

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE RICHTER LUCAS

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS
INDUSTRIAIS**

Porto Alegre

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis
Loureiro

Porto Alegre
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE RICHTER LUCAS

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Profa. Dr^a. Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Flávio Antônio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Porto Alegre, Dezembro de 2013.

Dedico este trabalho aos meus pais e irmã, em especial pelo apoio e incentivo durante o curso de graduação.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã pelo apoio e incentivo.

Aos colegas pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

Aos professores da UFGRS.

Ao professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro por ser um excelente profissional e pela orientação no trabalho.

À UFRGS pelo ensino gratuito e de qualidade.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo demonstrar os princípios básicos da correção do fator de potência, mostrando todos os seus benefícios tanto em relação à custos quanto aos benefícios à alimentação da instalação. Visando aumentar o fator de potência de uma indústria, foi proposto no trabalho um projeto de compensador de reativos, utilizando banco de capacitores. Considerações finais e sugestões de melhoria estão apresentadas ao final do trabalho.

Palavras-chave: Compensação. Fator de potência. Banco de Capacitores. Instalação industrial.

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the basic principles of power factor correction, showing all its benefits both in relation to the costs and the benefits for the installation power supply. Aiming to increase the power factor of an industry, was proposed a project of a reactive compensator using capacitor bank. Final remarks and suggestions for improvement are presented at the end of the work.

Keywords: Compensation. Power factor. Capacitor Bank. Industrial Installation.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	12
1.2	MOTIVAÇÃO.....	13
1.3	OBJETIVOS	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2.	ASPECTOS TEÓRICOS	16
2.1	RAZÕES PARA O BAIXO VALOR DO FATOR DE POTÊNCIA	21
2.2	REGULAMENTAÇÃO PARA FORNECIMENTO DE REATIVOS	23
2.3	MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA	26
2.4	LOCALIZAÇÃO DOS CAPACITORES E FORMAS DE INJEÇÃO DE REATIVOS.....	28
2.5	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E MANOBRA DOS CAPACITORES.....	34
2.6	TIPOS DE CONTROLE SOBRE BANCOS DE CAPACITORES.....	34
2.7	COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA EM CARGAS NÃO LINEARES (PRESENÇA DE HARMÔNICAS)	36
3	PROJETO DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA	44
3.1	CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA.....	52
3.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE HARMÔNICAS.....	56
3.3	DIAGRAMAS E ESQUEMÁTICOS DO PAINEL.....	58
3.4	TARIFAÇÃO ANTES E APÓS A CORREÇÃO DE FP.....	61
4	CONCLUSÃO	68
5	REFERÊNCIAS.....	69

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - FORNECEDOR DE ENERGIA REATIVA.....	18
FIGURA 2 - RECEPTOR DE ENERGIA REATIVA.....	18
FIGURA 3 - TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS.....	18
FIGURA 4 - TETRAEDRO DAS POTÊNCIAS.....	20
FIGURA 5 - POSSIBILIDADE DE LOCALIZAÇÃO DOS CAPACITORES (BANCOS) EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA.....	29
FIGURA 6 - MODELO ELÉTRICO DE CAPACITOR INSTALADO EM REDE COM HARMÔNICAS.....	37
FIGURA 7 - MODELO ELÉTRICO DE CONJUNTO CAPACITOR/REATOR INSERIDO EM REDE COM HARMÔNICAS.....	39
FIGURA 8 - MODELO ELÉTRICO DE CONJUNTO CAPACITOR/REATOR INSERIDO EM REDE COM HARMÔNICAS.....	40
FIGURA 9 - LOCAIS POSSÍVEIS DE INSTALAÇÃO DO BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES.....	47
FIGURA 10 - CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA PFW01-T06.....	52
FIGURA 11 - ESPECIFICAÇÕES DO CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA PFW01-T06.....	53
FIGURA 12 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LIGAÇÃO DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE DO CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA PFW01-T06.....	54
FIGURA 13 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LIGAÇÃO DA MEDIÇÃO DE TENSÃO DO CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA PFW01-T06.....	54
FIGURA 14 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PAINEL DE CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA.....	58
FIGURA 15 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA.....	59
FIGURA 16 - LAYOUT EXTERNO FRONTAL E INTERNO FRONTAL DO PAINEL.....	60

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - POTÊNCIA MÁXIMA DOS CAPACITORES LIGADOS A MOTORES.....	30
QUADRO 2 - NÍVEIS DE TENSÃO ADMISSÍVEIS.....	32
QUADRO 3 - REATORES TÍPICOS ANTI-RESSONANTES DE MERCADO.....	40
QUADRO 4 - EXEMPLO DO QUADRO CRIADO ATRAVÉS DA LEITURA DO MEDIDOR DE ENERGIA.....	44
QUADRO 5 - TARIFICAÇÃO HORO-SAZONAL AZUL VIGENTE NA CONCESSIONÁRIA AES SUL PARA SUBGRUPO A-4.....	61
QUADRO 6 - RESULTADOS FINAIS DA SIMULAÇÃO.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

FDR: Faturamento do excedente de demanda de potência reativa

FER: Faturamento do excedente de consumo de energia reativa

THD: Distorção harmônica total (“Total harmonic distortion”)

UFDR: Unidades FDR

UFER: Unidades FER

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1. INTRODUÇÃO

A corrente elétrica utilizada para prover tanto indústrias quanto hospitais, residências, entre outros, é caracterizada como um número complexo, pois possui uma parte ativa e uma parte reativa. A parte ativa da corrente elétrica seria sua componente real, a qual está em fase com a tensão, e seria a parte da corrente elétrica que é realmente usada pela indústria, hospital, residência, a qual é transformada em calor por equipamentos eletrônicos, luz por lâmpadas, em movimento em motores elétricos, e demais usos. A parte reativa da corrente elétrica seria sua componente imaginária, a qual é defasada de 90° em relação a tensão, e seria a parte da corrente elétrica que não é realmente usada, ou seja, esta energia não é transformada em movimento, ou calor, ou luz pelos equipamentos, pois ela da mesma maneira que é “absorvida”, é devolvida às concessionárias de energia em cada ciclo dos 60Hz.

A energia reativa é utilizada por aparelhos ou máquinas que possuem em seu circuito, componentes que transformam a energia elétrica em magnética, dentre outros. Como exemplo, pode-se citar equipamentos que possuam motores elétricos, como aspiradores de pó, máquinas de lavar roupa, ventiladores, aparelhos condicionadores de ar, elevadores, lâmpadas que possuam reatores e aparelhos eletrônicos em geral, que possuem fontes chaveadas.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A parte reativa da corrente elétrica, mesmo não sendo, de um certo ponto de vista, utilizada pelo usuário final, acaba gerando os mesmos custos de transmissão de uma corrente puramente ativa, a qual seria totalmente utilizada, e isso inclui, por exemplo, dimensionamento de transformadores, bitolas de fiação, disjuntores, contadores, entre outros, gerando custos para a concessionária, que apenas produz energia ativa, e pode ter que transmitir uma energia maior do que realmente produz, gerando custos de transmissão mais elevados. Além destes, a energia reativa diminui a qualidade da energia fornecida aos equipamentos, pois gera quedas de tensão muito mais elevadas, e perdas por aquecimento na fiação.

Devido a isso, as indústrias começaram a pagar multas se utilizarem mais que uma certa quantidade de energia reativa em relação a energia ativa. Essa proporção começou sendo de 0,85, ou seja, a proporção entre a energia ativa e a energia aparente (assim chamada a energia que compreende tanto a parte ativa quanto reativa, em uma soma vetorial da componente real e da componente imaginária), não deveria ser menor do que 0,85. Atualmente, essa

proporção, chamada de fator de potência, não deve ser menor do que 0,92, sendo as indústrias tarifadas pelo uso de potência reativa e pela demanda de potência reativa. Recentemente muitos consumidores residenciais vem sendo cobrados pelas concessionárias, pelo uso de energia reativa. Isso ocorre nos casos onde houve a troca, pela própria concessionária, do equipamento que mede a demanda de energia da residência, trocando o aparelho analógico por um digital, e a tendência futura, além de todos os usuários pagarem pela energia reativa, haverá cobrança diferenciada para horários determinados, onde a energia será mais cara em horários de pico de consumo típicos, e mais branda em horários de menor demanda, o que já ocorre a anos na tarifação da energia para indústrias, o qual tem se dado através de média horária. O tema de tarifação será melhor abordado no capítulo 2.7.

1.2 MOTIVAÇÃO

A escolha do tema de correção do fator de potência de cargas industriais, deve-se ao interesse próprio do formando pelo assunto, devido a ampla aplicabilidade prática do mesmo em indústrias e comércio de grande porte, além da possível aplicação da correção de fator de potência à consumidores residenciais em um futuro próximo.

1.3 OBJETIVOS

A correção do fator de potência mostra-se muito importante pelos aspectos de melhora na qualidade da energia fornecida aos equipamentos, possível redução em custos na infraestrutura da transmissão de energia e menor gasto com energia elétrica por parte das indústrias, ou até consumidores finais. Uma das formas de corrigir o fator de potência seria fornecer energia reativa aos equipamentos que a necessitem, sem que isto tenha que ser feito pela concessionária de energia.

Duas das formas mais usadas para gerar energia reativa é através do uso de capacitores ou através do uso de motores superexcitados, sendo o primeiro caso o mais utilizado e o segundo, utilizado quando a necessidade de energia reativa é muito grande, visto que tanto o custo quanto a potência de um motor síncrono superexcitado são muito grandes.

Cada caso requer um estudo específico para correção do fator de potência, pois um projeto bem executado fornece somente a potência reativa necessária aos equipamentos e somente no momento que eles necessitam. Outro fator muito importante é o local onde os capacitores ou motores superexcitados são instalados. Eles podem ser instalados diretamente

sobre a carga, sendo manobrados junto à carga, podem ser ligados, por exemplo, a um barramento secundário, onde estão ligadas diversas cargas, podem ser instalados junto ao quadro geral de baixa tensão (QGBT), onde corrigiriam o fator de potência de praticamente toda a indústria, ou ainda antes do transformador, na entrada de energia, no lado da alta tensão.

Quanto mais afastada da carga for realizada a correção do fator de potência, mais abrangente o fator de demanda calculado, menor o custo de instalação e maior o risco de fornecer mais energia reativa que o necessário à indústria, o que levaria a uma elevação na tensão dos equipamentos da indústria, possível queima de componentes e tarifação por parte da concessionária entre 0h e 6h, onde o fator de potência capacitivo é medido, sendo que nos demais horários, apenas o fator de potência indutivo é considerado na medição.

Os efeitos da correção de fator de potência, sendo ela, por exemplo, através do uso de capacitores ou motores superexcitados, beneficiarão somente o circuito à montante do ponto de correção, sendo que a jusante tem-se todos os problemas relacionados a fator de potência não ideal.

A não linearidade da carga gera a presença de harmônicas de corrente, as quais podem ser destrutivas a todos os equipamentos da indústria, caso estas entrem em ressonância com a frequência do circuito LC constituído pela indutância do circuito e capacitância dos capacitores usados na correção do fator de potência, pois caso isso ocorra, haverá correntes elétricas significativas circulando por todo o circuito e chegando aos capacitores. Caso haja ressonância, o desligamento dos capacitores, tanto por manobra quanto pela queima dos mesmos, é o mais sensato a se fazer, preservando demais equipamentos de maior valor da indústria.

Estas harmônicas destrutivas somente são uma preocupação para circuitos com capacitores acoplados, pois naturalmente, circuitos de baixa capacitância possuem uma frequência de ressonância na casa dos kHz, o que muda caso sejam acoplados capacitores ao circuito, pois estes acabam por baixar a frequência de ressonância do circuito a níveis compatíveis com as harmônicas de corrente.

Uma forma de bloquear as correntes ressonantes do circuito é através do uso de reatores anti-ressonantes em série com os capacitores. Devido ao fato de a maioria das cargas industriais possuírem um espectro harmônico semelhante, os reatores anti-ressonantes que serão ligados em série com os capacitores possuem seu valor tabelado e dependem apenas da capacitância do capacitor.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste trabalho é apresentado o embasamento teórico necessário para melhor entendimento do tema proposto, assim como um estudo de caso, onde é realizado um projeto de correção de fator de potência para uma indústria.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Como dito anteriormente, a corrente elétrica é uma função complexa, a qual compreende uma parte real e uma parte imaginária, sendo a parte real composta pela parte ativa dessa energia, e a parte imaginária composta pela parte reativa da corrente. Esta parte reativa da corrente ocorre devido a uma defasagem angular entre a tensão e a corrente elétrica, por isso o fator de potência também é definido conforme Fórmula (1):

$$FP = \cos\theta \quad (1)$$

Onde:

FP = Fator de potência

θ = Defasagem entre a corrente eficaz e a tensão eficaz ($^{\circ}$)

A potência aparente é o produto entre as correntes e as tensões eficazes, o qual compreende tanto a parte ativa quanto a parte reativa da potência, sendo definida pela letra S e possuindo como unidade o kVA (kilo Volt Ampère), conforme Fórmula (2) para sistemas trifásicos:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \quad (2)$$

Onde:

U_L = Tensão de linha (V);

I_L = Corrente de linha (A);

S = Potência aparente (kVA).

A potência ativa é a potência aparente multiplicada pelo cosseno da defasagem entre a tensão eficaz e a corrente eficaz, sendo definida pela letra P e possuindo como unidade o kW (kilo Watt), conforme seguinte Fórmula (3):

$$P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Onde:

U_L = Tensão de linha (V);

I_L = Corrente de linha (A);

P = Potência ativa (kW);

θ = Defasagem entre a corrente eficaz e a tensão eficaz ($^\circ$).

A potência reativa é a potência aparente multiplicada pelo seno da defasagem entre a tensão eficaz e a corrente eficaz, sendo definida pela letra Q e possuindo como unidade o *kvar* (kilo Volt Ampère reativo), conforme seguinte Fórmula (4):

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \text{sen}\theta \quad (4)$$

Onde:

U_L = Tensão de linha (V);

I_L = Corrente de linha (A);

Q = Potência reativa (kvar);

θ = Defasagem entre a corrente eficaz e a tensão eficaz ($^\circ$).

Outra forma de definir o fator de potência é através da relação entre a potência ativa e a potência aparente, conforme seguinte Fórmula (5):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (5)$$

Onde:

FP = Fator de potência;

P = Potência ativa (kW);

S = Potência aparente (kVA).

Vetorialmente, a potência reativa é representada com um defasamento de 90° em relação à potência ativa, sendo esta adiantada de 90° quando é um fornecedor de energia reativa (capacitores, motores superexcitados, e demais), e atrasada de 90° quando é um receptor de energia reativa (cargas com demanda de energia reativa). Pode-se visualizar estes vetores nas Figuras (1) e (2):

Figura 1 - Fornecedor de energia

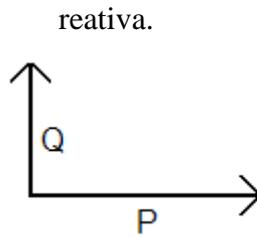
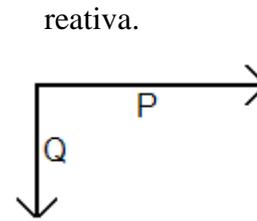


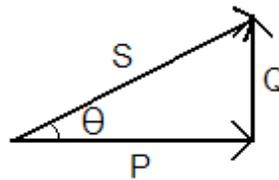
Figura 2 - Receptor de energia



Fonte: Próprio Autor.

Os vetores da potência aparente, potência ativa e potência reativa formam o triângulo das potências, onde a soma vetorial das duas últimas, forma a potência aparente, como pode-se observar na figura (3):

Figura 3 - Triângulo das potências.



Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, torna-se válida a Fórmula (6):

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (6)$$

Onde:

P = Potência ativa (kW);

S = Potência aparente (kVA);

Q = Potência reativa (kvar).

Outras formas de determinar o fator de potência são através dos consumos de energia ativa (kWh) e reativa (kvarh), em um determinado período de tempo, e calculados a partir das Fórmulas (7) e (8):

$$FP = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2 + kvarh^2}} \quad (7)$$

ou

$$FP = \cos \arctg \frac{kvarh}{kWh} \quad (8)$$

Onde:

FP = Fator de potência;

kWh = Energia ativa;

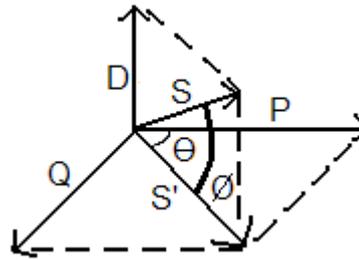
$kvarh$ = Energia reativa.

Caso se tenha, por exemplo, uma indústria com diversos motores elétricos, o somatório da potência ativa utilizada por estes, é representado pela letra P enquanto que o somatório da potência reativa utilizada por estes menos a potência reativa fornecida por capacitores, motores superexcitados, entre outros, forma a letra Q , sendo a potência reativa demandada da concessionária.

É dessa forma que ocorre a correção do fator de potência do ponto de vista matemático, tenta-se igualar a potência reativa necessitada pelas máquinas à potência reativa fornecida por outros componentes, tentando tornar Q igual a zero. Assim a potência aparente será igual a potência ativa, a qual não mais será acrescida de potência reativa. Como o cosseno do ângulo entre a potência aparente e a potência ativa torna-se zero, temos que o fator de potência passa a ter valor unitário.

Isto é válido para quando as cargas que deseja-se corrigir o fator de potência são lineares. Pode ocorrer de as cargas não serem lineares, dessa forma, apesar de se conseguir um equilíbrio entre as cargas reativas demandadas e fornecidas, não haverá necessariamente uma correção total do fator de potência, pois haverá correntes harmônicas, as quais formam a chamada “corrente de distorção”. O triângulo de potência passa a não mais ser válido, pois a potência aparente passa a depender de mais um vetor, representado pela letra D , que é o somatório das correntes de distorção, sendo apropriado o modelo do “tetraedro de potências”, onde tem-se em duas dimensões a potência ativa e reativa, e na terceira a potência de distorção, sendo a potência aparente o somatório vetorial destas três potências, como pode-se observar na Figura (4):

Figura 4 - Tetraedro de potências.



Fonte: Próprio Autor.

Da mesma forma que a representação vetorial muda devido à potência de distorção, tem-se que as fórmulas passam também a contar com mais esta variável.

As Fórmulas (9) a (14), incluindo a corrente de distorção são apresentadas abaixo:

$$S'^2 = P^2 + Q^2 \quad (9)$$

$$S'^2 = P^2 + Q^2 \quad (10)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (11)$$

$$P = S' \cdot \cos\theta \quad (12)$$

$$S = \frac{S'}{\cos\phi} \quad (13)$$

Dessa forma:

$$FP = \frac{(S' \cdot \cos\theta)}{(S' \cdot \cos\phi)} \quad (14)$$

Onde:

P = Potência ativa (kW);

S' = Potência aparente sem contar a potência de distorção (kVA);

S = Potência aparente (kVA);

Q = Potência reativa (kvar);

θ = Defasagem entre a corrente eficaz e a tensão eficaz (°);

\emptyset = Defasagem entre a potência aparente sem contar a potência de distorção e a potência de distorção ($^{\circ}$).

2.1 RAZÕES PARA O BAIXO VALOR DO FATOR DE POTÊNCIA

Quando se estuda a quantidade de potência reativa que deve ser injetada em uma indústria a fim de tornar seu fator de potência unitário, deve-se primeiro procurar as causas para os baixos valores de fator de potência. Muitas vezes é mais fácil, e até mais barato consertar as causas do que necessariamente corrigir o fator de potência com a adoção de capacitores ou motores superexcitados, entre outros. A seguir são listadas as principais causas para baixo fator de potência das instalações:

- Motores de indução:

Motores de indução são máquinas elétricas com enrolamentos, os quais são consumidores de energia reativa. A carga que é submetido o motor, não é proporcional à quantidade de energia reativa demandada por este, possuindo pouca influência. A energia mais influenciada pela carga é a energia ativa que o motor necessita. Portanto, a operação de motores de indução a vazio ou com cargas baixas levam a baixos fatores de potência, pois pouca energia ativa é consumida em proporção à energia reativa. Devido a essa demanda praticamente constante de uma máquina elétrica por energia reativa, pode-se dimensionar um capacitor a ser ligado diretamente à máquina elétrica, a fim de compensar sua demanda por energia reativa. Seu dimensionamento deve levar em consideração a corrente de magnetização da máquina, onde a capacitância do capacitor não deve exceder este valor. A redistribuição das cargas em motores subutilizados, e posterior desligamento, para outros motores não plenamente utilizados em sua potência, mostra-se uma boa forma de melhorar o fator de potência de uma indústria, por exemplo.

- Transformadores:

Os transformadores seguem o mesmo princípio dos motores de indução, onde a carga a ele imposta não possui quase nenhuma influência sobre a quantidade de energia reativa necessitada por ele. Devido a essa demanda praticamente constante de um transformador por

energia reativa, pode-se dimensionar um capacitor a ser ligado diretamente à ele, a fim de compensar sua demanda por energia reativa. Seu dimensionamento deve levar em consideração a demanda por energia reativa do transformador quando este está à vazio, pois apesar da carga possuir pouca influência sobre a demanda por reativos, ela ainda é ligeiramente menor quando o transformador está nestas condições. A demanda por energia ativa, por outro lado, é diretamente proporcional à carga a que está submetido o transformador. A redistribuição das cargas em transformadores subutilizados e posterior desligamento para outros transformadores não plenamente utilizados em sua potência, também mostra-se como uma boa forma de melhorar o fator de potência de uma instalação.

- Lâmpadas de descarga:

Ao substituir lâmpadas incandescentes por lâmpadas de descarga, também chamadas de lâmpadas econômicas, reduz-se substancialmente a demanda por energia ativa, e aumenta-se também substancialmente a demanda por energia reativa, a qual era zero no caso das lâmpadas incandescentes. Essa demanda por energia reativa é devido ao uso de reatores incorporados às lâmpadas, os quais utilizam energia reativa por possuírem bobinas internas. O uso de reatores de alto fator de potência, que vem de fábrica com seu fator de potência corrigido, e a utilização de reatores eletrônicos, apresentam-se como excelentes formas de correção da energia reativa demandada por estas lâmpadas.

- Tensão acima do nominal:

Em motores elétricos, a potência reativa demandada é proporcional ao quadrado da tensão de alimentação, enquanto que, como visto anteriormente, a demanda por energia ativa é proporcional à carga a qual está submetido o motor. Dessa forma um aumento na tensão de alimentação da máquina irá influenciar a demanda por energia reativa por um fator quadrático, e não mudará a demanda por energia ativa, alterando significativamente o fator de potência da máquina.

Historicamente, as residências possuíam praticamente somente demanda por energia ativa, o que foi mudando com o passar dos anos, devido ao uso de diversos aparelhos que necessitam de potência reativa. As lâmpadas incandescentes foram substituídas por lâmpadas fluorescentes, os chuveiros elétricos foram substituídos por chuveiros elétricos com controle

de temperatura, que possui um circuito que necessita de potência reativa, começou-se a usar máquinas de lavar roupa, aparelhos condicionadores de ar, motores de elevadores, bombas d'água, computadores, notebooks e demais aparelhos eletrônicos com retificadores de tensão.

Em prédios comerciais, há muita demanda por potência reativa devido ao uso de aparelhos condicionadores de ar em larga escala, elevadores, lâmpadas fluorescentes e centros de processamento de dados.

Na indústria, a iluminação fluorescente e a vasta utilização de motores acabam por tornar a carga indutiva.

2.2 REGULAMENTAÇÃO PARA FORNECIMENTO DE REATIVOS

A ANEEL, através da resolução nº 456/2000 – Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica, Artigos 64 a 69, atualmente em vigor regulamenta o fornecimento de energia elétrica reativa quanto ao limite de referência do fator de potência e aos demais critérios de faturamento.

Através dessa regulamentação, tem-se que a medição do fator de potência deve pode ser feito de duas formas distintas. Este pode ser realizado por avaliação mensal, através de valores de energia ativa e reativa medidos durante o ciclo de faturamento, ou quando, a critério da concessionária, deseja-se fazer a medida do fator de potência capacitivo. Deve-se realizar a medição por avaliação horária, onde os valores de energia ativa e reativa devem ser medidos em intervalos de 1 hora ao longo 24 horas do dia, sendo o fator de potência capacitivo realizado entre às 23h30m e 6h30m, durante 6 horas consecutivas, por um período definido pela concessionária. No restante do dia deve ser medido o fator de potência reativo.

Sempre que o fator de potência for menor do que 0,92, será cobrado o excedente de energia reativa com tarifa de energia ativa e demanda ativa, pois a energia reativa acaba por “ocupar” uma capacidade de transmissão, mesmo que a energia não seja realmente utilizada, o que introduz o conceito de energia ativa reprimida.

A Fórmula (15) utilizada para o cálculo do fator de potência é apresentado abaixo:

$$FP = \cos \arctg \frac{kvar}{kWh} \quad (15)$$

Onde:

FP = Fator de potência;

kWh = Energia ativa;

$kvarh$ = Energia reativa.

A seguir são apresentadas as fórmulas para os métodos de avaliação mensal e horária, mas, antes disso são apresentadas algumas siglas pertinentes:

FDR = Faturamento (R\$) do excedente de demanda de potência reativa, ou seja, faturamento (R\$) da demanda de potência reativa reprimida, segundo a Fórmula (16):

$$FDR = UFDR \cdot \frac{R\$}{kW} \quad (16)$$

UFDR = Unidades FDR, demanda de potência reativa reprimida correspondente ao excedente de demanda de potência reativa.

FER = faturamento (R\$) do excedente de consumo de energia reativa, ou seja, faturamento (R\$) do montante de energia reativa reprimida, conforme Fórmula (17):

$$FER = UFER \cdot \frac{R\$}{kW} \quad (17)$$

UFER = Unidades FER, montante da energia ativa reprimida, correspondente ao excedente de consumo de energia reativa.

Na avaliação mensal, a Fórmula (18) utilizada para medição do fator de potência é apresentada abaixo:

$$UFDR = DM \cdot \frac{0,92}{fm} - DF \quad (18)$$

Onde:

UFDR = Unidades FDR, demanda de potência reativa reprimida correspondente ao excedente de demanda de potência reativa;

DM = Demanda máxima ativa registrada no ciclo de faturamento, com medições realizadas em intervalos de 15 minutos;

DF = Demanda faturável, maior valor entre a demanda medida e a contratada no ciclo de faturamento;

fm = Fator de potência médio mensal.

$$UFER = CA \cdot \left(\frac{0,92}{f_m} - 1 \right) \quad (19)$$

Onde:

UFER = Unidades FER, montante da energia ativa reprimida, correspondente ao excedente de consumo de energia reativa;

CA = Consumo ativo no ciclo de faturamento;

fm = Fator de potência médio mensal.

Na avaliação horária, a Fórmula (20) é utilizada para medição do fator de potência:

$$UFDR = DMCR - DF \quad (20)$$

Onde:

DF = Demanda faturável, maior valor entre a demanda medida e a contratada no ciclo de faturamento;

DMCR = Maior valor de demanda ativa corrigida, segundo Fórmula (21):

$$\max_{i=1}^n \left(DAi \cdot \frac{0,92}{f_i} - 1 \right) \quad (21)$$

Onde:

DAi = Demanda ativa registrada em medições horárias;

fi = Fator de potência médio horário.

$$UFER = \sum_{i=1}^n \left[\left(CAi \cdot \left(\frac{0,92}{f_i} - 1 \right) \right) \right] \quad (22)$$

Onde:

Cai = Consumo ativa registrado em períodos de 1 hora.

O valor de fi é lido de hora em hora por um registrador digital, o qual computa as quantidade de kWh e kvar. Sempre que o valor do fator de potência for menor do que 0,92, o registrador digital acumula o valor correspondente de UFER e calcula o valor de DMCR. Quando encerra-se o período de faturamento, o registrador fornece um valor acumulado de UFER e o valor máximo de DMCR. Possuindo estes valores, o sistema de faturamento calcula o valor de UFDR e os faturamentos FDR e FER.

2.3 MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA

Para efetuar-se a compensação de energia reativa, deve-se considerar que cada caso é único e não existe uma fórmula padrão, pois cada instalação elétrica possui suas particularidades e suas cargas, sendo que um projeto mal sucedido, disponibilizando menos ou mais potência reativa que o necessário, irá gerar um fator de potência indutivo ou capacitivo, o que pode levar a cobranças de energia reativa.

Existem três formas básicas de correção do fator de potência, sendo eles o aumento do consumo de potência ativa, a utilização de máquinas síncronas superexcitadas e a utilização de capacitores para prover a potência reativa necessária.

O fator de potência ideal é o fator unitário, onde não existe a presença de energia reativa. Dessa forma temos uma otimização do sistema, as mínimas perdas por aquecimento nos fios, as menores cargas em transformadores possível e ainda a melhor regulação de tensão possível. A busca pelo fator de potência unitário é muito comum na indústria, provendo a melhor qualidade de alimentação possível. O aumento na capacidade da instalação está ligado proporcionalmente a diminuição do uso de energia reativa, enquanto que a redução das perdas se dá em proporção quadrática em relação a diminuição da corrente elétrica. O ganho de capacidade na instalação é apresentado na Fórmula (23):

$$\Delta cap\% = \left(1 - \frac{FP_1}{FP_2}\right) \cdot 100\% \quad (23)$$

Onde:

FP_1 = Fator de potência antes da correção;

FP_2 = Fator de potência depois da correção;

$\Delta cap\%$ = Ganho de capacidade percentual da instalação.

A redução das perdas na instalação é apresentada na Fórmula (24):

$$\Delta p\% = \left(1 - \left(\frac{FP_1}{FP_2}\right)^2\right) \cdot 100\% \quad (24)$$

Onde:

FP_1 = Fator de potência antes da correção;

FP_2 = Fator de potência depois da correção;

$\Delta p\%$ = Diminuição no percentual de perdas da instalação.

Se deseja-se apenas o não pagamento de excedentes na conta de luz, referentes a energia reativa, o fator de potência almejado deve ser igual ou maior que 0,92, sendo aconselhado fazer o projeto para um fator de potência da ordem de 0,95 para haver uma margem para erro e uma margem maior para flutuações nas cargas reativas. Deve-se ter em mente que, como dito anteriormente, as concessionárias fazem a cobrança de energia reativa capacitiva entre 23h30m e 6h30m, pois o fator de potência capacitivo possui as mesmas cobranças de reativos do que nos demais períodos, onde o fator de potência indutivo é cobrado. Por isso, muitas vezes o desligamento dos capacitores durante o período entre 23h30m e 6h30m apresenta-se uma boa solução para o não pagamento dessa tarifa de energia reativa capacitiva.

- Aumento do consumo de energia ativa

O aumento no consumo de energia ativa apresenta-se como uma forma válida de correção do fator de potência, porém existem muitas desvantagens. Dentre elas, podemos citar que o aumento no consumo de energia ativa leva a aumento na fatura de energia elétrica, de forma diretamente proporcional, além de aumentar as perdas da instalação. Esta é uma forma que teoricamente aumenta o fator de potência da instalação, mas de difícil aplicação na prática.

