

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TÚLIO ZAMBALDI OLIVEIRA BARRÊTO

**ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA DO INSTITUTO DE
BIOTECNOLOGIA APLICADA À AGROPECUÁRIA
(BIOAGRO) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

VIÇOSA

2017

TÚLIO ZAMBALDI OLIVEIRA BARRÊTO

**ANÁLISE DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA APLICADA À
AGROPECUÁRIA (BIOAGRO) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE VIÇOSA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA
2017

TÚLIO ZAMBALDI OLIVEIRA BARRÊTO

**ANÁLISE DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DO
INSTITUTO DE BIOTECNOLOGIA APLICADA À
AGROPECUÁRIA (BIOAGRO) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE VIÇOSA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em ____/____/____.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio Resende – Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Erick Brito – Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Tente a sua sorte! A vida é feita de oportunidades. O homem que vai mais longe é quase sempre aquele que tem coragem de arriscar. ”

(Dale Carnegie)

Resumo

O fator de potência se tornou um aspecto tão importante, no que se refere a uso de energia elétrica, que com o passar dos tempos, foram criadas normas e conseqüentemente multas para os consumidores que desrespeitem as mesmas. Não só por isso que ele se tornou fundamental, mas também por outros problemas causados pelo seu baixo valor, como subutilização da capacidade instaladas, perdas ôhmicas e afundamento de tensão. São esses problemas a serem minimizados neste estudo. Portanto, serão feitas medições em períodos diferentes para realizar uma adequada proposta de correção. De posse destes dados, é simulada a inserção dessa proposta na instalação utilizando o software *Matlab*, que comprova a eficácia do sistema proposto e em seguida são realizados os cálculos dos demais elementos.

Abstract

The power factor has become a such important aspect concerning the electric energie use that with the passing of time normes were created and consequently fines for the consumer, who disrespects them. Not only for this it has become fundamental, but also the other problems caused by its low rate, like installed capacity sub utilization, ohmics losses and voltage drops, These one will be minimized at this study. Therefore, measurements will be made in distincts periods for a proper correction proposal. With these data, the insertion of the proposal in the electric instalation using the software Matlab is simulated, and this simulation proves the effectiveness of the proposed system. After that, the other elements will be estimated.

| | | |
|---------|---|--------------------------------------|
| | Sumário | |
| 1. | Introdução | 8 |
| 1.1 | Objetivo | 8 |
| 1.2 | Estrutura do Trabalho | 9 |
| 2. | Revisão Teórica | 10 |
| 2.1 | Fator de Potência | 10 |
| 2.2 | Problemas causados pelo FP baixo | 12 |
| 2.2.1 | Perdas | 12 |
| 2.2.2 | Queda ou aumento de tensão | 13 |
| 2.2.3 | Subutilização de transformadores | 14 |
| 2.3 | Causas do Baixo Fator de Potencia | 14 |
| 2.4 | Métodos de correção de fator de potência | Erro! Indicador não definido. |
| 2.4.1 | Controle de demanda de reativo sem deslocamento de fase | 17 |
| 2.4.2 | Máquinas síncronas superexcitadas | 17 |
| 2.4.3 | Bancos de Capacitores | 18 |
| 2.4.3.1 | Bancos fixos | 18 |
| 2.4.3.2 | Bancos Automáticos | 19 |
| 2.5 | Tipos de correção do FP | 23 |
| 2.6 | Cuidados a serem tomados | 24 |
| 2.6.1 | Harmônicas | 24 |
| 2.6.2 | Ressonância | 25 |
| 3. | Metodologia do projeto | 28 |
| 3.1 | Dimensionamento dos bancos | 28 |
| 3.2 | Dimensionamento dos condutores | 30 |
| 3.3 | Dimensionamento dos dispositivos de manobra | 30 |
| 3.4 | Dimensionamento dos dispositivos de proteção | 31 |
| 3.4.1 | Fusíveis | 31 |
| 3.4.2 | Disjuntores termomagnéticos | 31 |
| 3.4.3 | Indutores de dessintonia | 31 |
| 3.5 | Controladores automáticos do fator de potência | 33 |
| 4. | Projeto | 34 |
| 4.1 | Medições | 34 |
| 4.2 | Resultados | 36 |
| 4.2.1 | Análise Principal | 36 |
| 4.2.2 | Análise Secundária | 42 |
| 5. | Conclusão | 46 |
| 6. | Referências | 47 |

1. Introdução

A crescente demanda de energia ativa e reativa torna a eficiência, segurança e confiabilidade dos sistemas, através de um design e operação adequados, ainda mais importante. Dessa forma, para que fornecedores possam realizar a entrega de energia elétrica de qualidade, os consumidores devem se ater a normas de regulamentação.

