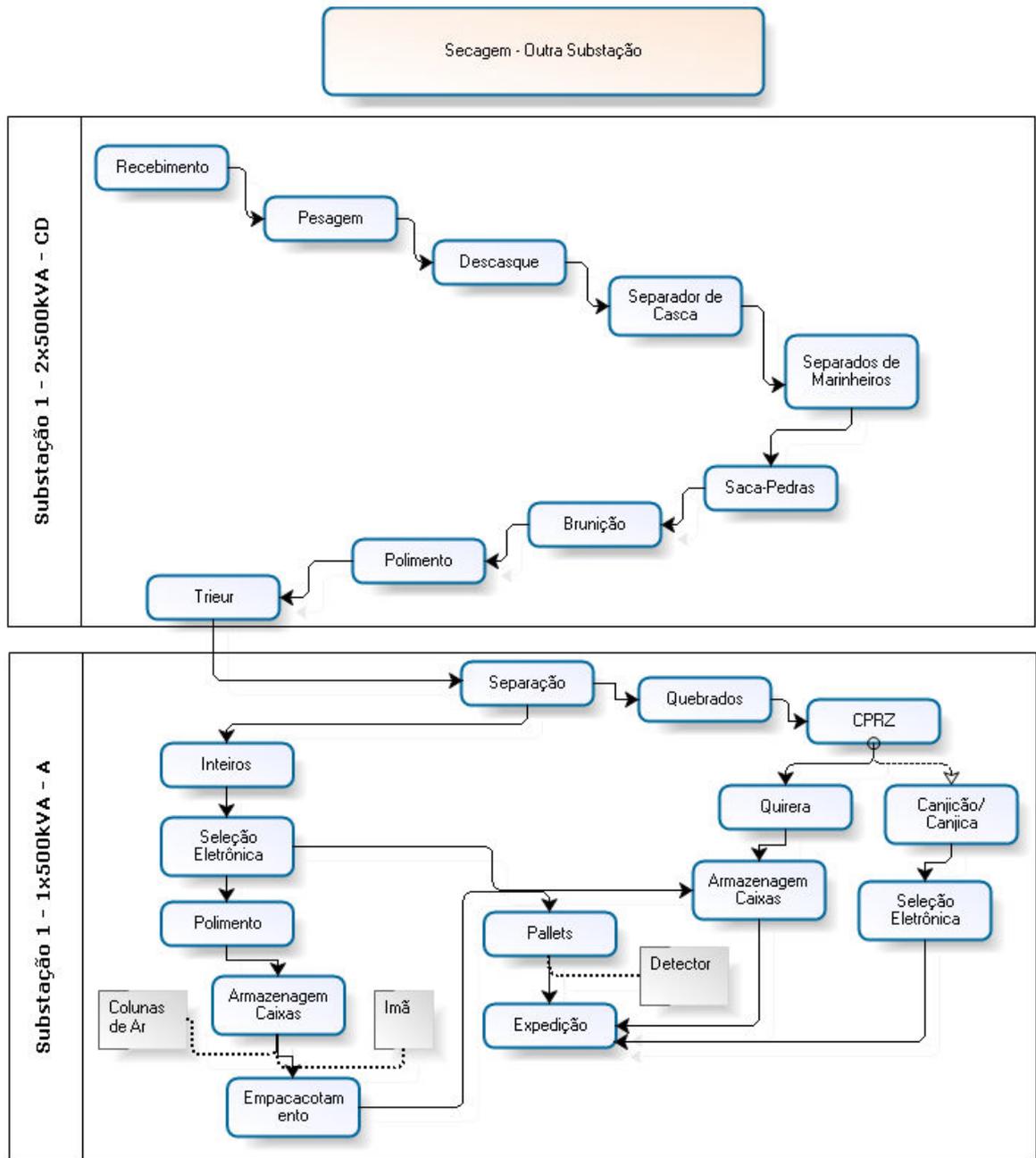


FIGURA 16: Fluxograma de operação da planta CAAL.

A subestação 4, porém, precisava de compensação total, pois se trata de instalação nova no qual este procedimento não havia sido iniciado.

3.2 Levantamento do consumo de energia elétrica na Empresa

Por meio do estudo das faturas e demonstrativos de consumo da planta industrial pode se constatar diversas multas relacionadas ao descuido com a eficiência energética

Tarifas de energia elétrica dos meses anteriores a agosto de 2011 foram analisadas.

3.3 Levantamento do sistema elétrico de potência da planta

O sistema de medição e correção de reativos da planta é atualmente deficitário e problemático. Foi solicitado e instalado um sistema de controle e aferição de energia elétrica pela CCK Automação, mas (não identificado o porquê) este sistema de controle não comandava corretamente os bancos de capacitores, mas sim, aleatoriamente, agindo muitas vezes sobre aqueles que não apresentavam necessidade de serem ligados ou desligados.

Outro engano de projeto referente a este sistema de controle é que o mesmo apenas efetua a aferição da qualidade de energia quando a concessionária de energia elétrica está alimentando a planta e não quando a Usina Termoelétrica (UTE) assume a demanda interna de energia elétrica.

Seguiu-se então a aferição, com instrumentos próprios, de outros itens da qualidade da energia na planta referente a reativos. Após medição e análise da qualidade do sistema elétrico da planta, além dos documentos e relatórios postos à disposição, conseguiu-se identificar os dados e informações que seguem:

3.3.1 Levantamento de dados e necessidades:

Dados e informações coletadas:

- Tipo de tarifação: a planta elétrica da indústria CAAL é tarifada pelo sistema horo sazonal, mas com contrato diferenciado, conforme regras que vem sendo aplicadas desde 2006. Tal sistema de tarifação está em fase de mudanças já partir de 2012 devido à entrada em vigor de novas regras e normas de tarifação do setor energético nacional (PRORET⁶).
- Demanda contratada: A demanda contratada não é fixa, variando mês a mês, conforme a necessidade da planta. Neste item se constatou outro problema existente que é de que em caso de queda do sistema interno da usina termoelétrica, quando a planta está à plena carga, ocorre a sobretarifação pela entrada da concessionária no sistema de alimentação.
- Fator de potência registrado: Constatou-se que com todas as subestações ativadas o comportamento do FP estava relativamente dentro dos parâmetros, não oscilan-

⁶ Procedimentos de Regulação Tarifária. Referente ao Módulo 7 – Estrutura Tarifária das Concessionárias de Distribuição, de que trata a Resolução Normativa nº 435, de 24 de maio de 2011.

do muito dentro dos 0,92 esperados. Mesmo assim a planta estava sendo multada por problemas de FP.

Descoberta esta aparente incongruência, realizamos uma análise dos poucos documentos e plantas existentes, e das faturas. Foi quando se constatou que esta sobretarifação ocorria justamente quando a indústria não estava operando, e que havia duas (02) subestações não compensadas.

3.3.1.1 Transformador:

A Tabela 8 que segue identifica e explica o grupo de transformadores da planta da indústria estudada.

TABELA 8: Dados dos Transformadores Elétricos da Planta Industrial CAAL em Outubro de 2011.