- Máquinas síncronas

Os motores elétricos, além de moverem cargas, transformando energia elétrica em energia de movimento, podem ser utilizados como geradores de energia reativa. Quando subexcitados, motores elétricos necessitam de energia reativa, enquanto que quando são superexcitados, os mesmos passam a produzir energia reativa, independentemente da carga a que está submetido o motor, sendo que estes fatos ocorrem tanto para máquinas à vazio como com carga máxima. Portanto motores elétricos industriais, além de moverem a linha de produção, podem prover energia reativa, cumprindo esses dois papéis simultaneamente. O lado negativo dessa prática são os gastos com energia elétrica ativa, pois ao superexcitar o motor, está fornecendo-se uma potência extra que este não precisaria para funcionar. Este método é mais comumente utilizado em motores elétricos de alta potência, acima de 200CV, e que trabalhem mais que 8 horas por dia.

- Capacitores

O método mais econômico para fornecer potência reativa a uma instalação industrial é através do uso de capacitores, normalmente utilizados em forma de bancos trifásicos. As vantagens destes são de possuem alta durabilidade e não gastarem energia ativa para gerar energia reativa, além de possuir grande flexibilidade de aplicação.

Os capacitores são classificados como monofásicos ou trifásicos, com valores de potência reativa, tensão e frequência tabelados, para alta ou baixa tensão. No caso dos capacitores trifásicos, sua ligação interna é normalmente feita em delta, enquanto que os capacitores monofásicos são ligados em estrela.

2.4 LOCALIZAÇÃO DOS CAPACITORES E FORMAS DE INJEÇÃO DE REATIVOS

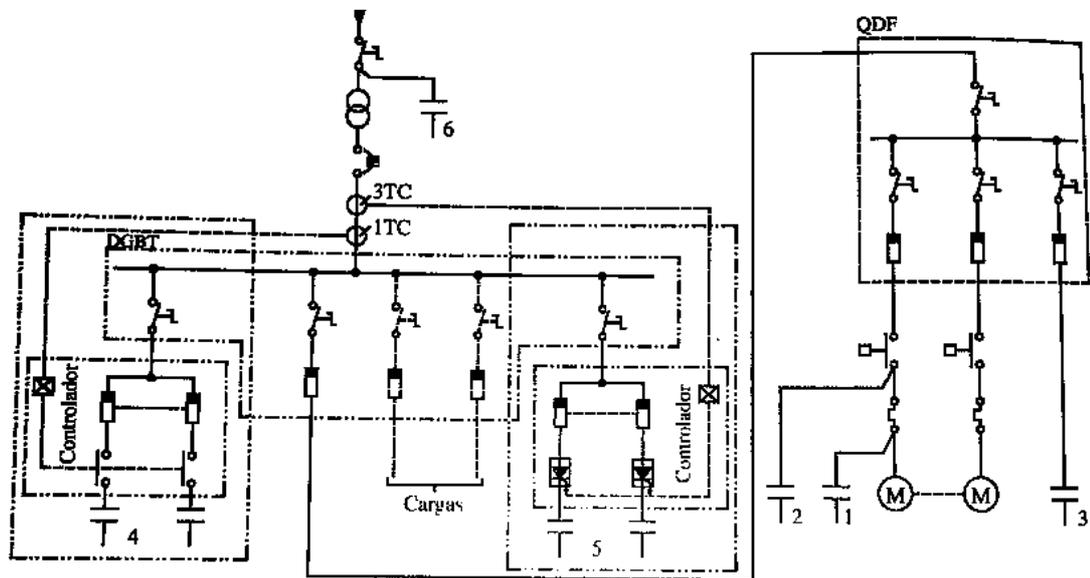
Como dito anteriormente, a ligação dos capacitores pode ser realizada em diversos pontos, desde o ramal de entrada da instalação até a ligação diretamente aos aparelhos da indústria. Os benefícios da adoção de capacitores somente ocorrem à montante da ligação. Dessa forma, para obter-se o maior benefício em gerar a própria energia reativa, em vez de

solicitar a energia da concessionária, deve-se ligar os bancos de capacitores diretamente às cargas. Porém, do ponto de vista econômico, esta pode não ser a melhor situação.

Tipicamente existem cinco localizações para a instalação dos bancos de capacitores, que são no lado da alta tensão dos transformadores, no lado da baixa tensão dos transformadores, em barramentos que alimentam grupos de motores, individualmente em motes, e em ramais de baixa tensão.

A Figura (5) exemplifica os prováveis pontos de ligação dos capacitores.

Figura 5 – Possibilidade de localização dos capacitores (bancos) em uma instalação elétrica.



Fonte: COTRIM.

Para o caso da ligação dos capacitores diretamente sobre um motor elétrico, chamado de compensação individual, existe uma regra básica de dimensionamento que deve ser seguida. Essa regra diz que a potência reativa do capacitor a ser ligado no motor, não deve exceder a potência que o motor absorve a vazio, como regra, esta não deve ser superior a 90% da potência de magnetização do motor, para que não ocorram sobretensões devido a auto-excitação do motor após a abertura da contatora que deve ligar tanto o motor como seu respectivo banco de capacitores. A corrente do banco de capacitores deve também ser menor que a corrente de partida do motor. O Quadro (1), dimensiona os capacitores para cada tipo de motor, obedecendo essas prerrogativas.

Quadro 1 – Potência máxima dos capacitores ligados a motores.

Potência do motor (CV)	Rotação (rpm)					
	3.600	1.800	1.200	900	720	600
	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar
5	2	2	2	3	4	4,5
7,5	2,5	2,5	3	4	5,5	6
10	3	3	3,5	5	6,5	7,5
15	4	4	5	6,5	8	9,5
20	5	5	6,5	7,5	9	12
25	6	6	7,5	9	11	14
30	7	7	9	10	12	16
40	9	9	11	12	15	20
50	12	11	13	15	19	24
60	14	14	15	18	22	27
75	17	16	18	21	26	32,5
100	22	21	25	27	32,5	40
125	27	26	30	32,5	40	47,5
150	32,5	30	35	37,5	47,5	52,5
200	40	37,5	42,5	47,5	60	65
250	50	45	52,5	57,5	70	77,5
300	57,5	52,5	60	65	80	87,5
400	70	65	75	85	95	105
500	77,5	72,5	82,5	97,5	107,5	115

Fonte: COTRIM, 427 p.

Pode-se também fazer a ligação dos capacitores ao barramento das cargas, sendo esta, uma das inúmeras situações intermediárias entre ligar os capacitores diretamente às cargas, ou ligar os capacitores no ramal de entrada da indústria. Dessa forma, já pode-se valer de algum fator de demanda. O lado negativo seria a necessidade de um barramento que suporte tanto a potência ativa quanto a reativa das máquinas. a necessidade de mecanismos de manobra, sem os quais o fator de potência pode tornar-se capacitivo e haver sobretensão nos horários de menor atividade da indústria, de alguma forma de regulação da potência reativa injetada por

estes, seja através de controle digital, computadorizado ou mesmo manual, pela manobra individual dos capacitores.

Pode-se também fazer a ligação dos capacitores no QGBT da instalação, sendo os benefícios da mesma, vistos do QGBT até a concessionária de energia, aliviando a fiação de entrega e o transformador da subestação da indústria. Dessa forma pode-se lidar com um fator de demanda que envolva mais máquinas e demais cargas, tornando muitas vezes ainda mais barato o projeto de correção de fator de potência.

Ao realizar-se a ligação dos capacitores na entrada de energia da instalação, mais especificamente no lado de baixa tensão do transformador da subestação, pode-se valer de cálculos de demanda de energia reativa. Dessa forma usa-se menos capacitores no projeto, pois compartilha-se destes com toda a indústria, enquanto que no caso de haver capacitores ligados diretamente às máquinas, provavelmente alguns capacitores ficariam ociosos, caso a fábrica não estivesse operando à plena carga. Através da Fórmula (25), pode-se determinar a elevação percentual da tensão que ocorre da adoção do banco de capacitores.

$$\Delta V\% = \frac{kvar_{cap}}{kVA_{trafo}} \cdot Z_{trafo}(\%) \quad (25)$$

Onde:

$\Delta V\%$ = Porcentagem da mudança de tensão;

$kvar_{cap}$ = Potência reativa do banco de capacitores;

kVA_{trafo} = Potência aparente do transformador;

$Z_{trafo}(\%)$ = Impedância percentual do transformador.

Esta elevação da tensão acaba por aumentar a capacidade do banco de capacitores de fornecer potência reativa conforme Fórmula (26).

$$kvar_{gerador} = kvar_{cap} \cdot V^2 \quad (26)$$

Onde:

$kvar_{gerador}$ = Potência reativa do gerador;

$kvar_{cap}$ = Potência reativa do banco de capacitores;

V = Tensão do banco de capacitores.

O Quadro (2) informa a tensão máxima suportada por um banco de capacitores e o tempo que este pode permanecer em cada nível de tensão, sem que haja danos ao banco.

Quadro 2 – Níveis de tensão admissíveis.

Frequência	Tensão (valor eficaz)	Duração Máxima
Nominal	1,00 V_n	Contínua
Nominal	1,10 V_n	8 horas por período de 24 h
Nominal	1,15 V_n	30 minutos por período de 24 h
Nominal	1,20 V_n	5 minutos
Nominal	1,30 V_n	1 minuto
Nominal mais Harmônicas	Valor tal que a corrente não exceda a $1,30I_n$	

Fonte: CRÉDER, 283 p.

O caso mais extremo de ligação dos capacitores seria na rede de alta tensão, no ponto de entrega da concessionária, o qual é o caso onde ocorre o maior custo de infraestrutura da indústria, pois toda a fiação desta, barramentos e transformadores tem de ser dimensionados para suportarem tanto a potência aparente quanto a potência ativa, e menores benefícios no sentido da qualidade da energia elétrica, com uma maior oscilação na tensão, mas, por outro lado, é o que teria menor custo para implementação dos capacitores, devido ao fator de demanda poder englobar toda a indústria. Porém, capacitores de alta tensão costumam ser mais caros do que os de baixa, onde os de 480V mostram-se atualmente os de melhor custo-benefício.

No caso da aplicação dos capacitores à rede de alta tensão, antes do transformador, tem-se o maior custo dos equipamentos de manobra, que devem assim suportar altas tensões em relação à utilização dos capacitores após o transformador. Devido às correntes de “inrush” deve-se utilizar reatores de amortecimento junto aos bancos de capacitores. O valor máximos da corrente que ocorrem quando o capacitor é ligado, considerando-se apenas um banco de capacitores, é calculada através das Fórmulas (27) e (28).

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{E}{X_C - X_L} \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \right] \quad (27)$$

$$f_{m\acute{a}x} = 60 \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (28)$$

Onde:

$I_{m\acute{a}x}$ = Corrente máxima que é submetido o banco de capacitores (A);

$f_{m\acute{a}x}$ = Valor máximo da frequência da corrente de ligamento (Hz);

E = Tensão fase-terra do sistema (kV);

X_C = Reatância capacitiva do banco por fase em (Ω);

X_L = Reatância indutiva do sistema, vista do ponto de instalaao do banco, por fase (Ω).

Onde os valores de X_C e X_L são calculados através das Fórmulas (29) e (30):

$$X_C = \frac{(kV)^2}{Mvar} \quad (29)$$

$$X_L = \frac{(kV)^2}{MVAcc} \quad (30)$$

Onde:

kV = Tensão fase-fase do sistema;

$Mvar$ = Potência trifásica do banco de capacitores;

$MVAcc$ = Potência de curto-circuito do sistema.

Conclui-se que, em geral, a corrente inicial é 15 vezes a corrente nominal do banco de capacitores.

Quando mais bancos são associados em paralelo, tem-se que há uma corrente adicional circulando através dos mesmos. Esta corrente que aparece, é a corrente dos bancos de capacitores mais energizados aos bancos de capacitores menos energizados. Dessa forma, os valores máximos de corrente de ligamento e frequência associada, podem ser calculados pelas Fórmulas (31) e (32):

$$I_{m\acute{a}x} = \sqrt{2}E \sqrt{\frac{C}{L_0}} \quad (31)$$

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C.L_0}} \quad (32)$$

Onde:

$I_{m\acute{a}x}$ = Corrente máxima que é submetido o banco de capacitores (A);

$f_{m\acute{a}x}$ = Valor máximo da frequência da corrente de ligamento (Hz);

E = Tensão fase-terra do sistema (kV);

C = Capacitância equivalente do circuito (μF);

L_0 = Indutância entre os bancos de capacitores (μH).

A indutância L_0 possui um valor baixo, pois depende da distância entre os bancos de capacitores. Os valores máximos da corrente de ligamento variam entre 25 e 250 vezes a corrente nominal dos bancos de capacitores. Uma forma de limitar o valor desta corrente é a adoao de reatores limitadores de corrente em série com os bancos de capacitores.

2.5 DISPOSITIVOS DE PROTEAO E MANOBRA DOS CAPACITORES

Deve-se dimensionar os dispositivos de manobra, como disjuntores, contadoras e chaves para valores de corrente 50% maiores que a corrente nominal do capacitor. Em se tratando de fusíveis, estes devem ser dimensionados com uma sobremedida de 65% em relaao ao valor nominal dos capacitores. Isto ocorre devido às incertezas na fabricaao dos capacitores, onde valores de capacitância de um banco de capacitores, podem ser da ordem de 15% maiores que a nominal. Multiplicando-se isso pela corrente máxima que os capacitores são projetados para trabalhar, sendo esta 30% maior que o valor nominal, tem-se que o resultado desta multiplicao gera praticamente 50% a mais de corrente.

2.6 TIPOS DE CONTROLE SOBRE BANCOS DE CAPACITORES

Em uma instalaao elétrica onde as cargas sejam muito variáveis, faz-se necessário o uso de compensadores variáveis, os quais são programados para manter o fator de potência dentro de um determinado patamar. Isso é realizado pelo equipamento, através da manobra automática de seus capacitores. Seu uso  indispensável nesses casos pois cargas muito variáveis levam a fatores de potência indesejados na maioria do tempo, acarretando em cobranças pelas concessionárias.

Basicamente existem três formas de alimentar uma instalaao com energia reativa e através do uso de capacitores. Tem-se os bancos (células) de capacitores fixos, não possuindo regulagem da potência reativa por eles fornecida, banco semi-automático e banco automático, sendo os dois últimos, compensadores variáveis.

Os bancos fixos podem ser ligados diretamente à carga, em barramentos que possuam cargas, em QGBTs, no secundário de transformadores de subestações ou ainda no primário de transformadores de subestações. Suas principais características são o baixo custo em relação às demais soluções e a impossibilidade de controle, o que pode acarretar em fatores de potência capacitivos e assim cobranças, pela concessionária, de energia reativa capacitiva, e sobretensões.

No caso dos bancos semi-automáticos, tem-se os capacitores ligados diretamente sobre a carga e manobrados juntos, o que implica em um certo controle, fornecendo à carga, energia reativa no exato momento que ela precisa e aumentando os custos, visto que deve haver capacitores para cada carga, não havendo capacitores compartilhados, de forma que possa ser utilizado algum fator de demanda, além do custo com os equipamentos de manobra que agora envolvem também os capacitores.

Os bancos automáticos são especialmente indicados caso as cargas sejam bastante variáveis, pois através de lógica programável, o banco automático manobra os capacitores ou grupos de capacitores a fim de fornecer o fator de potência programado através de interface com o usuário. São também usados para cargas que variam pouco, sendo necessário cautela, devido a transitórios na rede pela manobra dos capacitores, que podem gerar interferência em outros equipamentos e até mesmo a redução da vida útil dos capacitores, e fator de potência fora do estipulado, devido à demora do sistema na adequação da carga, sendo comum uma demora na casa das dezenas de segundos para término do processo de manobra dos capacitores, a fim de corrigir o fator de potência, podendo implicar também em altas tensões.