Uma dessas normas se refere ao fator de potência da instalação presente no Art. 95 da resolução normativa ANEEL N° 569 de 23/07/2013, “O fator de potência de referência “fR”, indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras do grupo A, o valor de 0,92”. Portanto, aquele que não estiver dentro desse limite está sujeito a cobrança de uma multa. O grupo A é composto pelos consumidores alimentados por tensões iguais ou superiores à 2,3 *kilovolts* (kV) ou através da distribuição secundária por instalação subterrânea.

Apesar da potência reativa não ser revertida em trabalho útil e contabilizada normalmente na conta de energia (se estiver dentro da norma), a concessionária gasta recursos para transmiti-la até o consumidor final. Logo, é definido esse limite de utilização da mesma. (LUCAS, 2013)

O excesso de energia reativa no sistema não só gera ônus ao consumidor através de multas, mas também causa a subutilização dos transformadores, queda de tensão, maior carregamento dos circuitos, maiores perdas por efeito Joule, entre outros malefícios.(HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é investigar a melhor e mais viável forma de correção do fator de potência do prédio BIOAGRO da Universidade Federal de Viçosa (UFV), um prédio de grande porte que comporta diversos laboratórios e tem extrema importância no campo de pesquisas agropecuárias da universidade.

Haja vista o não pagamento direto de conta de energia e a correção geral feita pela universidade, o principal resultado esperado é o alívio do transformador principal e circuitos, e as reduções das perdas por efeito Joule.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho é dividido em 6 Capítulos:

- Capítulo 1 – No primeiro capítulo é demonstrado o objetivo do trabalho e a estrutura do trabalho.
- Capítulo 2 – No segundo capítulo é feita uma revisão teórica para que o leitor relembre alguns conceitos importantes para o entendimento do processo prático que vem a seguir, os quais são a teoria do fator de potência, os problemas do baixo fator de potência (FP), as causas, os métodos, tipos e cuidados na correção.
- Capítulo 3 – No terceiro capítulo é abordado os procedimentos e fórmulas de dimensionamentos dos componentes que compõem um banco de capacitor (BC) de acordo com seu tipo.
- Capítulo 4 – No quarto capítulo é caracterizado o local onde foram efetuadas as medições, como elas se deram e são mostrados os resultados. Também é proposto o sistema de correção e feita uma simulação, utilizando o software *Matlab*, do mesmo inserido na instalação. Com as informações da simulação foram dimensionados os demais componentes.
- Capítulo 5 – No quinto capítulo é feita a conclusão do trabalho.
- Capítulo 6 – No sexto capítulo são relacionadas as referências que serviram de base para a realização do estudo e leituras complementares a respeito de tópicos existentes no mesmo.

2.Revisão Teórica

2.1 Fator de Potência

De acordo com HOFMANN, SCHLABBACH e JUST (2012), a potência elétrica subdivide-se em três componentes:

- Potência Ativa
- Potência Reativa
- Potência Aparente

A potência ativa é a energia que é convertida em trabalho, ou seja, é responsável pelo calor, movimento e luz dos aparelhos eletroeletrônicos. Sua unidade de medida é o Watt (W). Matematicamente, é gerada pela parte real da corrente elétrica e está em fase com a tensão. (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

A potência reativa é a responsável pela geração dos campos elétricos e magnéticos necessários em alguns tipos de equipamentos, como transformadores, motores/geradores e cargas não-lineares (SACCOL, GABIATTI e BONAN, 20-?). Essa energia não é consumida e retorna à rede a cada ciclo da corrente alternada. Esta já é gerada pela parte complexa da representação matemática da corrente elétrica. Sua unidade de medida é *Volt-Amper* reativo (VAr).