Tensão		Potência		Grau de Ocupação	I _{mag} (A)	Z (Ω)	Cos φ	Subestação onde está alocado
E _p (kV)	E _s (V)	P _n (kVA)	P _{cc} (kVA)					
23	380	500	144,4	*	*	5,02	*	1
23	380	500	144,4			5,02		
23	380	225	144,4			4,65		
23	380	500	144,7	*	*	3,72	*	2
23	380	500	144,4			4,79		
23	380	225	144,4			4,79		
23	380	1000	144,3	*	*	4,62	*	3
23	380	500	144,4	*	*	5,38	*	4

Onde: E_p é a tensão no primário e E_s é a tensão no secundário; P_n é a potência nominal e P_{cc} a potência de curto circuito (dada pelas Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4); e I_{mag} é a corrente de magnetização e Z a impedância do transformador.

$$E_{cc} = Z \cdot E_n \quad (3.1)$$

$$I_n = \frac{E_n}{Z} \quad (3.2)$$

$$I_{cc} = \frac{I_n}{Z} \quad (3.3)$$

$$P_{cc} = E_{cc} \cdot I_{cc} \quad (3.4)$$

Os dados marcados com * não foram encontrados, e neste trabalho isto não trouxe inconvenientes por não terem sido necessários.

3.3.1.2 Medições:

Carga Mínima: Ocorre justamente quando a planta industrial está em manutenção, com valores que variam entre 100 kW a 150 kW de potência consumida.

Carga Máxima: Devido ao período do ano (a indústria não está no período de pico de produção), e por não haver registros individualizados sobre as subestações e transformadores (apenas do total da planta), é difícil precisar a carga máxima solicitada dos transformadores.

3.3.1.3 Faturas de energia elétrica:

Com auxílio das faturas arquivadas no departamento administrativo pesquisou-se a incidência ou não de multas e da situação do consumo de energia elétrica em geral. Aproveitando o material disponível, não só os últimos 12 (doze) meses, mas também o período desde 2009 foi analisado para comparações.

Uma planilha com anotações de valores de ocorrências de falta e/ ou multas foi gerada e pode ser visualizada no ANEXO B

Com base nestas planilhas, os gráficos da Figura 17, foram gerados.

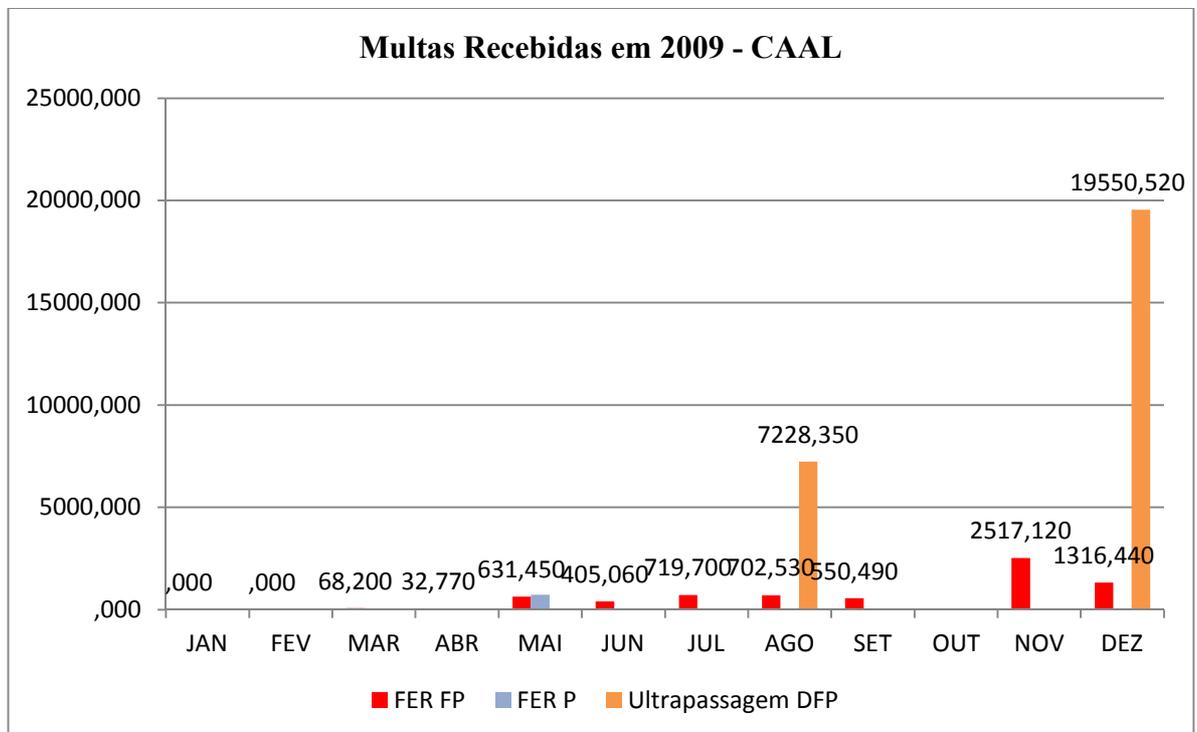


FIGURA 17a: Dados de multas por ultrapassagem de FER e Demanda Contratada – 2009.

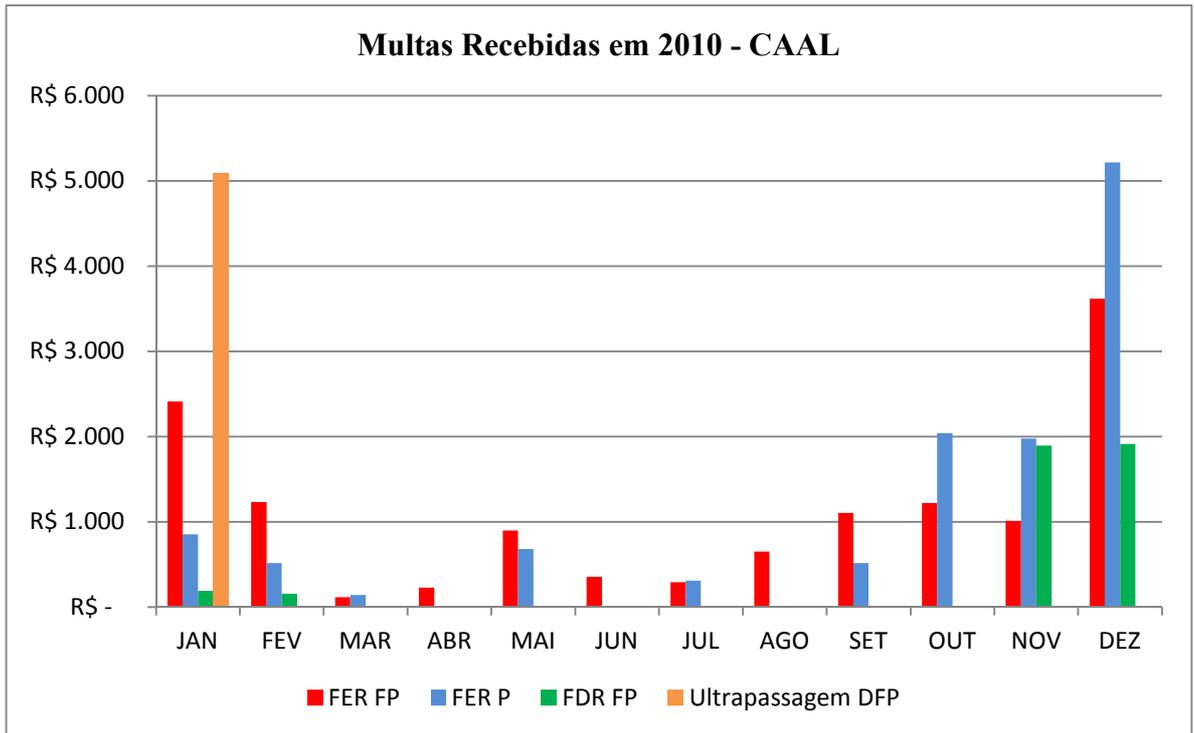


FIGURA 17b: Dados de multas por ultrapassagem de FER e Demanda Contratada – 2010.