Para cargas altas e de rápida atuação, como soldas, prensas, elevadores, guindastes, injetoras, e outras, os bancos automáticos convencionais não são recomendados, pois estes levam muito tempo para adequar a energia reativa necessária à carga, que no caso dessas cargas, deve ocorrer no mesmo instante. Assim, recomenda-se a compensação estática de energia reativa, a qual é extremamente rápida, levando em torno de 1 ciclo da rede (16,7 ms) para a manobra dos capacitores. Isso ocorre devido ao uso de elementos estáticos para a manobra dos capacitores, compostos por conjuntos de reator e capacitor. Utilizando-se de um equipamento deste tipo, não há transiente de manobra, pois esta ocorre durante o cruzamento pelo zero (zero-crossing). Os benefícios são vastos, como ausência de flutuações de tensão e a ausência de demanda de energia reativa pela carga, sendo toda a potência aparente composta por potência ativa.

A utilização de geradores próprios, caso ocorra uma falta de energia elétrica é muito comum em instalações elétricas como hospitais, shopping centers, bancos e outros.

Infelizmente estes geradores possuem limitações quanto à alimentação de cargas capacitivas, portanto, no projeto de correção de fator de potência para instalações com geradores próprios, muito cuidado é necessário. A carga capacitiva causa uma alteração na excitação da máquina, podendo causar auto-excitação da mesma ou até curto-circuito. Devido a isso, se o gerador alimentar uma carga capacitiva, o mesmo irá acionar seu dispositivo de proteção e se auto-desligar. Por isso deve-se atentar ao transiente da passagem da rede elétrica para a alimentação pelo gerador. É possível que no instante que ocorre a falta de energia elétrica, os capacitores responsáveis pela correção do fator de potência, permaneçam ligados em paralelo com a carga, assim, quando houver o acionamento do gerador, este alimentará uma carga de característica capacitiva e causando o desligamento dos capacitores. Uma solução seria a utilização de sistemas de compensação estática, que são extremamente rápidos, ou então pode-se efetuar o desligamento do banco de capacitores quando ocorre a falta de energia elétrica, antes do acionamento do gerador.

2.7 COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA EM CARGAS NÃO LINEARES (PRESENÇA DE HARMÔNICAS)

Em uma tensão ou corrente alternada, as harmônicas são componentes senoidais de frequência múltipla da frequência fundamental da corrente ou tensão elétrica. Sua ordem é um valor inteiro que multiplica essa frequência fundamental. A distorção harmônica total (THD) é a diferença entre o valor médio quadrático das contribuições de todas as harmônicas de um sinal de tensão ou corrente e o valor médio quadrático da fundamental do mesmo sinal, dado pela Fórmula (33):

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n} / Y_1 \quad (33)$$

Onde:

Y_1 = Componente fundamental (de primeira ordem);

Y_n = Componente de ordem n .

A série de Fourier explica que matematicamente uma forma de onda periódica, de frequência fundamental, pode ser decomposta em um somatório de infinitos termos senoidais de frequências múltiplas da frequência da fundamental, mais um termo equivalente a um valor

médio apresentado pela forma de onda original. Chama-se de componente fundamental, o termo senoidal de frequência fundamental, e de componentes harmônicas, os termos de frequências múltiplas da fundamental. Dessa forma, uma onda qualquer no domínio do tempo $Y(t)$ com frequência fundamental, pode ser decomposta da seguinte forma, representada pela Fórmula (34):

$$Y(t) = Y_0 + Y_1 \text{sen}(\omega t + \varnothing 1) + Y_2 \text{sen}(\omega t + \varnothing 2) + \dots + Y_n \text{sen}(\omega t + \varnothing n) \quad (34)$$

Onde:

Y_0 = Componente contínua (valor médio);

Y_n = Componente de enésima ordem;

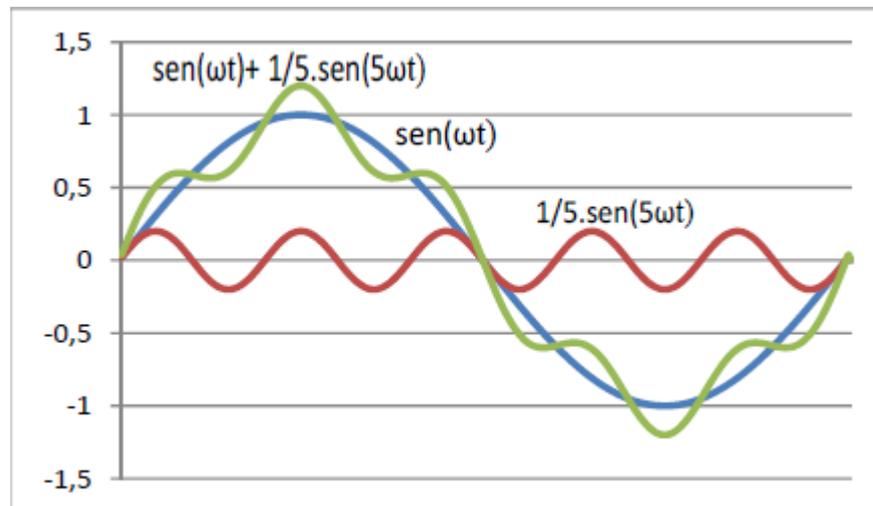
ωt = Deslocamento angular dado por $2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$ (rad);

$\varnothing 1$ = Defasagem angular da componente fundamental (graus elétricos);

$\varnothing n$ = Defasagem angular das componentes de ordem n (rad).

A Figura (6) mostra a decomposição gráfica da forma de onda $Y(t)$ em duas de suas componentes (1ª e 5ª):

Figura 6 – Decomposição de uma forma de onda.



Fonte: PUFAL, 7 p.

Em sistemas de corrente alternada, tem-se que as formas de onda da tensão e da corrente são na frequência fundamental de 60Hz, sendo assim, com período de 16,67ms. Assim, quando houver harmônicas de corrente no sistema de distribuição, as frequências

serão múltiplas de 60Hz , onde para a n -ésima harmônica, sua frequência será de $n \cdot \omega_0 = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60$.

Supondo-se que uma indústria é composta de uma carga linear, outra não linear e considera-se a impedância da linha. Quando a corrente elétrica passa pela carga não linear, devido ao fato da impedância não ser linear, esta causará uma queda de tensão não linear na impedância da linha, que por sua vez, afetará a tensão a que é submetida a carga linear, tornando a corrente que passa pela carga linear, também não linear, então tem-se que a não linearidade de uma carga, acaba por se refletir sobre todos os equipamentos de uma indústria, em maior ou menor escala.

Como dito na introdução, as correntes harmônicas, quando de elevada magnitude, podem tornar a compensação da energia reativa insuficiente para correção do fator de potência, apesar de que a injeção de potência reativa acaba por reduzir a potência de distorção. Mas ainda há um problema muito maior relacionado com as correntes harmônicas, que será explicado a seguir.

De modo geral forma-se um circuito LC envolvendo as cargas com características indutivas, e as capacitâncias do sistema, provenientes de barramentos e fios em paralelo, entre outros. Estes circuitos possuem uma frequência de ressonância, que fica na casa dos kHz, devido à baixa capacitância do sistema. Quando são utilizados capacitores para correção do fator de potência, aumenta-se substancialmente a capacitância do mesmo, tornando a frequência de ressonância muito mais baixa, indo para a casa das dezenas ou centenas de Hz.

Cargas industriais costumam naturalmente produzir harmônicas, sendo que cargas monofásicas como computadores e iluminação costumam produzir harmônicas por uma ampla faixa de frequências, desde a 3^a. Cargas industriais acionadas por conversores de 6 pulsos, costumam gerar da 5^a à 13^a harmônicas, e cargas industriais acionadas por conversores de 12 pulsos costumam gerar harmônicas a partir da 11^a.

O problema ocorre quando a frequência de ressonância do circuito composto pela carga de característica indutiva e os capacitores para correção de fator de potência entram em ressonância com alguma harmônica de corrente da carga. Isso gera correntes que percorrem os capacitores, elevando a tensão e podendo causar danos a todos os equipamentos da indústria, como cargas, fontes e capacitores, sendo que o procedimento mais indicado caso isso aconteça é o desligamento dos capacitores tanto por manobra ou pela queima dos mesmos, preservando os demais sistemas e componentes da indústria. A frequência de ressonância do circuito composto pela carga e capacitores é determinada pela Fórmula (35):

$$fr = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC} \quad (35)$$

Onde:

fr = Frequência de ressonância (Hz);

L = Indutância compreendida pela carga (henry);

C = Somatório das capacitâncias do sistema (farad).

Já a ordem harmônica de ressonância pode ser determinada a partir da Fórmula (36):

$$hr = \sqrt{\frac{P_{cc}}{kvar}} \quad (36)$$

Onde:

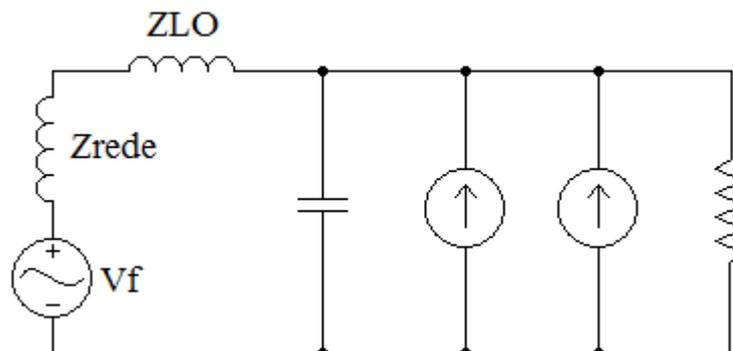
hr = Ordem harmônica de ressonância;

P_{cc} = É a potência de curto-circuito trifásico na barra em que os capacitores são instalados;

$kvar$ = É a potência dos capacitores em operação.

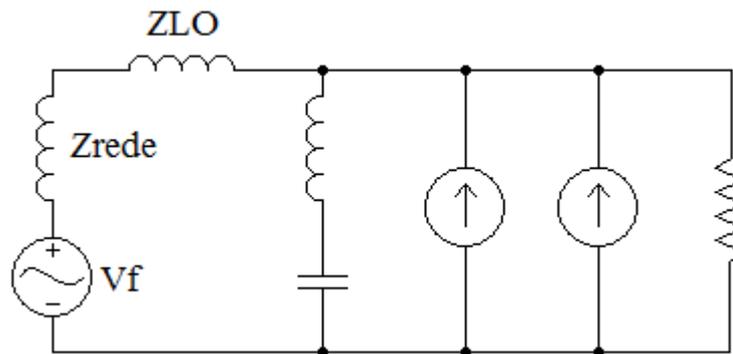
Devido a estes potenciais problemas relacionados com a ressonância, faz-se necessário o uso de reatores anti-ressonantes em qualquer projeto de compensação de energia reativa. Os reatores devem ser ligados em série com os capacitores, aumentando, assim a impedância do ramo de ligação do capacitor ao restante do circuito e bloqueando as correntes harmônicas.

Figura 7 – Modelo elétrico de capacitor instalado em rede com harmônicas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 8 – Modelo elétrico de conjunto capacitor/reator inserido em rede com harmônicas.



Fonte: Próprio Autor.

A especificação dos reatores anti-ressonantes deve ser realizada de forma que o conjunto LC não seja perturbado por correntes harmônicas provenientes do sistema e não cause ressonância. Existem tabelas pré-determinadas de reatores a serem ligados em série com os capacitores para evitar a ressonância, e isto é devido ao conhecimento das harmônicas típicas de cargas industriais, como pode-se ver a partir do Quadro (3):

Quadro 3 - Reatores típicos anti-ressonantes de mercado.

Impedância do reator em relação à do capacitor (p%)	Frequência de sintonia	Harmônica
6	227 Hz	H 3,78
7	245 Hz	H 4,08
14	160 Hz	H 2,67
5,67	252 Hz	H 4,20

Fonte: COTRIM, 432 p.

Para dimensionamento do reator, a convenção é relacionar a impedância do reator à do capacitor (na frequência fundamental) em que ele será conectado em série. A relação das duas impedâncias, em valores percentuais, definirá o reator (Cotrim, 2009).

$$p\% = \frac{Z_L}{Z_C} \cdot 100 \quad (37)$$

$$p\% = \frac{\omega L}{\left(\frac{1}{\omega C}\right)} = \omega^2 \cdot LC \quad (38)$$

Onde:

$p\%$ = Relação percentual entre as impedâncias indutiva e capacitiva;

Z_L = Impedância indutiva;

Z_C = Impedância capacitiva;

ω = Frequência do filtro;

L = Indutância compreendida pela carga (henry);

C = Somatório das capacitâncias do sistema (farad).

Enquanto que a sintonia do filtro é definida pela seguinte fórmula:

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{p\%}{LC}\right)} \quad (39)$$

Onde:

ω = Frequência do filtro;

$p\%$ = Relação percentual entre as impedâncias indutiva e capacitiva;

L = Indutância compreendida pela carga (henry);

C = Somatório das capacitâncias do sistema (farad).

A associação de um capacitor e um reator, provoca uma elevação na tensão do capacitor, de forma que o capacitor deve ser sobredimensionado em tensão. A Fórmula (40) mostra de quanto deve ser esse sobredimensionamento:

$$U_{cap} \geq \frac{U_{rede}}{1-p\%} \quad (40)$$

Onde:

U_{cap} = Tensão nominal do capacitor (V);

U_{rede} = Tensão nominal da rede (V);

$p\%$ = Relação percentual entre as impedâncias indutiva e capacitiva.

Além do uso de um reatância em série com os capacitores, a fim de aumentar a impedância do conjunto, de forma a filtrar as harmônicas, pode-se realizar a mesma tarefa utilizando filtros passivos, que são sintonizados em determinadas frequências. Utilizando estes, a impedância do ramo LC não é alterada, e ocorre a circulação de correntes harmônicas

através dos capacitores, embora não 100% delas. A utilização de filtros passivos, bloqueia as harmônicas em determinadas frequências pré-estabelecidas. Dessa forma, se por exemplo deseja-se realizar o bloqueio da quinta harmônica (5H), cuja frequência é de 300kHz, ajusta-se o filtro passivo para 282kHz, pouco abaixo da frequência de sintonia.

O filtro passivo deve ser especificado tanto em corrente quanto em tensão. Quanto à corrente, deve-se utilizar no projeto um filtro que contemple tanto a componente fundamental da corrente quanto as correntes harmônicas que por ele irão passar. Existem duas formas de calcular-se a corrente total em um filtro passivo. Uma delas calcula a corrente total pela raiz do somatório quadrático das componentes fundamental e cada uma das harmônicas da corrente, conforme fórmula (41):

$$I_T = \sqrt{(I_1 + I_3 + I_5 + \dots)^2} \quad (41)$$

Onde:

I_T = Corrente total do filtro passivo (A);

I_1 = Componente fundamental da corrente (A);

I_3 = Corrente da terceira harmônica (A);

I_5 = Corrente da quinta harmônica (A).

Outra forma de determinar a corrente total que passará pelo filtro é através de sua soma algébrica, apresentada na Fórmula (42):

$$I_T = I_1 + I_3 + I_5 + \dots \quad (42)$$

Onde:

I_T = Corrente total do filtro passivo (A);

I_1 = Componente fundamental da corrente (A);

I_3 = Corrente da terceira harmônica (A);

I_5 = Corrente da quinta harmônica (A).

A explicação para a soma algébrica das correntes seria que além da corrente fundamental e das correntes harmônicas, haveria outras correntes presentes e não consideradas pelo filtro.

A utilização de um ou outro método de determinação da corrente fica a critério do engenheiro.

3 PROJETO DE COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA

A primeira parte deste trabalho versou sobre a explanação teórica do significado da energia reativa, quando ela é utilizada, tarifas cobradas pelas concessionárias de energia quando do seu uso e formas de correção da mesma. Como elemento fundamental deste trabalho, é agora apresentado um projeto de correção do fator de potência realizado para uma indústria situada em São Leopoldo – RS responsável pela produção de motosserras, roçadeiras, sopradores e cortadores de grama. Para confecção destes produtos, a empresa possui uma linha de montagem robotizada, sendo assim sua carga composta principalmente por máquinas elétricas.

Como apresentado anteriormente, máquinas elétricas não possuem usualmente fator de potência unitário, devido aos seus enrolamentos, e na grande maioria dos casos, seu fator de potência fica abaixo dos 0,92 estipulado pelas concessionárias de energia como um fator livre de multas ou cobranças pelo uso de energia reativa. A comprovação do fator de potência estar fora do desejado, ocorreu através de leituras realizadas, onde foi medido o gasto de energia ativa, a tensão e a corrente que estava sendo consumida pela indústria no período de um ano, com leituras realizadas a cada 5 minutos. Essas medições foram realizadas por medidor de energia particular instalado na mesma. O que observou-se através da leitura dos dados é que na maioria dos dias, o fator de potência médio fica abaixo dos 0,92 e mesmo nos dias onde o fator de potência médio fica acima deste patamar, sempre há momentos onde o fator de potência fica abaixo deste valor. O Quadro (4) exemplifica as leituras realizadas através do medidor de energia.

Quadro 4 – Exemplo do quadro criado através da leitura do medidor de energia.

Data e Hora (h:min)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência ativa (kW)
20/05/2012 13:50	384,7	112,2	50,4
08/07/2012 17:25	384	375	243,8
25/08/2012 04:30	383,6	298,6	190,6
12/10/2012 19:45	381,8	158,5	85,9

Fonte: Próprio Autor.

Como o dispositivo de leitura instalado na indústria possui apenas as leituras de potência ativa, tensão e corrente, fez-se necessário o cálculo da potência reativa e fator de

potência para cada um dos horários em que houve a medição e que foram levados em conta no estudo da correção do fator de potência. A seguir, serão exemplificados os cálculos.

Para a primeira leitura mostrada no Quadro 4, fez-se uso primeiramente da Fórmula (43), para obtenção da potência aparente:

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_f \cdot I_f \quad (43)$$

Como a tensão de linha lida para o primeiro caso é de 384V, tem-se que a tensão de fase vale

$$V_f = \frac{V_l}{\sqrt{3}} = \frac{384,7}{\sqrt{3}} = 222,10V$$

Assim, de acordo com a Fórmula (43):

$$S_{3\phi} = 3 \times 222,10V \times 112,2A = 74,75kVA$$

Sendo a potência ativa medida, pode-se assim determinar o fator de potência através da Fórmula (44).

$$Fp = \cos(\theta) = \frac{P}{S_{3\phi}} = \frac{50,4}{74,75} = 0,67 \quad (44)$$

As características observadas da potência demandada é que a demanda por energia reativa varia de 10kvar à 80kvar, possuindo assim grande variação, mas na maioria do tempo, situando-se em um valor médio de 50kvar. A demanda por energia ativa é mais variável que a reativa porém situando-se em um valor médio de 200kW. Isso pode ser explicado pelo fato de a carga ser substancialmente composta por máquinas elétricas, que quando ligadas praticamente não variam sua demanda por energia reativa, enquanto que a demanda por energia ativa é proporcional à carga a que o motor é submetido, e esta varia bastante ao longo do dia, assim como a corrente elétrica, enquanto que a tensão de linha permanece flutuando entre 380V e 410V, não apresentando assim grande variação, como já era esperado.

Através da observação das características da carga da indústria, surgiu a oportunidade de diminuir os gastos da mesma com energia elétrica. Essa diminuição será obtida através de um projeto bem elaborado de correção de fator de potência, onde por praticamente nenhum momento o fator de potência ficaria abaixo dos 0,92, não acarretando valores pelo consumo de energia reativa.

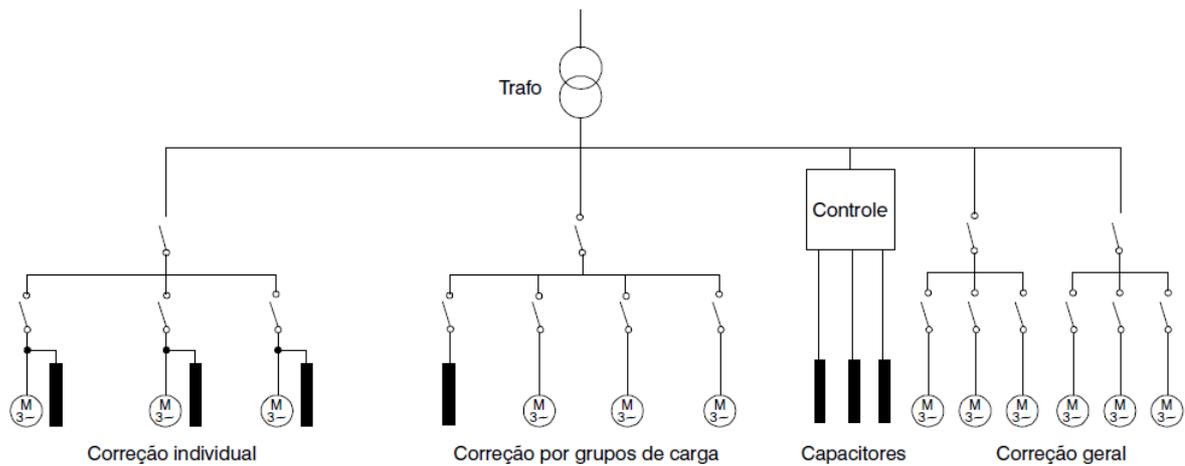
Avaliou-se muitos métodos de correção do fator de potência, como, por exemplo, a ligação dos capacitores diretamente sobre as máquinas que necessitam energia reativa. Sua implementação seria a instalação da carga capacitiva diretamente sobre os equipamentos que as necessite e instalação de equipamentos de manobra individuais que pudessem acionar os capacitores juntamente com as máquinas.

Apesar de ser uma alternativa simples de ser elaborada, ela acaba se mostrando ruim do ponto de vista econômico, visto que os custos com equipamentos de manobra e capacitores para cada máquina seriam enormes. Existe mais um fato que pesa contra essa opção de projeto, e é o fato de as máquinas não estarem sempre ligadas, o que pode ser uma vantagem quando pensa-se no projeto de correção de um barramento incluindo diversas máquinas, chamado de correção por grupos de carga, devido ao fator de utilização. Essa opção seria uma intermediária entre a adoção de um banco automático de capacitores no QGBT da indústria ou a primeira opção relatada, onde seriam necessários bancos de capacitores individuais para cada máquina.

Na correção por grupos de cargas, os custos com equipamentos de manobra seriam drasticamente reduzidos, pois pode-se ligar, por exemplo, o banco de capacitores em três ou mais estágios, suprindo a energia reativa demandada pela indústria na maioria do tempo. Pode-se também adotar um controle eletrônico e mais estágios, mas precisaria-se de diversos bancos de capacitores e diversos controladores eletrônicos, pois cada um alimentaria um conjunto de máquinas.

A melhor opção é, sem dúvida, a adoção de um banco automático de capacitores devido à característica variável da carga. Sua instalação será na baixa tensão, devido à impossibilidade de utilização do mesmo em média tensão. Dessa forma tem-se um controle preciso da energia reativa injetada na indústria, o que é o objetivo deste projeto, visto que o custo do equipamento de correção acaba por ser pago pela diferença na conta de energia elétrica. Assim o projeto prevê a instalação do painel de correção de fator de potência após o transformador, na baixa tensão, sendo ligado ao QGBT da indústria. Ligando-se o banco automático de capacitores ao QGBT da indústria está se aproveitando do maior fator de utilização de energia reativa possível, além de que sua posição pode ser explicada pelo fato de que sua instalação será feita onde foram realizadas as medições de potência ativa e reativa requeridas pela indústria. A Figura (9) ilustra o local de instalação do banco de capacitores.

Figura 9 – Locais possíveis de instalação do banco automático de capacitores.



Fonte: WEG, Manual para Correção do Fator de Potência, 11 p.

Para determinar-se os estágios de potência reativa fornecidos pelo painel de correção de fator de potência, leva-se em conta a máxima potência reativa que ocorre em períodos significativos de tempo, a tensão do secundário do transformador da subestação da indústria, que no caso é de 380V e um bom compromisso entre a correção e a durabilidade dos equipamentos de correção, pois como já dito, bancos automáticos chaveiam os capacitores, gerando correntes de surto muito altas as quais podem atingir patamares de 100 vezes a corrente nominal dos capacitores, forçando os mesmos e os equipamentos de manobra. Dessa forma, foi estipulado no projeto cinco estágios de 15kvar, e um sexto estágio de 7,5kvar para ajuste fino, apresentando assim um bom compromisso entre os aparelhos de correção e a correção em si, garantindo que o fator de potência da indústria não fique abaixo dos 0,92.

No Anexo 1 (Inducom) observa-se que os capacitores de 15kvar e 7,5kvar são capacitores de capacitância nominal de, respectivamente 275,55 μ F e 137,77 μ F para a tensão de linha de 380V. Isso pode ser comprovado através da Fórmula (45).

$$C = \frac{\text{Potência Reativa Capacitiva (kvar)}}{(V_{FF}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^{-9})} (\mu F) \quad (45)$$

Assim sendo, para o capacitor de 15kvar:

$$C = \frac{15 \text{ (kvar)}}{(380^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10^{-9})} (\mu F) = 275,69 \mu F$$

E para o capacitor de 7,5kvar:

$$C = \frac{7,5 \text{ (kvar)}}{(380^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10^{-9})} (\mu F) = 137,84 \mu F$$

Devido à flutuações na tensão de linha, sendo que esta alcança valores de até 410V e devido a adoção de reatores anti-ressonantes, que serão explicados a diante e que acabam por elevar a tensão de operação dos capacitores, recomenda-se assim a troca dos capacitores de 380V 15kvar por capacitores de 20kvar 440V, e troca do banco de capacitores de 380V 7,5kvar pelo banco de capacitores 440V 10kvar, que apresentam respectivamente os mesmos 15kvar e 7,5kvar quando operando em 380V, pois estes possuem a mesma capacitância que seus similares de tensão menor, mas podem operar em tensões maiores. Isto é comprovado através da Fórmula (46).

$$Q_{inj} = Q_{nom} \cdot \left(\frac{U_{op}}{U_{nom}} \right)^2 \quad (46)$$

Onde

Q_{inj} = Potência reativa injetada;

Q_{nom} = Potência reativa nominal;

U_{op} = Tensão de operação;

U_{nom} = Tensão nominal.

Assim, respectivamente:

$$Q_{inj} = 20 \cdot \left(\frac{380}{440} \right)^2 = 14,92 \text{ kvar}$$

$$Q_{inj} = 10 \cdot \left(\frac{380}{440} \right)^2 = 7,46 \text{ kvar}$$

Para fins de projeto, serão considerados nos cálculos os bancos de capacitores de 380V 15kvar e 380V 7,5kvar respectivamente.

A seguir é exemplificado como ocorre a correção do fator de potência. Suponha-se que seja apresentado o primeiro caso do Quadro 4, na página 43, onde a potência ativa vale 50,4kW, a tensão vale 384,7V e a corrente vale 112,2A. Ao determinar o fator de potência de 0,67, através de algoritmos, o painel faria o cálculo da potência reativa.

$$\text{Cos}(\theta) = 0,67$$

$$\theta = \arccos(0,67)$$

$$\theta = 47,93^\circ$$

$$Q = S_{3\phi} \cdot \sin(\theta) = S_{3\phi} \cdot \sin(47,93^\circ) = 55,49 \text{ kvar}$$

Dessa forma, obtendo a potência reativa, o painel tende a compensar essa energia, fornecendo energia reativa através de seus capacitores. Como no projeto foram escolhidos estágios de 15 kvar , mais um estágio de $7,5 \text{ kvar}$ para ajuste fino, o painel seria programado para fornecer, neste caso $52,5 \text{ kvar}$, equivalente a três módulos de capacitores trifásicos de 15 kvar e um módulo de $7,5 \text{ kvar}$, ligados em paralelo.

Agora é calculado o novo fator de potência após a correção da mesma pelo painel e posterior comparação.

Como o painel está fornecendo $52,5 \text{ kvar}$ o quanto de potência reativa utilizado da rede seria:

$$55,49 \text{ kvar} - 52,5 \text{ kvar} = 2,99 \text{ kvar}$$

Dessa forma, a nova potência aparente seria:

$$S_{3\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{50,4^2 + 2,99^2} = 50,49 \text{ kVA}$$

Assim, calcula-se o novo fator de potência através da Expressão (44).

$$Fp = \cos(\theta) = \frac{P}{S_{3\phi}} = \frac{50,4}{50,49} = 0,998$$

Apresentando um resultado muito satisfatório.

Como descrito anteriormente, um efeito benéfico à rede, condutores e demais componentes é a redução na corrente elétrica proporcionada pela correção do fator de potência. A seguir, é apresentado o cálculo na nova corrente:

$$I = \frac{S_{3\phi}}{3 \cdot V_f} = \frac{50,49 \text{ VA}}{3 \times 222,1 \text{ V}} = \frac{50,49 \text{ VA}}{666,3 \text{ V}} = 75,77 \text{ A}$$

Sendo a corrente mais de 30% menor do que antes de ser corrigido o fator de potência, alivia-se o transformador da subestação da indústria. Dessa forma, abre-se espaço para um possível aumento futuro na carga da mesma sem acarretar em custos de substituição do transformador. Pela análise dos dados obtidos na leitura do consumo dessa indústria, leva-se a crer ser possível um aumento da ordem de 50kVA na potência da indústria após feita a correção.

Após determinada a capacitância dos capacitores, para fins de projeto de fusíveis e condutores do painel, faz-se necessário o cálculo da corrente nominal dos capacitores, que é obtida a partir da Fórmula (47):

$$I_{nc} = \frac{\text{Potência Reativa}(kvar).1000}{3.V_{FF}} (A) \quad (47)$$

Onde:

I_{nc} = Corrente nominal do capacitor (A);

V_{FF} = Tensão entre fases (V).

Que para o caso do capacitor de 15kvar, tem-se:

$$I_{nc} = \frac{15(kvar).1000}{3.220} (A) = 22,73A$$

E para o caso do capacitor de 7,5kvar, tem-se que:

$$I_{nc} = \frac{7,5(kvar).1000}{3.220} (A) = 11,37A$$

Tendo-se a corrente nominal dos capacitores, como já explicado anteriormente, calcula-se agora a corrente dos fusíveis utilizados para a proteção dos capacitores a partir da Fórmula (48):

$$I_{nf} = I_{nc} \times 1,65 \quad (48)$$

Dessa forma, tem-se que os fusíveis a serem escolhidos para os capacitores, devem suportar uma corrente de, para o caso do capacitor de 15kvar:

$$I_{nf} = 22,73A \times 1,65A = 37,50A$$

Enquanto que para o capacitor de $7,5kvar$, seu fusível deve ser dimensionado para a corrente de:

$$I_{nf} = 11,37A \times 1,65A = 18,75A$$

Conforme Anexo 4 (Siemens) o valor tabelado para os fusíveis NH para os bancos de capacitores de $15kvar$ são de 40A com indicação de atuação no topo de 3NA3 817 e indicação de atuação frontal de 3NA7 817, e para o banco de capacitores de $7,5kvar$, tem-se que a corrente do fusível é de 20A com indicação de atuação no topo de 3NA3 807 e indicação de atuação frontal de 3NA7 807.

No dimensionamento dos condutores, de acordo com a NBR 5060, deve-se considerar condutores sobredimensionados em 1,43 vezes.