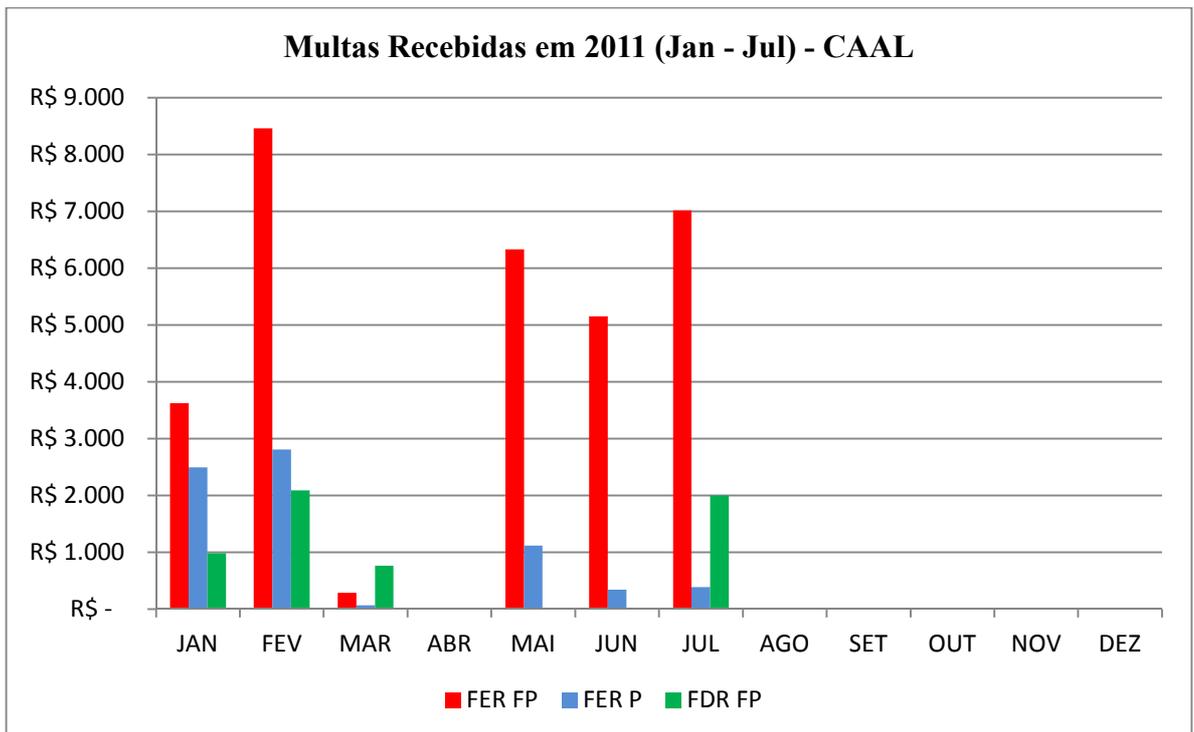


FIGURA 17c: Dados de multas por ultrapassagem de FER e Demanda Contratada – 2010.

Observe que houve incremento considerável de multas no último período de 12 (doze) meses. Constatou-se a ocorrência de manutenção precária das compensações neste período, que foram devidamente identificadas nas Figuras já citadas.

3.3.1.4 Harmônicas:

Com instrumentação adequada, verificou-se que o índice THD medido ficou em torno de 3%.

Devido aos níveis encontrados, a correção de harmônicas não foi necessária durante este trabalho.

Importante esclarecer que o principal inconveniente nesta análise é que o sistema que monitora as harmônicas do sistema somente o faz para toda a planta, que como já visto, não é pequena, e os resultados *in loco* nos principais pontos suspeitos não revelaram qualquer parâmetro para uma análise geral. Assim, consideramos verdadeiro o afirmado sobre THD e procuramos dar sequencia as ações prioritárias no momento.

3.3.2 Problemas iniciais de eficiência encontrados:

Os problemas encontrados na planta elétrica da indústria estudada, indicadores de baixa eficiência energética com relação aos reativos foram:

- Baixo Fator de Potência causado por não compensação em parte do circuito da subestação 1, Trafo de 225 kVA.
- Baixo Fator de Potência na subestação 4 devido à falta de da compensação própria.
- Falta de manutenção nas compensadoras já instaladas.
- Sistema de monitoramento e controle de níveis de qualidade de energia elétrica inadequado e ineficiente.
- Sobretarifação na demanda contratada quando da ocorrência da queda do suprimento oriundo da Usina Termoelétrica CAAL e entrada em operação da rede da concessionária.
- Prejuízos financeiros em virtude dos problemas citados.
- Ausência de qualquer política de eficiência energética, inclusive as relacionadas aos hábitos comportamentais.
- Inexistência de corpo técnico relacionado à eficiência energética seja desta a fase de projeto até a manutenção.
- Má aplicação de investimentos para eficiência energética, quando existentes.
- Despreocupação com a eficiência energética quando a planta é desconectada da concessionária de energia elétrica.

3.4.1. Propostas pontuais de solução para alguns dos problemas encontrados

As seguintes ações foram encaminhadas à administração da planta industrial:

Correção do FP nos secundários dos transformadores da subestação 1 (Trafo 225kVA) e da subestação 4 (Trafo 500kVA, este já concluído na presente data, restando outras ações cabíveis).

Contratação ou capacitação de pessoal técnico especializado.

Aplicação de manutenção preventiva continuada.

Criação de uma política de eficiência energética e conscientização de que essas ações não são racionamento, mas na realidade investimentos retornáveis, que haveriam de ser aplicados de outras formas como paliativos aos mesmos problemas, mas sem a efetiva solução.

Estudo e aplicação de luminotécnica em toda área da indústria.

Análise das cargas no setor administrativo e investimentos em equipamentos de melhor eficiência energética.

Investimentos em automação em setores de controle críticos, inclusive no que se refere à iluminação.

3.3.3 Solução de problemas iniciais

Isolando-se o problema de reativos em várias frentes determinamos concentrar esforços em tempo no Trafo de 225kVA da subestação 1 e o Trafo de 500kVA da subestação 4 causavam o problema.