Para o capacitor de $15kvar$, onde tem-se que a corrente nominal do mesmo vale 22,73A, multiplicando-se por 1,45, tem-se que a corrente de projeto dos condutores desses bancos de capacitores é de 33A, onde de acordo com o anexo 5 (ABNT NBR 5410), considerando fator de agrupamento unitário e fator de temperatura unitário, tem-se que a seção nominal dos condutores, para uma margem de segurança de 20% é de $6mm^2$.

Para o banco de capacitores de $7,5kvar$ tem-se uma corrente nominal de 11,37A, que multiplicado pelo fator 1,43 equivale a uma corrente de projeto de 16,48A, onde de acordo com o anexo 5 (ABNT NBR 5410), considerando fator de agrupamento unitário e fator de temperatura unitário, tem-se, para uma margem de segurança de 20%, que a seção nominal dos condutores é de $2,5mm^2$. Isso é comprovado, pelo anexo 2 (WEG), onde as seções recomendadas para os bancos de capacitores de $15kvar$ são de $6mm^2$, enquanto que para o banco de capacitores de $7,5kvar$, os condutores possuem seções recomendadas de $2,5mm^2$.

Para a proteção adicional dos condutores que vão do barramento do painel de correção de fator de potência até os fusíveis dos capacitores e caso o elo fusível venha a falhar, serão usados mini disjuntores tripolares de 25A para os condutores de $2,5mm^2$ e 50A para os condutores de $6mm^2$, dimensionados conforme anexo 5 (ABNT), considerando-se método de referência G.

Para dimensionamento dos contadores, que farão o acionamento e desligamento dos bancos de capacitores, será utilizado o anexo 3 (WEG), onde os contadores WEG da linha CWMC para manobra de capacitores, possuem contatos auxiliares NA especiais adiantados em paralelo a seus contatos principais. Estes contatos auxiliares possuem em série, resistores de pré-carga, que reduzem as elevadas correntes de “inrush” que ocorrem na hora da

energização dos mesmos. Assim, tanto para os bancos de capacitores de $15kvar$ quanto para os bancos de capacitores de $7,5kvar$ optou-se pelo modelo de contator CWM 25C.

3.1 CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE FATOR DE POTÊNCIA

Parte integrante deste projeto, o aparelho o qual toma as decisões quanto a potência reativa fornecida à indústria, através do chaveamento de capacitores, o controlador automático de fator de potência escolhido para este projeto é o modelo PFW01-T06 da marca WEG. Foi escolhido especificamente este modelo devido ao fato do mesmo poder controlar até 6 capacitores, que é exatamente o caso deste projeto e por ser trifásico. Em sua linha de controladores automáticos de fator de potência, a WEG possui modelos monofásicos e trifásicos, podendo estes controlar 6 ou 12 capacitores. A Figura (10) ilustra o controlador.

Figura 10 – Controlador automático de fator de potência PFW01-T06.



Fonte: WEG, Controlador do fator de potência.

As especificações do controlador podem ser observadas na Figura (11).

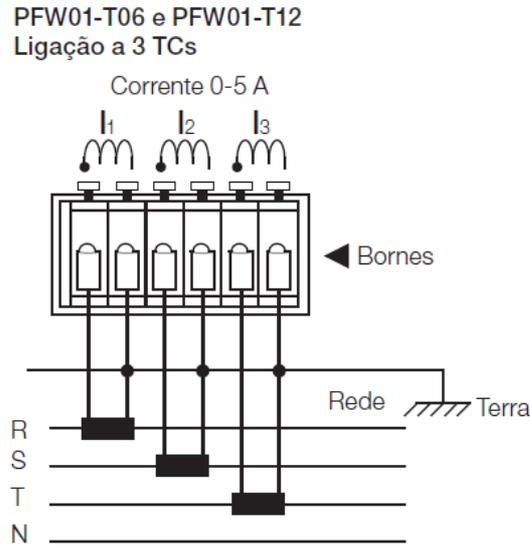
Figura 11 – Especificações do controlador automático de fator de potência PFW01-T06.

Descrição	PFW01 - Monofásico	PFW01 - Trifásico
Modo de operação	Automático ou manual	Automático ou manual
Dim. frontais - altura x largura	98 mm x 98 mm	144 mm x 144 mm
Profundidade	100 mm	86 mm
Recorte no painel - altura x largura	91 mm x 91 mm	136 mm x 136 mm
Display de cristal líquido	2 linhas x 16 colunas	2 linhas x 20 colunas
Temperatura de operação	0 a 55 °C	0 a 55 °C
Temp. armazenamento	-25 °C a 75 °C	-25 °C a 75 °C
Peso	0,5 kg	0,94 kg
Grau de proteção	IP40	IP40
Entrada de tensão de alimentação	85 a 265 V CA	90 a 270 V CA
Entrada de tensão da medição	50 a 500 V CA	50 a 500 V CA
Entrada de corrente	0,05 a 5 A através de TC	0,05 a 5 A através de TC
Frequência	50 e 60 Hz - produtos distintos	50 e 60 Hz - produtos distintos
Número de estágios - contato seco	06 e 12	06 e 12
Capac. de acionamento p/ estágio	1 A - 105 VA, 250 V	1 A - 105 VA, 250 V
Saída de alarme - contato seco	1 A - 105 VA, 250 V	1 A - 105 VA, 250 V
Faixa de leitura fator de potência	0,5i a 0,5c	0,5i a 0,5c
Consumo	10 VA	10 VA
Comunicação serial	-----	RS485- Modbus-RTU
Velocidade de comunicação	-----	9.600, 19.200 e 38.400 b/s
Medições	V,A, W,VA,var,THDv,FP	V,A,W,VA,var,THDv,FP
Memória	Não volátil - retentiva	Não volátil - retentiva
Tipo de borne	Conexão plugável	Conexão plugável

Fonte: Controlador do fator de potência WEG.

Através da leitura das especificações do controlador, chega-se a conclusão que é necessário a utilização de um TC, pois o aparelho faz medidas de 0,05A até 5A. Através da leitura dos dados obtidos através do medidor particular instalado na indústria, constatou-se que a leitura da corrente máxima da mesma atinge até 530A. Então para ter-se uma maior exatidão, escolhendo inclusive um transformador de corrente com classe de exatidão de 0,6%, optou-se no projeto, pelo uso do modelo 4NF03 27-2JE20, que transforma até 600A em 5A, como observa-se no Anexo 6 (Siemens). Na Figura (12), observa-se o esquemático de ligação dos transformadores de corrente.

Figura 12 – Diagrama esquemático de ligação do transformador de corrente do controlador automático de fator de potência PFW01-T06.

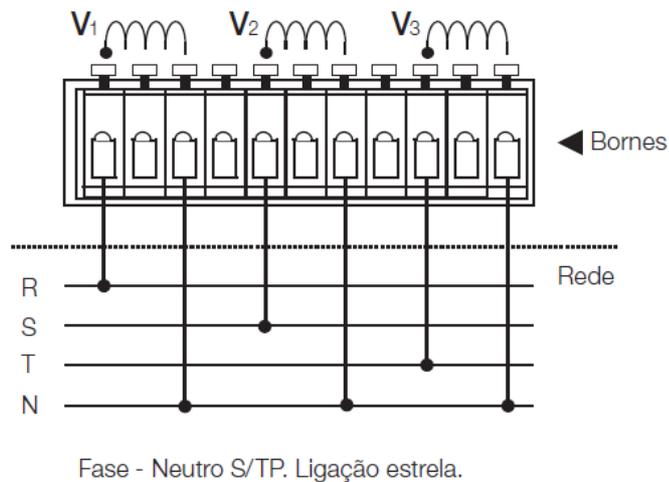


Fonte: WEG, Controlador do fator de potência.

Como observa-se nas especificações, o controlador automático de fator de potência em questão, dispensa o uso de transformadores de tensão, visto que sua leitura vai de 50 à 500V CA. Seu esquemático de ligação pode ser observado na Figura (13).

Figura 13 – Diagrama esquemático de ligação da medição de tensão do controlador automático de fator de potência PFW01-T06.

Sensor de Tensão Fase-Neutro sem TP - Ligação Estrela
Tensão 50-500 V CA



Fonte: WEG, Controlador do fator de potência.

O cálculo do condutor de ligação do painel de correção de fator de potência ao QGBT-01 é apresentado considerando a potência aparente do painel como a soma das potências reativas capacitivas de cada capacitor mais a potência utilizada pela central de controle PWF01-T06, ventilador de exaustão e lâmpada interna do painel, considerando essas cargas de potência de 500W, aplicando-se larga margem. Os cálculos são observados abaixo:

$$Q = 5 \times 15 \text{ kvar} + 1 \times 7,5 \text{ kvar} = 82,5 \text{ kvar}$$

$$P = 500 \text{ W}$$

$$S_{3\phi} = P + jQ = 82,5 \text{ kVA}$$

$$I = \frac{82,5 \text{ kVA}}{660 \text{ V}} = 125 \text{ A}$$

De acordo com o Anexo 7 (ABNT), para um fator de agrupamento unitário e método F, sendo três condutores carregados em trifólio, é escolhida a seção dos condutores de #25mm² mais condutor de proteção de #16mm², segundo tabela 58 da norma NBR 5410/2004.

O cálculo de queda de tensão não foi realizado devido à pequena distância entre o QGBT-01 e o painel de correção, que fica na casa dos 10 metros.

O dimensionamento do barramento do painel de correção foi realizado com base na soma das correntes dos disjuntores de proteção instalados para proteger a fiação que vai do barramento aos condutores. O cálculo da sua corrente é apresentado abaixo:

$$I = 5 \times 50 \text{ A} + 1 \times 25 \text{ A} = 375 \text{ A}$$

Aplicando-se uma margem de 10%, tem-se que a corrente do barramento deve ser de 412,5A. Comercialmente, o barramento trifásico próximo deste valor é o de 420A, com nível de curto-circuito de 10kA. Finalmente para levar o sinal de corrente, após os TCs ao painel, foi estipulado um condutor de #4mm² apesar da baixa corrente máxima de 5A. A adoção de margem tão grande deve-se ao fato que os custos com esses condutores são muito baixos, e altas margens levam a uma melhor leitura da corrente.

A fiação usada nos comandos de acionamento do controlador automático de fator de potência até as contatoras possui seção de #1,5mm² devido a baixa corrente que por ele

passa. Vale lembrar que no painel foi instalada uma lâmpada de 25W para sua iluminação, a qual é acionada através de chave quando da abertura da porta do painel. O mesmo também possui um termostato que aciona um exaustor caso a temperatura passe dos 50°C. Ambos os equipamentos também são alimentados por condutores de seção #1,5mm² devido à sua baixa potência.

3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE HARMÔNICAS

A fim de tornar o projeto de correção de fator de potência mais eficaz e mais seguro, foi realizado um estudo para realização de filtragem de componentes harmônicas de corrente. Este projeto atenua dois aspectos das correntes harmônicas, sendo estes a ressonância entre uma componente harmônica da corrente de carga e a frequência de ressonância do sistema, o que é altamente destrutivo ao sistema e deve ser bloqueado, e também as componentes harmônicas mais relevantes e mais comuns que acabam por impor uma potência de distorção harmônica ao tetraedro das potências, como explicado anteriormente, que pode fazer com que a compensação de energia reativa, não seja suficiente para atingir-se o fator de potência unitário, invalidando todo o projeto de correção de fator de potência.

A convenção adotada para dimensionar-se o reator anti-ressonante é relacionar a impedância do reator à do capacitor que está ligado em série. Como dito anteriormente, a maioria das cargas industriais possui espectro harmônico típico, sendo assim, uma relação que atende este espectro harmônico típico é a de 7%, o que equivale a uma frequência de sintonia de 227Hz, como pode ser observado no quadro 3 pag:39. Esta relação será usada para cálculos dos respectivos reatores dos bancos de capacitores de 15kvar e 7,5kvar.

Calculando-se a capacitância dos bancos trifásicos de capacitores pela Fórmula (49).

$$C = \frac{kvar \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (V_L)^2} \quad (49)$$

Onde a capacitância dos bancos de capacitores de 15kvar e 7,5kvar valem respectivamente:

$$C = \frac{15 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (380)^2} = 275,7 \mu F$$

$$C = \frac{7,5 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (380)^2} = 137,84 \mu F$$

Calculando-se a impedância dos bancos de capacitores, através da fórmula abaixo para os bancos de $15kvar$ e $7,5kvar$ respectivamente:

$$Z_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 275,7 \cdot 10^{-6}} = 9,6266\Omega$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 137,8410 \cdot 10^{-6}} = 19,25\Omega$$

Sabendo-se que a relação vale 7% e tendo-se a capacitância dos capacitores, calcula-se a impedância dos reatores para os bancos de capacitores de $15kvar$ e $7,5kvar$ respectivamente, através da fórmula X:

$$p\% = \frac{Z_L}{Z_C} = 0,07 = \frac{Z_L}{9,6266} \quad Z_L = 674mH$$

$$p\% = \frac{Z_L}{Z_C} = 0,07 = \frac{Z_L}{19,25} \quad Z_L = 1347,5mH$$

Os reatores anti-ressonantes causam um aumento na tensão de operação dos bancos de capacitores, que é calculada pela fórmula a seguir:

$$U_C = \frac{V_L}{(1-p\%)} = \frac{380}{1-0,07} = 408,6V$$

Como já detalhado, a adoção de capacitores de 440V cumpre essa sobre tensão.

A impedância total dos ramos dos bancos de capacitores e seus reatores são respectivamente iguais a:

$$Z = -jZ_C + jZ_L = -j9,6266 + j0,674 = 8,9526\Omega$$

$$Z = -jZ_C + jZ_L = -j19,25 + j1,3475 = 17,9025\Omega$$

Calcula-se assim a potência reativa injetada pelos bancos de capacitores, que são respectivamente, após a adoção dos reatores anti-ressonantes, iguais a:

$$Q = \frac{U^2}{Z} = \frac{380^2}{8,9526} = 16,129kvar$$

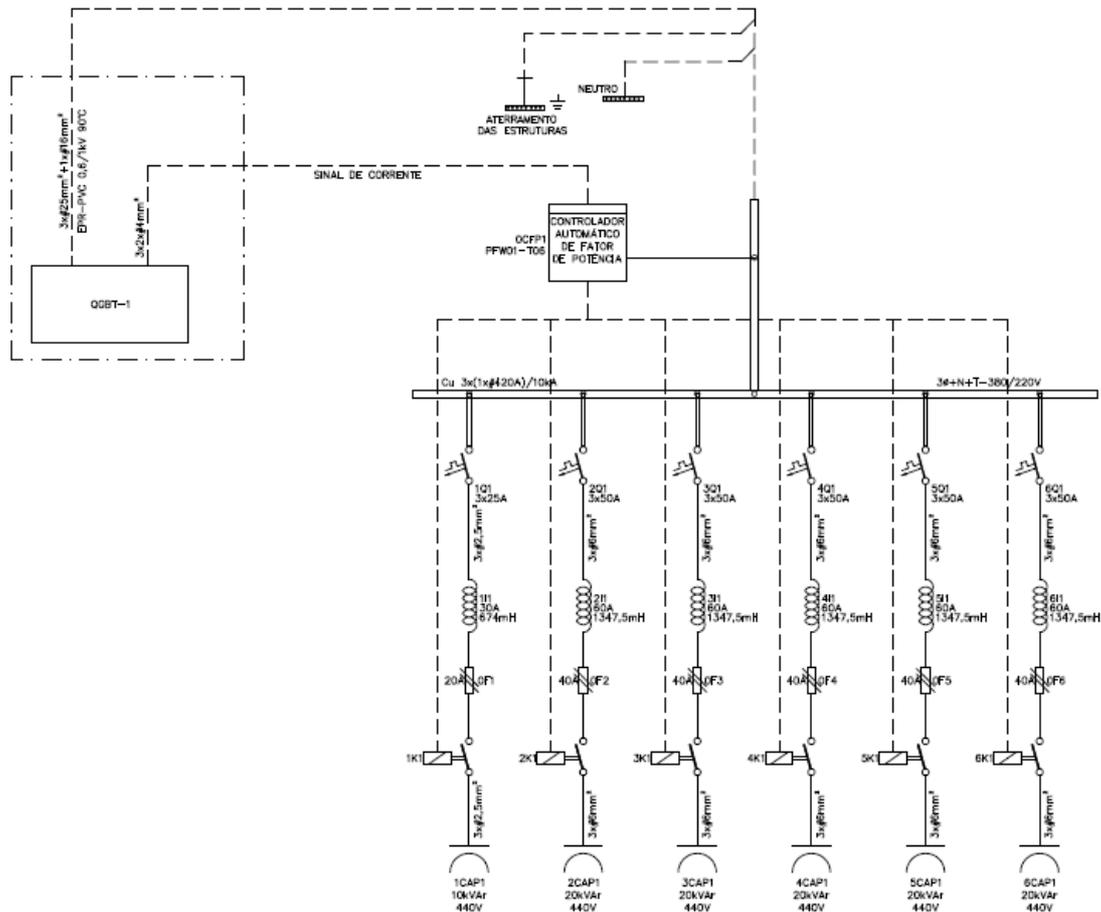
$$Q = \frac{U^2}{Z} = \frac{380^2}{17,9025} = 8,06kvar$$

A corrente para que devem ser projetados os reatores anti-ressonantes deve ser maior que a corrente que suportam os fusíveis e disjuntores dos respectivos capacitores, no caso 30A para o capacitor de $7,5kvar$ e 60A para os capacitores de $15kvar$.