Utilizando medição de campo com termovisor constatamos bancos de capacitores “frios”, acusando a inoperância dos mesmos em muitas das subestações nas quais havia algum tipo de compensação. A inspeção visual e técnica feita nos bancos de capacitores comprovaram que estes se encontravam em mau funcionamento ou inoperantes.

Nossa ação tomou então a direção de duas frentes: A compensação da subestação 4 e o estudos de compensação da subestação 1 (Trafo 225kVA):

3.4.1.1. Compensação da subestação 4:

Observamos que a subestação problemática 4 já possuía um projeto de compensação por tratar-se de ampliação recente, e decidimos por avaliar esta obra.

Efetuamos a análise das cargas adquiridas ou ainda a serem compradas e percebemos que alguns itens poderiam ter tido investimentos melhor aproveitados, infelizmente não tivemos autonomia para interferir fortemente em algumas das etapas.

Analisamos os reativos do setor em obras e fizemos a proposta de melhor custo-benefício para a situação dos reativos. O quadro de comando para compensação da subestação 4 pode ser observado em seu estágio de montagem na Figura 18.

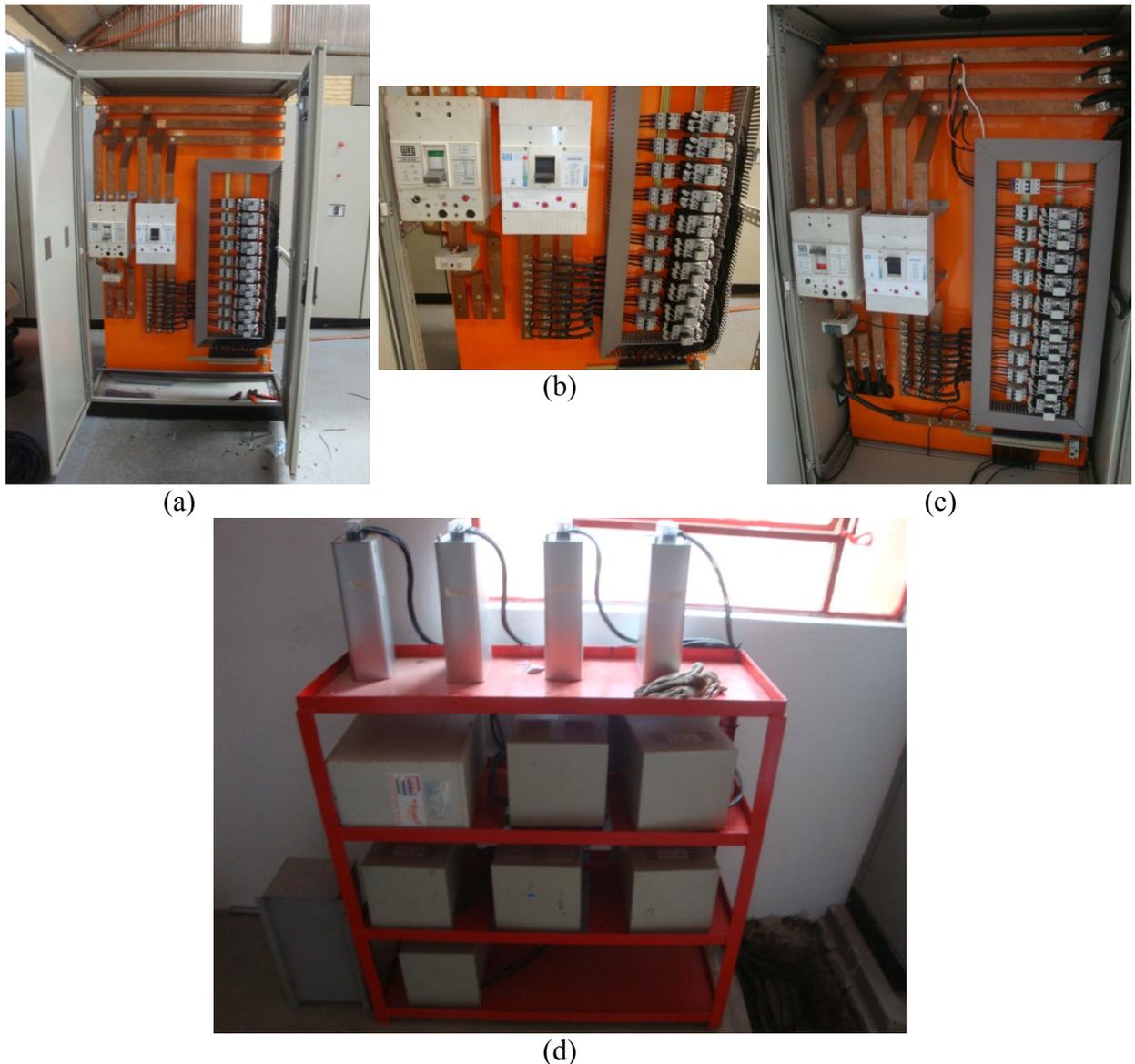


FIGURA 18: Montagem quadro de compensação QC Sub 4. (a) Vista geral; (b) detalhes barramento; (c) QC montado; (d) banco de capacitores montados externamente ao quadro.

Antes da correção desta subestação, os valores calculados para FP foram obtidos conforme dados locais, cujos resultados podem ser visualizados nas Equações 3.5 e 3.6, com base nos seguintes dados: $P = 55 \text{ kW}$; $I_S = 120 \text{ A}$; $E = 380 \text{ V}$.

$$S = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 120 = 78,98 \text{ kVA} \quad (3.5)$$

$$FP = \frac{55 \text{ kW}}{78,98 \text{ kVA}} = 0,696 \quad (3.6)$$

Depois de concluída a instalação da compensação, conseguiu-se os seguintes resultados: $P = 55 \text{ kW}$; $I_S = 88 \text{ A}$; $E = 380 \text{ V}$. E as respostas das Equações 3.7 e 3.8.

$$S = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 88 = 57,90 \text{ kVA} \quad (3.7)$$

$$FP = \frac{55 \text{ kW}}{57,90 \text{ kVA}} = 0,95 \quad (3.8)$$

O controlador escolhido para a compensação do FP na subestação 4 foi o PFW01 trifásico. Conforme informações da própria fabricante o PFW01 é um controlador automático de fator de potência compacto, que além de eliminar ou diminuir multas e perdas no sistema por baixo fator de potência permite a supervisão de instalações elétricas.

O PFW01 realiza medições de tensão (F-F ou F-N) e corrente proveniente da rede elétrica, com os quais calcula e indica em valor eficaz (RMS) as grandezas elétricas de tensão; corrente; frequência; potência ativa, reativa e aparente, fator de potência, THD (distorção harmônica total) e no modelo trifásico as harmônicas ímpares de tensão até 11º ordem. Através da leitura de tensão e corrente, o PFW01 controla o fator de potência da rede elétrica, conforme a programação feita pelo usuário, adicionando ou retirando bancos de capacitores.

O modelo trifásico pode ser ligado em uma rede de comunicação serial RS-485 com protocolo MODBUS-RTU.

O acionamento das saídas é feito através de relés de contato seco com disparo em passagem próximo a zero, diminuindo a quantidade de ruídos na rede. Permite programação de condições da rede elétrica, modo de controle e alarmes.