3.3 DIAGRAMAS E ESQUEMÁTICOS DO PAINEL

A seguir são apresentadas figuras referentes aos diagramas e esquemáticos do painel.

Figura 14 – Diagrama esquemático do painel de correção de fator de potência.



Fonte: Próprio Autor.

Onde:

OCFP1 = Controlador PFW01-T06

1Q1 = Disjuntor de 25A

2Q1 ... 6Q1 = Disjuntores de 50A

0F1 = Fusível NH de 20A

0F2 ... 0F6 = Fusíveis de NH 40A

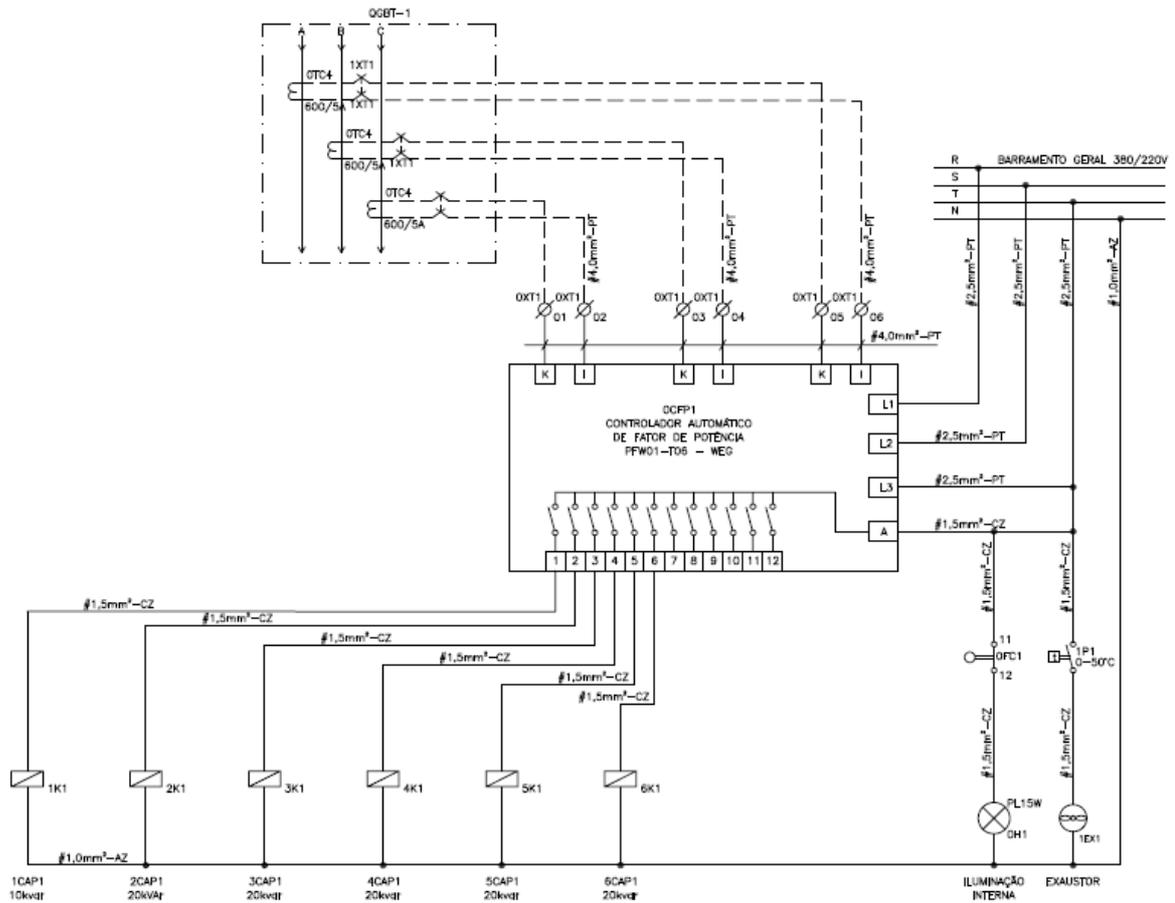
1k1 ... 6k1 = Contadoras CWM 25C

1CAP1 = Capacitor de 10kvar 440V

2CAP1 ... 6CAP1 = Capacitores de 20kvar 440V

O diagrama esquemático das ligações do controlador automático PFW01-T06 é apresentado na Figura (15).

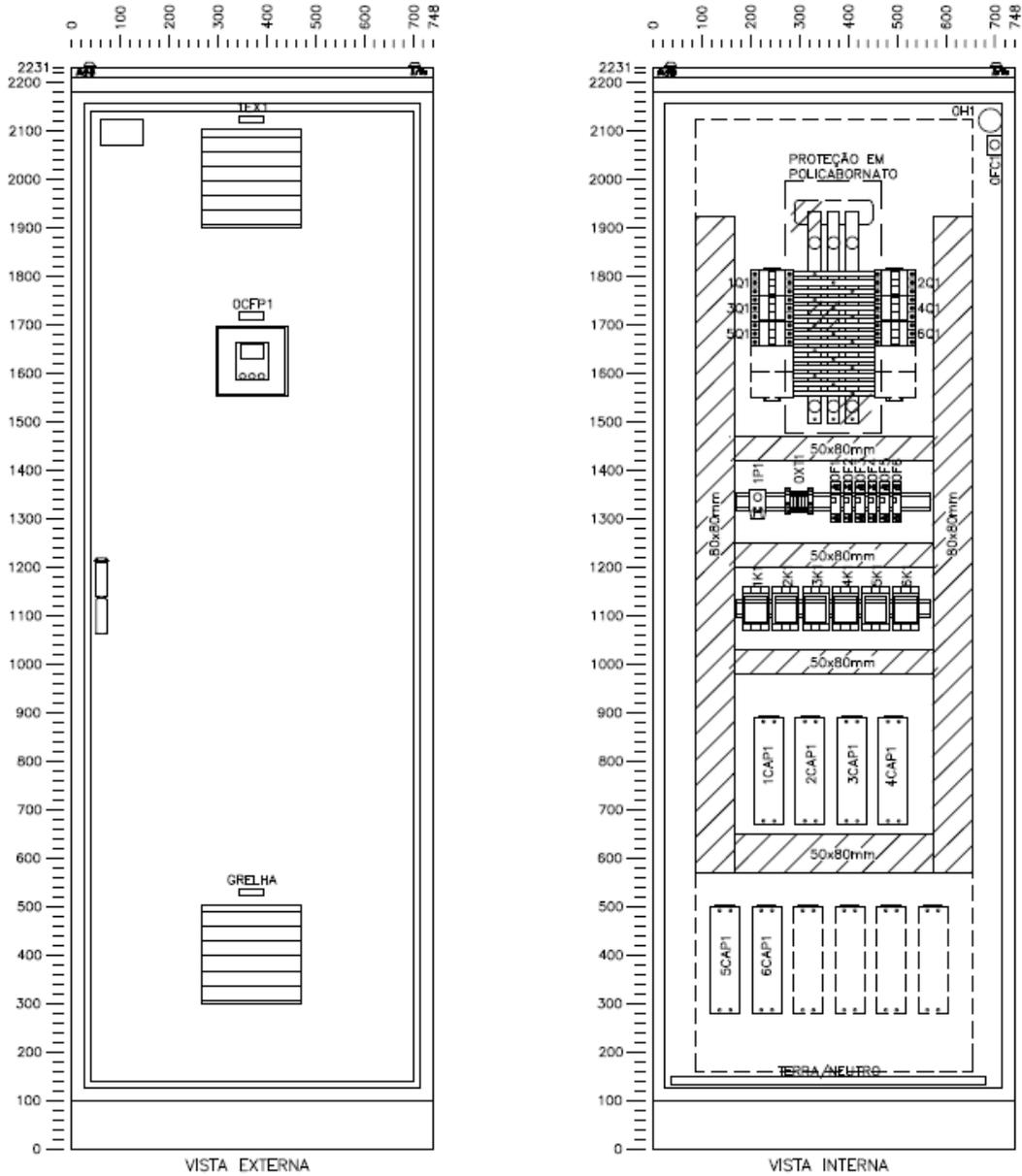
Figura 15 – Diagrama esquemático do controlador automático de fator de potência.



Fonte: Próprio Autor.

O layout do painel, montado em caixa da ABB modelo ArTuK é apresentado na Figura (16).

Figura 16 – Layout externo frontal e interno frontal do painel.



Fonte: Próprio Autor.

Dessa forma, conclui-se a apresentação do layout.

3.4 TARIFICAÇÃO ANTES E APÓS A CORREÇÃO DE FP

O foco de um projeto de correção de fator de potência é principalmente a redução na tarifa mensal praticado pela concessionária de energia sobre a energia gasta pela indústria. A seguir são apresentados os resultados do projeto, onde é comparado o valor mensal sem a compensação de fator de potência e é simulado o valor após a adoção do painel de correção de fator de potência.

De acordo com a Resolução nº 456/2000 da ANEEL (ANEEL, 2000), tem-se que para uma potência instalada maior do que 75kW e menor do que 2500kW, sendo que a potência instalada da indústria é de 270kW e a tensão de fornecimento 13,8kV. Dessa forma, a classe consumidora da indústria em questão é a A-4.

Ainda sobre a Resolução nº 456/2000 da ANEEL, havendo tensão de fornecimento inferior a 69kV e demanda maior do que 30kW e menor do que 300kW, pode-se optar pelas tarifas azul ou verde, sendo estas horo-sazonais. Para cálculo de consumo, será utilizada a tarificação horo-sazonal Azul, pois esta é a tarifa atualmente em prática na indústria, e a que possui menor tarificação entre as duas opções.

Situada em São Leopoldo, a indústria em questão é atendida pela concessionária de energia AES SUL. Abaixo é apresentado o Quadro (5) compreendendo sua tarificação vigente para indústrias do subgrupo A-4 em tensão de fornecimento entre 2,3kV e 25kV.

Quadro 5 – Tarificação Horo-Sazonal Azul vigente na concessionária AES SUL para subgrupo A-4.

Demanda Ativa R\$/kW		Demanda Reativa R\$/kW		Demanda Ultrapassagem R\$/kW		Energia Ativa R\$/kWh		Energia Reativa R\$/kWh	
Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta
18,75	10,97	10,97	10,97	37,50	21,94	0,2203300	0,142010	0,130070	0,130070

Fonte: Próprio Autor.

Ponta significa os horários de pico de consumo apresentados durante o dia, e compreendem os horários entre 17h e 22h dos dias úteis, enquanto que fora ponta, indica os demais horários do dia e sábados e domingos inteiros.

Para cálculo manual da tarifa, levando-se em conta o grande número de dados envolvidos em grandes períodos de faturação, foi calculado o consumo ativo, reativo e o fator de potência da indústria pelo período de 7 dias, recolhidos de hora em hora. A fim de quantificar o valor da tarificação mensal, este período de 7 dias será usado como base, multiplicando-se o consumo de energia por 4 quando for pertinente.

Vale lembrar que para unidades consumidoras com tensão de fornecimento menor do que 69kV e demanda maior do que 100kW, a demanda excedente só será cobrada se esta for maior que 10% da demanda contratada.

Aplicando-se as Fórmulas (20), (21) e (22), foram obtidos os seguintes valores:

$$UFDR (PONTA) = 150,74kW$$

$$UFDR (FORA PONTA) = 143,24kW$$

$$UFER (PONTA) = 23,68kWh/dia$$

$$UFER (FORA PONTA) = 81,63kWh/dia$$

A demanda faturável que é o maior valor entre a demanda contratada e a demanda medida em intervalos de 15 minutos vale 270kW, para os períodos de tempo ponta e fora ponta. Neste caso, a demanda faturável equivale à demanda contratada, visto que a demanda medida não alcançou em nenhum momento a contratada tanto no período ponta quanto fora ponta. Assim, a demanda faturável é de:

$$DF = 270kW$$

O consumo de energia ativa ponta resultou em:

$$C_P = 21.530,8Wh$$

Enquanto que o consumo de energia ativa fora ponta resultou em:

$$C_{FP} = 58.329,2 kWh$$

O importe total de energia elétrica (I) é dado por:

$$I = FC + FD + FER + FDR \quad (50)$$

Onde:

I = Importe total de energia elétrica (R\$);

FC = Faturamento do consumo de energia ativa (R\$);

FD = Faturamento da demanda de potência ativa (R\$);

FER = Faturamento do excedente de consumo de energia reativa (R\$);

FDR = Faturamento do excedente da demanda de potência reativa (R\$).

$$FC = FC_P + FC_{FP} \quad (51)$$

Onde:

FC = Faturamento do consumo de energia ativa (R\$);

FC_P = Faturamento do consumo de energia ativa em hora de ponto (R\$);

FC_{FP} = Faturamento do consumo de energia ativa fora da hora de ponto (R\$).

$$FC = CP \times TCP + CFP \times TCFP \quad (52)$$

Onde:

FC = Faturamento do consumo de energia ativa (R\$);

CP = Consumo de energia ativa em hora de ponto (kWh);

CFP = Consumo de energia ativa fora da hora de ponto (kWh);

TCP = Tarifa por consumo de energia ativa em hora de ponto (R\$/kWh);

$TCFP$ = Tarifa por consumo de energia ativa fora da hora de ponto (R\$/kWh);

$$FC = 21.530,8 \times 0,22033 + 58.329,2 \times 0,142010$$

$$FC = R\$ 13.027,21$$

$$FD = FDP + FDFP \quad (53)$$

Onde:

FD = Faturamento da demanda de potência ativa (R\$);

FDP = Faturamento da demanda de potência ativa em hora de ponto (R\$/kW);

$FDFP$ = Faturamento da demanda de potência ativa fora da hora de ponto (R\$/kW).

$$FD = DP \times TDP + DFP \times TDF \quad (54)$$

Onde:

FD = Faturamento da demanda de potência ativa (R\$);

DP = Demanda de potência ativa em hora de ponto (kW);

DFP = Demanda de potência ativa fora da hora de ponto (kW).