Este valor foi comprovado por leitura no painel do banco de capacitores instalado (painel de compensação) conforme Figura 19.



Figura 19: Mostrador de FP do quadro de compensadora subestação 4.

Outros resultados não puderam ser conferidos porque até o final deste trabalho as reformas e instalações ainda não haviam sido concluídas.

3.3.4 Estudos de compensação da subestação 1 (Trafo 225kVA):

O estudo, então, se centrou no Trafo 225 KVA da subestação um, que quando todas as demais cargas estavam fora de operação chegou a reduzir o FP da planta de patamares de 0,511 (às 13h00min do dia 11 Nov. 2009), não ultrapassando os 0,75 de média em todo o período observado (Figura 21). Já a potência ativa no período em que a capacidade máxima da planta foi desligada (utilizando-se apenas as cargas residuais mínimas necessárias) não passou de 115 kW (Figura 20).

Este Trafo sem compensação é justamente aquele ligado às áreas administrativas da planta, que provavelmente foram subestimados devido às cargas que deveriam alimentar, gerando este problema específico de baixa eficiência (baixo FP).

Aproveitando período de manutenção⁷ da planta industrial, quando o mínimo de cargas ficou de carga no sistema elétrico, extraiu-se os dados de potência ativa e fator de potência. Este procedimento foi necessário porque somente se tem condições de verificar esses valores na planta como um todo e não em cada subestação, e para comprovar a hipótese dos problemas na subestação 1 esta foi uma das alternativas viáveis encontradas.

⁷ Este procedimento foi adotado porque se notou que as maiores multas por reativos (período quando a ampliação citada envolvendo a subestação 4 ainda não estava sendo testada) ocorriam justamente quando a indústria estava inoperante. Suspeitava-se de descuido justamente com as cargas da área administrativa, e por haver apenas modo de supervisão geral na planta, um evento de desligamento da indústria precisava ocorrer para conferir tal suspeita. É importante frisar que o quadro de pessoal responsável sequer cogitava isto.

No período compreendido entre 10 e 11 de setembro, especificamente, apenas o setor alimentado pelo Circuito O (Trafo de 225 kVA) e outras poucas cargas (desprezíveis na análise geral), o sistema de supervisão acusou os dados que permitiram gerar os gráficos das Figuras 20 (Potência Ativa) e 21 (FP) medidos:

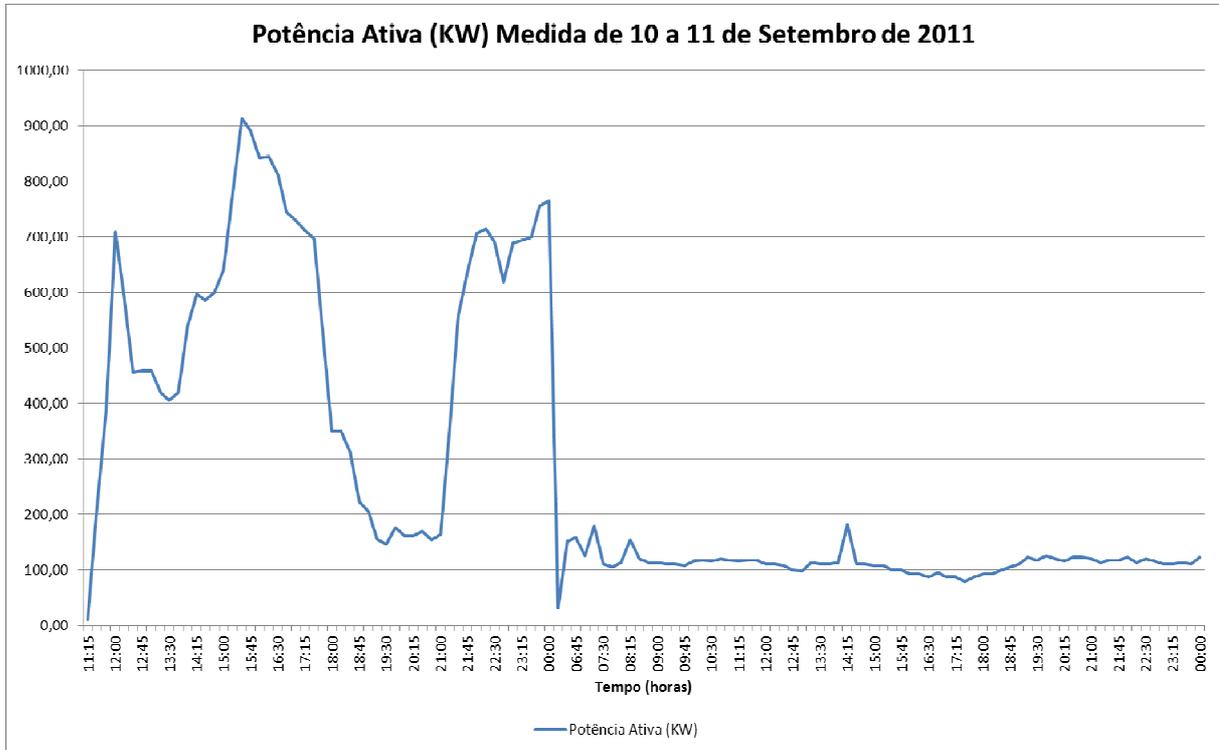


FIGURA 20: Análise da Potência Ativa com cargas apenas no Trafo 225 kVA.

Observe que justamente quando a planta industrial foi desligada para início do período de manutenção (Figura 20) coincide justamente com o período quando o FP caiu a níveis inaceitáveis (e tarifáveis) na planta.

Isso terminou por comprovar que a teoria levantada sobre ter sido subestimado o potencial de problemas no Trafo 225 kVA (provavelmente devido à sua aplicação na planta comparada com as áreas de maior consumo e potência).

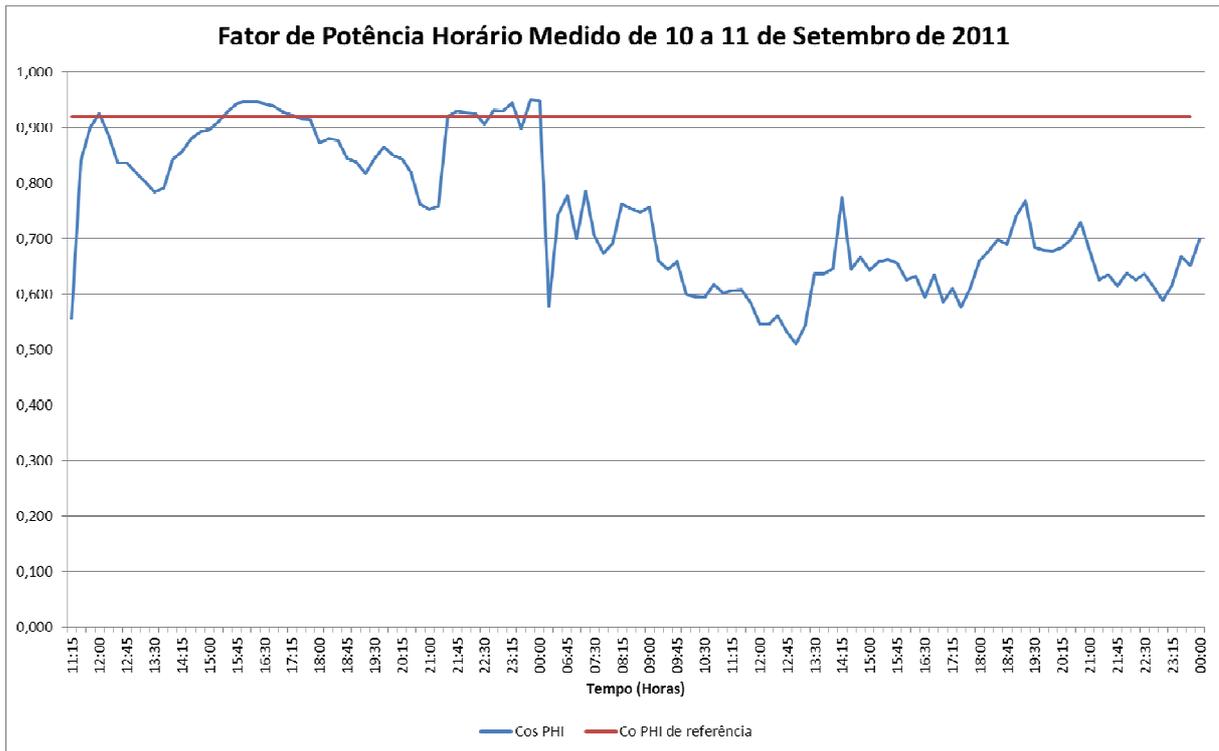


FIGURA 21: Análise do Fator de Potência com cargas apenas no Trafo 225 kVA.

Constata-se que o circuito do Trafo 225 kVA da subestação 1 precisa ter seu FP elevado de 0,511 (mínimo registrado) para 0,92 (ideal).

Com base apenas dos dados coletados e já observados nas Figuras 20 e 21, a correção da subestação 1 ficaria como segue (estimativas).

Fator de Potência mínimo Registrado: 0,511.

Potência Ativa média no período de manutenção: 115 kW.

Fator de Potência médio observado em todo período: $FP < 0,75$.

O desenvolvimento pode ser observado nas Equações 3.9, 3.10 e 3.11:

$$S = \frac{115000}{0,511} = 225048,9 \text{ VA} \quad (3.9)$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,511) \cong 59,27^\circ \quad (3.10)$$

$$Q = 225048,9 \sin 59,27^\circ \cong 193448,6 \text{ VAr} \quad (3.11)$$

Os valores necessários para a devida correção correspondem aos das Equações 3.12, 3.13 e 3.14:

$$S = \frac{115000}{0,92} = 125000 \text{ VA} \quad (3.12)$$

$$\phi = \cos^{-1}(0,92) \cong 23,07^\circ \quad (3.13)$$

$$Q = 125000 \sin 23,07^\circ \cong 48981,9 \text{ VAr} \quad (3.14)$$

Neste caso, Q_C deve ser de (Equação 3.15):

$$Q_C = 193448,6 - 48981,9 = 144446,7 \text{ VAr} \quad (3.15)$$

E para o valor da capacitância tem-se Equação 3.16:

$$C = \frac{144446,7}{2\pi f \cdot (380)^2} \cong 2653 \mu F \quad (3.16)$$

O que nos leva à necessidade de três bancos de capacitores de 40 kVAr cada um e mais um banco de 25 kVAr totalizando 145 kVAr de compensação, controlados em tempo real (pois este é o pior caso), para chavear os capacitores conforme a variação ocorrida nos índices de FP.

Na comparação sobre a corrente elétrica requerida sem compensação pela que seria necessária caso o sistema analisado tivesse sido compensado, tem-se (Equação 3.17 e 3.18):

$$I_{RMSi} = \frac{S_i}{V_{RMS}} = \frac{225048,9}{380} = 592,2 \text{ A} \quad (3.17)$$

$$I_{RMSf} = \frac{S_f}{V_{RMS}} = \frac{125000}{380} = 328,9 \text{ A} \quad (3.18)$$

Uma melhoria no sistema de aproximadamente 44,5 % (percentual de corrente elétrica que deixaria de ser desperdiçada em reativos).

3.3.5 Resultados obtidos com a aplicação da solução

Com a conclusão efetiva da correção na subestação 4, verificou-se a solução do problema de baixo FP nela verificado.

Na prática, porém, optou-se pelo uso de capacitores com 440 V_{CA} de operação em detrimento aos de 380 V_{CA} que corresponderiam à tensão nominal da rede elétrica da planta na área citada. Tal escolha foi justificada pelos técnicos como aumento na melhora da resposta para **tensão de surto**, relevante mesmo com a perda de 20% da potência reativa capacitiva do banco.

Já o quadro de compensação da subestação 1 (Trafo 225 kVA) careceu de tempo hábil para sua montagem e efetiva conferência dos resultados finais no tempo compreendido até o prazo final deste trabalho. Assim, os resultados práticos relacionados à intervenção realizada nesta subestação não poderão ser obtidas antes da finalização e efetiva entrega deste trabalho.

Observou-se que os problemas relacionados a reativos e aos demais aspectos da qualidade dos insumos energéticos na planta estudada podem ser minimizados com a adoção de supervisão menos generalizada sobre a planta, com aplicação de indicadores de qualidade *in loco*, nos diversos Trafos das subestações e outras áreas consideradas estratégicas, e não apenas na subestação ou planta como todo. Foi percebido que agregar este controle e supervisão apenas na planta total dificulta em muito a análise correta dos problemas envolvendo qualidade energética.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as vantagens oriundas do aproveitamento dos subprodutos obtidos do beneficiamento de grãos (especialmente a casca de arroz) e a localização geográfica favorável da planta industrial estudada tornaram viável o aproveitamento energético disponível na própria indústria.

A perspectiva de potencial energético suficiente para as necessidades internas da indústria com possibilidade de venda do excedente energético gerado mostrou-se atrativo e viável.

Mas atrelado a este potencial — e a qualquer outro similar — é preciso planejamento, organização e manejo de recursos, além de um projeto bem definidos e preciso, para corrigir eventuais prejuízos relacionados à baixa eficiência energética na planta.

Conforme citado por Mosko (2010), ter um programa de eficiência energética não é fazer um racionamento, ou preocupar-se apenas quando há multas na fatura de energia elétrica, mas é, sim, ter eficiência em seu uso. Um programa de eficiência energética deve ter um corpo de pessoal que irá planejar e controlar as medidas de eficiência dentro da planta.

Infelizmente, o que se notou foi a aplicação errada de investimentos, que trarão pouco ou nenhum retorno efetivo, quando na opção por eficiência energética teria sido de maior eficácia.

Não houve cuidado durante o projeto, que embora oneroso foi precário. A produção é descuidada, pois é uma mistura de tecnologias defasadas com acréscimos de partes novas, há pouca ou nenhuma aplicação de automação no quesito de busca pela eficiência energética e a manutenção preventiva mostrou-se precária nesta área.