TDP = Tarifa por demanda de potência ativa em hora de ponto (R\$/kW);

TDF = Tarifa por demanda de potência ativa fora da hora de ponto (R\$/kW);

$$FD = 270 \times 18,75 + 270 \times 10,97$$

$$FD = R\$ 8.024,40$$

$$FER = FERP + FERFP \quad (55)$$

Onde:

FER = Faturamento do excedente de consumo de energia reativa (R\$);

$FERP$ = Faturamento do consumo de energia reativa em hora de ponto (R\$);

$FERFP$ = Faturamento do consumo de energia reativa fora da hora de ponto (R\$).

$$FER = UFERP \times \frac{R\$}{kWh} + UFERFP \times \frac{R\$}{kWh} \quad (56)$$

Onde:

FER = Faturamento do excedente de consumo de energia reativa (R\$);

$UFERP$ = Unidades excedentes de consumo de energia reativa na hora de ponto (kVAr);

$UFERFP$ = Unidades excedentes de consumo de energia reativa fora da hora de ponto (kVAr);

$$FER = 23,68 \times 22 \times 0,13007 + 81,63 \times 22 \times 0,13007$$

$$FER = R\$ 96,29$$

$$FDR = UFDRP \times \frac{R\$}{kW} + UFDRFP \times \frac{R\$}{kWh} \quad (57)$$

Onde:

FDR = Faturamento do excedente de demanda de potência reativa (R\$);

$UFDRP$ = Unidades excedentes de demanda de potência reativa na hora de ponto (kVAr);

$UFDRFP$ = Unidades excedentes de demanda de potência reativa fora da hora de ponto (kVAr);

$$FDR = 150,74 \times 10,97 + 143,24 \times 10,97$$

$$FDR = R\$ 3.224,96$$

Então, através da Fórmula (50):

$$I = 13.027,21 + 8.024,40 + 96,29 + 3.224,96$$

$$I = R\$ 24.372,86$$

Acrescentando 25% de ICMS, tem-se:

$$ICMS = I \times (Y/(100 - Y)) = R\$ 8.124,29 \quad (58)$$

Onde:

Y = Alíquota do ICMS (%).

O importe total de energia elétrica (I_t) é dado por:

$$I_t = I + ICMS = R\$ 32.497,15 \quad (59)$$

Onde:

I_t = Importe total de energia elétrica (R\$);

I = Importe de energia elétrica (R\$);

$ICMS$ = Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.

Assim o custo total com energia elétrica no mês de outubro de 2013, seria de aproximadamente R\$ 32.497,15 se não houvesse nenhuma forma de correção de fator de potência.

Como o painel de correção automática de fator de potência é eficiente e capaz de em qualquer momento igualar ou superar o valor de 0,92 do fator de potência da indústria, tem-se que os gastos com energia reativa seriam nulas, caso este fosse adotado. Estes gastos correspondem aos valores de FER e FDR , que seriam simplesmente subtraídos dos gastos de energia. A seguir são determinados os gastos com energia elétrica após a adoção do painel.

Através da Fórmula (52), tem-se:

$$FC = 21.530,8 \times 0,22033 + 58.329,2 \times 0,142010$$

$$FC = R\$ 13.027,21$$

Através da Fórmula (54), tem-se:

$$FD = 270 \times 18,75 + 270 \times 10,97$$

$$FD = R\$ 8.024,40$$

Através da Fórmula (56) , tem-se:

$$FER = 0 \times 22 \times 0,13007 + 0 \times 22 \times 0,13007$$

$$FER = R\$ 0$$

Através da Fórmula (57) , tem-se:

$$FDR = 0 \times 10,97 + 0 \times 10,97$$

$$FDR = R\$ 0$$

Então, através da Fórmula (50):

$$I = 13.027,21 + 8.024,40 + 0 + 0$$

$$I = R\$ 21.051,61$$

Através da Fórmula (58), tem-se:

$$ICMS = I \times (Y/(100 - Y)) = R\$ 7.017,21$$

O importe total de energia elétrica é dado pela Fórmula (59):

$$I_t = I + ICMS = R\$ 28.068,81$$

Apresentando assim uma economia de R\$ 4.428,33 por mês, salvas as devidas variações mensais, o que pagaria o investimento feito no painel em aproximadamente entre 5 a 7 meses visto que o custo de um painel com essas características fica entre R\$ 17.000,00 para os modelos mais baratos e R\$ 27.000,00 para os modelos com chaparia TTA.

O Quadro (6) mostra os resultados finais da simulação, antes e a utilização do painel de correção do fator de potência.

Quadro 6 – Resultados finais da simulação.

Valor da fatura antes da implementação do painel	R\$ 32.497,15
Valor da fatura após a implementação do painel	R\$ 28.068,81
Diferença mensal	R\$ 4.428,33
Valor do investimento	R\$ 17.000,00
Retorno do investimento	Possível em 4 meses

Fonte: Próprio autor.

4 CONCLUSÃO

Visando a diminuição da tarifa de energia elétrica de uma indústria, foi elaborado um projeto de correção de fator de potência. Para isso, foram adquiridos como parâmetros os valores lidos em um equipamento de medição particular instalado no lado da baixa tensão do transformador que alimenta a mesma, e através dessas leituras foi projetado um painel de correção de fator de potência para suprir as necessidades específicas da mesma.

Através desse projeto, constataram-se os benefícios econômicos advindos da possível incorporação de um painel de correção automática de fator de potência, onde conclui-se que a aplicação do mesmo é viável e possui retorno financeiro em poucos meses, além de diminuir a carga sobre condutores, contadores e demais componentes da alimentação da indústria.

5 REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, **Resolução ANEEL n° 456**, de 29 de novembro de 2000.
- [2] CREDER, Hélio, **Instalações Elétricas**, 15rd ed., Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [3] COTRIM, Ademaro Alberto Machado Bittencourt, **Instalações Elétricas**, 5rd ed., São Paulo : Pearson Prentice Hall, 2009.
- [4] WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**, 2009.
- [5] WEG, **Multimedidor de Grandezas Elétricas e Controlador Automático do Fator de Potência**, 2012.
- [6] WEG, **Contatores para Manobra de Capacitores**, 2013.
- [7] PORTUGAL, Paulo Max Maciel, **Análise de Auto-excitação e Curto-circuito Capacitivo em Geradores Síncronos Conectados a Grandes Sistemas de Transmissão CCAT e CAAT**, Rio de Janeiro: 2007.
- [8] BONAN,G.; GABIATTI,G.; MARTINS, A.S; **Faturamento de Reativos pelas Concessionárias de Energia Elétrica**.
- [9] PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, **Manual da Tarifação de Energia Elétrica**, 2001.
- [10] CCON - COMITÊ COORDENADOR DE OPERAÇÕES NORTE/NORDESTE, **Estrutura Tarifária Horo - Sazonal Azul e Verde - Manual do Consumidor**. Recife, 1989.
- [11] CELPE - COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO, **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica - Normas e Orientações**.
- [12] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 5410, **Instalações Elétricas de baixa tensão**, 2008.

ANEXO 1

Quadro com os principais parâmetros de para instalação de capacitores - Inducon

Tensão de linha (V)	Potência (kvar)		Capacitância nominal (μ F)	Corrente nominal (A)		Fusível NH ou DZ (A)	Condutor de ligação mm^2
	50 Hz	60 Hz		50 Hz	60 Hz		
220	2,1	2,5	137,01	5,5	6,6	10	2,5
	4,2	5,0	274,03	10,9	13,1	25	2,5
	6,3	7,5	411,04	16,4	19,7	32	6
	8,3	10,0	548,05	21,8	26,2	50	10
	10,4	12,5	685,07	27,3	32,8	63	16
	12,5	15,0	822,08	32,8	39,4	63	16
	14,6	17,5	959,09	38,2	45,9	80	25
	16,6	20,0	1096,12	43,7	52,5	100	25
	18,7	22,5	1233,12	49,1	59,0	100	35
	20,8	25,0	1370,14	54,6	65,6	125	35
380	2,1	2,5	45,92	3,2	3,8	10	2,5
	4,2	5,0	91,85	6,3	7,6	16	2,5
	6,3	7,5	137,77	9,5	11,4	20	2,5
	8,3	10,0	183,70	12,7	15,2	25	4
	10,4	12,5	229,62	15,8	19,0	32	6
	12,5	15,0	275,55	19,6	22,8	32	6
	14,6	17,5	321,47	22,2	26,6	50	10
	16,6	20,0	367,39	25,3	30,4	50	10
	18,7	22,5	413,32	28,5	34,2	63	16
	20,8	25,0	459,24	31,7	38,0	63	16
	25,0	30,0	551,09	38,0	45,6	80	25
	29,2	35,0	642,94	44,3	53,2	100	25
	33,3	40,0	734,79	50,6	60,8	100	35
37,5	45,0	826,64	57,0	68,4	125	50	
41,6	50,0	918,48	63,3	76,0	125	50	
440	2,1	2,5	34,25	2,7	3,3	6	2,5
	4,2	5,0	68,51	5,5	6,6	10	2,5
	6,3	7,5	102,76	8,2	9,8	16	2,5
	8,3	10,0	137,01	10,9	13,1	25	2,5
	10,4	12,5	171,26	13,7	16,4	32	4
	12,5	15,0	205,52	16,4	19,7	32	6
	14,6	17,5	239,77	19,2	23,0	50	6
	16,6	20,0	274,03	21,8	26,2	50	10
	18,7	22,5	308,28	24,6	29,5	50	10
	20,8	25,0	342,53	27,3	32,8	63	16
	25,0	30,0	411,04	32,8	39,4	63	16
	29,2	35,0	479,54	38,2	45,9	80	25
	33,3	40,0	548,05	43,7	52,5	100	25
37,5	45,0	616,56	49,1	59,0	100	35	
41,6	50,0	685,07	54,6	65,6	125	35	
480	4,2	5,0	57,56	5,1	6,0	10	2,5
	8,3	10,0	115,13	10,0	12,0	20	2,5
	12,5	15,0	172,69	15,0	18,0	32	4
	16,6	20,0	230,26	20,1	24,1	50	6
	20,8	25,0	287,82	25,1	30,1	50	10
	25,0	30,0	345,39	30,1	36,1	63	16
	29,2	35,0	402,95	35,1	42,1	80	16
	33,3	40,0	460,52	40,1	48,1	80	25
	37,5	45,0	518,08	45,1	54,1	100	25
41,6	50,0	575,65	50,1	60,1	100	35	

ANEXO 3

Tabela de contadores CWM_C para manobra de capacitores-(AC-6b) WEG

			CWM25C	CWM32C	CWM50C	CWM65C
Potência reativa para bancos de capacitores AC-6b ($T_{amb}=55^{\circ}C$)	220 V	(kVar)	10	15	25	30
	380 V	(kVar)	15	25	40	50
	440 V	(kVar)	20	30	45	60
	480 V	(kVar)	22	32	50	65
	660 V	(kVar)	25	40	65	87
Corrente nominal Térmica (Ith) (55°C) (A)			45	60	90	110
Potência reativa para bancos de capacitores AC-6b- ($T_{amb}=70^{\circ}C$)	220 V	(kVar)	5	10	17	20
	380 V	(kVar)	10	17	30	36
	440 V	(kVar)	10	21	35	42
	480 V	(kVar)	12	23	38	45
	660/690 V	(kVar)	16	30	50	62
Fusível Máximo (gL/gG) (A)			50	63	100	125

ANEXO 4

Valores Comerciais de Fusíveis NH - Siemens

Tamanho	Corrente nominal (A)	Tipo		Tamanho	Corrente nominal (A)	Tipo		
		Indicador de atuação no topo	Indicador de atuação frontal ¹⁾			Indicador de atuação no topo	Indicador de atuação frontal ¹⁾	
000	6	3NA3 801	–	1	40	3NA3 117	3NA7 117	
	10	3NA3 803	3NA7 803		50	3NA3 120	3NA7 120	
	16	3NA3 805	3NA7 805		63	3NA3 122	3NA7 122	
	20	3NA3 807	3NA7 807		80	3NA3 124	3NA7 124	
	25	3NA3 810	3NA7 810		100	3NA3 130	3NA7 130	
	32	3NA3 812	3NA7 812		125	3NA3 132	3NA7 132	
	40	3NA3 817	3NA7 817		160	3NA3 136	3NA7 136	
	50	3NA3 820	3NA7 820		200	3NA3 140	3NA7 140	
	63	3NA3 822	3NA7 822		224	3NA3 142	3NA7 142	
	80	3NA3 824	3NA7 824		250	3NA3 144	3NA7 144	
	100	3NA3 830	3NA7 830					
	00	125	3NA3 832		3NA7 832			
160		3NA3 836	3NA7 836					

ANEXO 5

Tabela 38 – Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência E, F e G – ABNT NBR 5410:2004

ABNT NBR 5410:2004

Tabela 38 — Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência E, F e G

Condutores: cobre e alumínio

Isolação: PVC

Temperatura no condutor: 70°C

Temperatura ambiente de referência: 30°C

Seções nominais dos condutores mm ²	Métodos de referência indicados na tabela 33						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares ¹⁾				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano		
					Justapostos	Espaçados	
	Método E	Método E	Método F	Método F		Horizontal Método G	Vertical Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Cobre						
0,5	11	9	11	8	9	12	10
0,75	14	12	14	11	11	16	13
1	17	14	17	13	14	19	16
1,5	22	18,5	22	17	18	24	21
2,5	30	25	31	24	25	34	29
4	40	34	41	33	34	45	39
6	51	43	53	43	45	59	51
10	70	60	73	60	63	81	71

ANEXO 6

Tabela de escolha de transformadores de corrente – Siemens

Tabela de escolha		
Corrente nominal primária I_{pn} (A)	Corrente secundária 5A	
	Carga nominal (VA)	Transformador de corrente
Classe de exatidão 3%		
50	2,5	4NF01 12-2BC20
60	2,5	4NF01 13-2BC20
Classe de exatidão 1,2%		
75	2,5	4NF01 15-2HC20
100	2,5	4NF01 17-2HC20
Classe de exatidão 0,6%		
150	2,5	4NF01 21-2JC20
200	5	4NF01 22-2JE20
250	5	4NF01 23-2JE20
200	5	4NF02 22-2JE20
250	5	4NF02 23-2JE20
300	5	4NF02 24-2JE20
400	5	4NF02 25-2JE20
400	5	4NF03 25-2JE20
500	5	4NF03 26-2JE20
600	5	4NF03 27-2JE20
800	5	4NF03 30-2JE20
1000	12,5	4NF04 31-2JJ20
1200	12,5	4NF04 32-2JJ20
1500	12,5	4NF04 34-2JJ20
2000	12,5	4NF05 36-2JJ20
2500	12,5	4NF05 37-2JJ20

ANEXO 7

Tabela 39 – Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência E, F e G – ABNT NBR 5410:2004

Tabela 39 — Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência E, F e G
Condutores: cobre e alumínio
Isolação: EPR ou XLPE
Temperatura no condutor: 90°C
Temperatura ambiente de referência: 30°C

Seções nominais dos condutores mm ²	Métodos de referência indicados na tabela 33							
	Cabos multipolares			Cabos unipolares ¹⁾				
	Dois condutores carregados	Três condutores carregados	Dois condutores carregados, justapostos	Três condutores carregados, em trifólio	Três condutores carregados, no mesmo plano			
					Justapostos	Espaçados		
	Método E	Método E	Método F	Método F		Método F	Horizontal Método G	Vertical Método G
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
Cobre								
0,5	13	12	13	10	10	15	12	
0,75	17	15	17	13	14	19	16	
1	21	18	21	16	17	23	19	
1,5	26	23	27	21	22	30	25	
2,5	36	32	37	29	30	41	35	
4	49	42	50	40	42	56	48	
6	63	54	65	53	55	73	63	
10	86	75	90	74	77	101	88	
16	115	100	121	101	105	137	120	
25	149	127	161	135	141	182	161	