Por tratar-se de uma planta industrial que recebeu a intervenção de uma expansão para aproveitar seu próprio potencial energético — que estava sendo desperdiçado (insumos da

casca de arroz) — os cuidados com eficiência energética ficaram à margem do projeto, gerando os problemas encontrados. Tais problemas foram tratados apenas quando surgiram, com o projeto já concluído e em operação, gerando outros prejuízos com manutenção e ociosidade do sistema.

A expectativa por resultados positivos, proporcional à magnitude dos investimentos depositados pelos associados da Empresa, é frustrada diante de casos como os encontrados, onde por falta de projeto cuidadoso ou manutenção, havia desperdício em detrimento à eficiência energética. Tais resultados, e os procedimentos agora necessários sendo executados, eram claramente perceptíveis e não precisariam ter sido contemplados apenas após a finalização da obra.

Por falta de acesso aos valores já investidos e tempo hábil para avaliação futura das poucas implementações agora realizadas, não se pode mensurar lucro ou período de retorno dos investimentos da Empresa em eficiência energética, mas visualmente nota-se algum impacto positivo como norte de que ainda há muito por fazer para concretizar os objetivos da Empresa. Que poderão ser obtidos após análise e aplicação do que foi aqui proposto.

A experiência em campo reafirmou os conceitos teóricos, e solidificou na prática profissional, que a qualidade energética é uma prioridade e premissa constante, atrelada às novas e crescentes demandas pelo aproveitamento mais racional e melhor dos insumos energéticos. Em especial, ao controle de reativos como ferramenta na busca e resposta por essas presentes e futuras necessidades.

Nossa intervenção objetivou avaliar ações em um caso real e constatar a atual situação (mostradas em estudos anteriores) pela busca de autossuficiência energética aliada à eficiência da mesma.

Recomendamos assim, continuação de projetos nesta mesma planta, devido inclusive à boa recepção de nossos esforços, focando em temas como impactos de investimentos já realizados, como:

- Eficiência dos motores e máquinas do parque fabril e equipamentos dos setores de administração;
- Estudos de luminotécnica;
- Climatização e automação, entre outros;
- Não se esquecendo do próprio setor de cogeração de energia oriunda da queima de casca de arroz, onde notamos um campo fértil de estudos.

Assim, ter um plano de conservação de energia não é sinônimo de redução de investimentos e muito menos má aplicação dos mesmos.

A proposta da Empresa é viável e um importante marco de potencial em termos de insumos energéticos, com uma atuação inovadora e digna de ser seguida. Precisa apenas amparar-se em projetos sólidos e gerenciados pelo norte da eficiência energética, do contrário, os investimentos tenderão a serem maiores e os resultados insatisfatórios.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CUNHA, JOSE C. C., et al. **Relatório do projeto de pesquisa “aproveitamento energético da casca de arroz”**. Porto Alegre: CIENTEC – FINEP, 1986. 170p.

DINÍZ, J. **Conversão térmica de casca de Arroz à baixa temperatura: Produção de Bioóleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente**. Tese apresentada ao Curso de Doutorado do PPGQ, - UFSM, RS, 2005.

ELETROBRAS. PROCEL INDÚSTRIA. **Eficiência energética na indústria**. Brasília: Publicação da confederação nacional da indústria – CNI | Unidade de Competitividade - COMP – Agosto de 2009.

FOLETTTO, E.L. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. 2005. Disponível em: <http://w.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000600021
<http://economiabrasil.com/pib-definicao-e-calculo-do-valor/>> Acesso em 26 mai. 2011.

KHAN, S. **Industrial Power Systems**. CRC Press, Taylor e Francis Groups. 2008

MAYER, F. D. **Aproveitamento da casca de arroz em uma micro central termelétrica-avaliação dos impactos econômicos e ambientais para o setor arrozeiro do Rio Grande do Sul**. UFSM CT PPGEP. Santa Maria RS, Brasil, 2009. Disponível em:

MAYER, F.D.; HOFFMANN, R.; RUPPEHAL, J. E. **Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo da casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz**. XIII Simpósio de engenharia de produção – SIMPEP. Bauru, SP. Nov. 2007

MOSKO, Juliano Marcos, PILATTI, Luiz Alberto, PEDROSO, Bruno. **Eficiência energética na indústria: Elaboração e Planejamento de Programas de Conservação de Energia**. Revista de Engenharia e Tecnologia ISSN 2176-7270. Abril de 2010.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Sinais Senoidais: Tensão e Corrente Alternadas**. 3ª Ed. Florianópolis: CEFET-SC GEE, 2006. 187p.

PEREIRA, José Cláudio. **Tarifa Horó sazonal**. Disponível em: <http://www.joseclaudio.eng.br/Ponta.pdf> Acesso em 31 out. 2011.

RIBAS, C. **Aproveitamento de Biomassa Pós-Colheita Florestal de Pinus**. 2008. Disponível em: <<http://w.scielo.oces.mctes.pt/pdf/slu/v16n1/v16n1a07.pdf>

http://w.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000600021
<http://economiabrasil.com/pib-definicao-e-calculo-do-valor/>> Acesso em 26 mai. 2011.

SOLA, Antônio V. H. **Fatores Humanos como Barreiras para Eficiência Energética em Indústrias**. Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia. UTFPR - Ponta Grossa, Paraná. Dezembro de 2006.

WEG. **Controlador Automático do Fator de Potência**. Manual de Instalação e Operação, 2010.

ANEXOS

**ANEXO A – TABELA OBTENÇÃO DE F PARA CORREÇÃO DE FP
(WEG)**

**ANEXO B – PLANILHAS DE CONSUMO COM OCORRÊNCIAS DE
MULTAS**

ANEXO A – TABELA OBTENÇÃO DE F PARA CORREÇÃO DE FP (WEG)

FP Atual	Fator de Potência Desejado																				
	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.50	0.982	1.005	1.034	1.060	1.096	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.245	1.275	1.305	1.337	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.589	1.732
0.51	0.997	0.982	0.989	1.015	1.041	1.067	1.094	1.120	1.147	1.175	1.203	1.231	1.261	1.292	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544	1.697
0.52	0.993	0.919	0.945	0.971	0.997	1.023	1.050	1.076	1.103	1.131	1.159	1.187	1.217	1.245	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643
0.53	0.990	0.875	0.902	0.928	0.954	0.980	1.007	1.033	1.060	1.088	1.116	1.144	1.174	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.457	1.600
0.54	0.989	0.835	0.861	0.887	0.913	0.939	0.966	0.992	1.019	1.047	1.075	1.103	1.133	1.164	1.198	1.230	1.267	1.308	1.355	1.416	1.559
0.55	0.759	0.795	0.821	0.847	0.873	0.899	0.925	0.952	0.979	1.007	1.035	1.063	1.093	1.124	1.156	1.190	1.227	1.268	1.315	1.376	1.519
0.56	0.730	0.755	0.782	0.808	0.834	0.860	0.887	0.913	0.940	0.968	0.996	1.024	1.054	1.085	1.117	1.151	1.188	1.229	1.277	1.337	1.480
0.57	0.692	0.718	0.744	0.770	0.796	0.822	0.849	0.875	0.902	0.930	0.958	0.986	1.015	1.047	1.079	1.113	1.150	1.191	1.239	1.299	1.442
0.58	0.655	0.681	0.707	0.733	0.759	0.785	0.812	0.838	0.865	0.893	0.921	0.949	0.979	1.010	1.042	1.078	1.115	1.154	1.202	1.262	1.405
0.59	0.619	0.645	0.671	0.697	0.723	0.749	0.775	0.802	0.829	0.857	0.885	0.913	0.943	0.974	1.006	1.040	1.077	1.115	1.165	1.225	1.369
0.60	0.583	0.609	0.635	0.661	0.687	0.713	0.740	0.766	0.793	0.821	0.849	0.877	0.907	0.938	0.970	1.004	1.041	1.082	1.130	1.190	1.333
0.61	0.549	0.575	0.601	0.624	0.653	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873	0.904	0.936	0.970	1.007	1.046	1.095	1.155	1.299
0.62	0.515	0.542	0.568	0.594	0.620	0.646	0.673	0.699	0.725	0.754	0.782	0.810	0.840	0.871	0.903	0.937	0.974	1.015	1.063	1.123	1.266
0.63	0.483	0.509	0.535	0.561	0.587	0.613	0.640	0.666	0.693	0.710	0.749	0.777	0.807	0.838	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.451	0.474	0.503	0.529	0.555	0.581	0.608	0.634	0.661	0.689	0.717	0.745	0.775	0.806	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.419	0.445	0.471	0.497	0.523	0.549	0.575	0.602	0.629	0.657	0.685	0.713	0.743	0.774	0.806	0.840	0.877	0.916	0.966	1.025	1.169
0.66	0.388	0.414	0.440	0.466	0.492	0.518	0.545	0.571	0.598	0.625	0.654	0.682	0.712	0.743	0.775	0.809	0.846	0.887	0.935	0.995	1.138
0.67	0.358	0.384	0.410	0.436	0.462	0.488	0.515	0.541	0.568	0.595	0.624	0.652	0.682	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.965	1.108
0.68	0.328	0.354	0.380	0.406	0.432	0.458	0.485	0.511	0.538	0.565	0.594	0.622	0.652	0.683	0.715	0.749	0.788	0.827	0.875	0.935	1.079
0.69	0.299	0.325	0.351	0.377	0.403	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623	0.654	0.688	0.720	0.757	0.795	0.845	0.905	1.049
0.70	0.270	0.296	0.322	0.348	0.374	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.564	0.594	0.625	0.657	0.691	0.728	0.769	0.817	0.877	1.020
0.71	0.242	0.268	0.294	0.320	0.346	0.372	0.399	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.214	0.240	0.266	0.292	0.318	0.344	0.371	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.186	0.212	0.238	0.264	0.290	0.316	0.343	0.369	0.396	0.424	0.452	0.480	0.510	0.541	0.573	0.607	0.644	0.685	0.733	0.793	0.936
0.74	0.159	0.185	0.211	0.237	0.263	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.132	0.158	0.184	0.210	0.236	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.399	0.429	0.460	0.492	0.526	0.563	0.604	0.652	0.712	0.855
0.77	0.079	0.105	0.131	0.157	0.183	0.209	0.236	0.262	0.289	0.317	0.345	0.373	0.403	0.434	0.466	0.500	0.537	0.578	0.625	0.685	0.829
0.78	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.182	0.209	0.235	0.262	0.290	0.318	0.346	0.376	0.407	0.439	0.473	0.510	0.551	0.599	0.659	0.802
0.79	0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.156	0.183	0.209	0.235	0.264	0.292	0.320	0.350	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.633	0.776
0.80		0.026	0.052	0.078	0.104	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.609	0.750
0.81			0.026	0.052	0.078	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.296	0.326	0.358	0.391	0.426	0.467	0.521	0.581	0.724
0.82				0.026	0.052	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.555	0.698
0.83					0.026	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.529	0.672
0.84						0.026	0.053	0.079	0.105	0.134	0.162	0.190	0.220	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85							0.027	0.053	0.080	0.108	0.136	0.164	0.194	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86								0.026	0.053	0.081	0.109	0.137	0.167	0.198	0.230	0.264	0.301	0.342	0.390	0.450	0.593
0.87									0.027	0.055	0.083	0.111	0.141	0.173	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88										0.026	0.056	0.084	0.114	0.146	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89											0.026	0.056	0.086	0.117	0.149	0.183	0.220	0.261	0.309	0.369	0.512
0.90												0.026	0.056	0.089	0.121	0.155	0.192	0.233	0.281	0.341	0.484
0.91													0.030	0.061	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.92														0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.283	0.426
0.93															0.032	0.065	0.103	0.144	0.192	0.252	0.395
0.94																0.034	0.071	0.112	0.160	0.221	0.363
0.95																	0.037	0.079	0.126	0.186	0.329
0.96																		0.041	0.089	0.149	0.292
0.97																			0.046	0.106	0.251
0.98																				0.060	0.203
0.99																					0.143

Fonte: WEG.

Tabela de obtenção do fator de conversão F das Equações 2.8 e 2.9.

ANEXO B – PLANILHAS DE CONSUMO COM OCORRÊNCIAS DE MULTAS (CONTINUAÇÃO).

2011	VALORES EM R\$											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TOTAL	R\$ 66.416,14	R\$ 156.777,68	R\$ 41.317,46		R\$ 148.473,80	R\$ 89.624,40	R\$ 127.860,30					
Multa Atraso												
CONSUMO EM PONTA	R\$ 10.123,10	R\$ 26.479,75	R\$ 402,74		R\$ 40.786,65	R\$ 8.660,42	R\$ 15.213,38					
CONSUMO FORA PONTA	R\$ 20.168,40	R\$ 60.989,53	R\$ 3.424,40		R\$ 40.629,32	R\$ 28.031,75	R\$ 52.130,74					
DEMANDA FORA PONTA	R\$ 16.230,38	R\$ 16.901,69	R\$ 29.161,13		R\$ 30.316,77	R\$ 30.376,10	R\$ 26.031,43					
FER FP	R\$ 3.622,22	R\$ 8.456,88	R\$ 287,13		R\$ 6.327,88	R\$ 5.149,34	R\$ 7.013,13					
FER P	R\$ 2.490,22	R\$ 2.807,88	R\$ 65,75		R\$ 1.118,13	R\$ 343,38	R\$ 383,95					
FDR FP	R\$ 981,90	2086,48	761,76				R\$ 1.997,78					
Ultrapassagem DFP												
Crédito de Ultrapassagem												

↓
Falta de Manutenção na Compensação

Fonte: Dados de Faturas Pagas CAAL 2011.

Onde: FP e P são consumos Fora de Ponta e Ponta, respectivamente.

ÍNDICE

CAAL	Fator de Potência
6, 7, 13, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 44, 45, 46, 49, 57, 58	6, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 44, 50, 54
Capacitores	Indústria
6, 16, 21, 26, 35, 40, 41, 42, 43, 50, 51, 52	6, 11, 12, 13, 15, 16, 40, 41, 45, 46, 49, 53
Energia.....	Qualidade
6, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 25, 30, 31, 39, 40, 46, 49	6, 13, 40, 49, 53