A potência aparente é a soma vetorial das potências ativa e reativa, medida em VA. Estas podem ser calculadas em um sistema trifásico a partir das equações 1,2 e 3 e a relação entre elas pode ser demonstrada pela Figura 1, o triângulo das potências. (FRAGOAS, 2008)

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos \varphi \quad (1)$$

$$Q = \sqrt{3}V_L I_L \sin \varphi \quad (2)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}V_L I_L \quad (3)$$

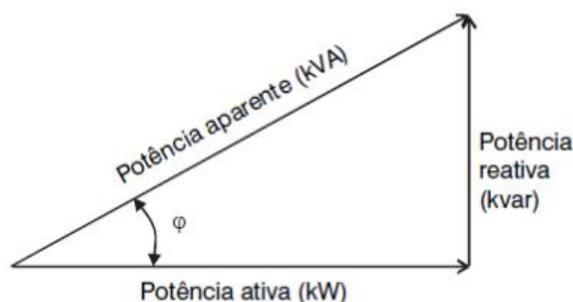


Figura 1- Triângulo das Potências

Onde:

P= Potência ativa em kW;

Q= Potência reativa em kVAr;

S = Potência aparente em kVA;

φ = ângulo de defasagem entre tensão e corrente em graus elétricos.

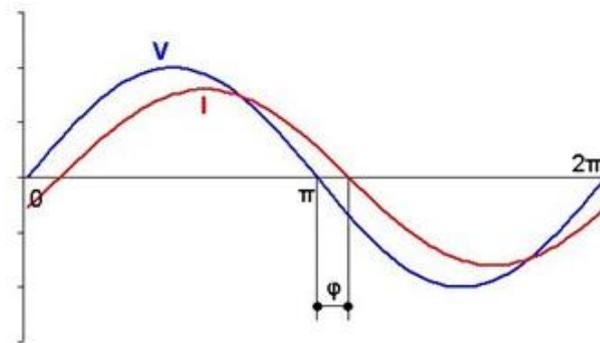


Figura 2 - Defasagem entre tensão e corrente

Fonte: portaldoeletricista.com.br

A partir desses conceitos, pode-se denominar o fator de potência como a relação entre a potência ativa e a potência aparente como visto na equação 4. Em um sistema puramente senoidal, ele também pode ser determinado como o cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente, equação 5.

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \frac{kW}{\sqrt{kW^2 + kVA^2 r^2}} \quad (4)$$

$$FP = \cos \varphi \quad (5)$$

Esse parâmetro da utilização da potência é adimensional e está compreendido entre 0 e 1, que pode ser positivo (indutivo) ou negativo (capacitivo), sendo que 1 representa um circuito puramente resistivo e 0 um circuito puramente indutivo ou capacitivo. (SACCOL, GABIATTI e BONAN, 20-?)

2.2 Problemas causados pelo FP baixo

O baixo fator de potência causado pelo excesso de energia reativa pode trazer problemas na geração, transmissão, distribuição e instalação elétrica. Como o objeto de estudo desse trabalho é uma instalação, os inconvenientes causados são perdas elétricas, queda de tensão e subutilização da capacidade instalada.

2.2.1 Perdas

As perdas ôhmicas se devem ao fato de que há um aumento na corrente quando o fator de potência abaixa. Essas perdas são através de calor e crescem em um fator igual a $1/\cos^2 \varphi$ de acordo com Miller (1982), e provocam maior aquecimento nos condutores. As perdas P_v podem ser calculadas por:

$$P_v = \frac{l \cdot P^2}{k \cdot A \cdot U_L^2 \cdot (\cos \varphi)^2} \quad (6)$$

Onde:

A : seção do condutor;

l : comprimento máximo do cabo;

P : potência ativa a ser transmitida;

k : condutividade elétrica;

U_L : tensão de linha;

$\cos \varphi$: fator de potência da frequência fundamental;

Então pode-se calcular também as perdas após a correção do fator de potência (P_{vd}):

$$P_{vd} = \frac{l \cdot P^2}{k \cdot A \cdot U_L^2 \cdot (\cos \varphi_d)^2} \quad (7)$$

A partir daí, obtemos o fator de redução de perdas:

$$k_{pv} = \frac{P_v - P_{vd}}{P_v} = 1 - \left(\frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_d} \right)^2 \quad (8)$$

Onde:

$\cos\varphi$: cosseno da defasagem antes da correção;

$\cos\varphi_d$: cosseno da defasagem depois da correção.

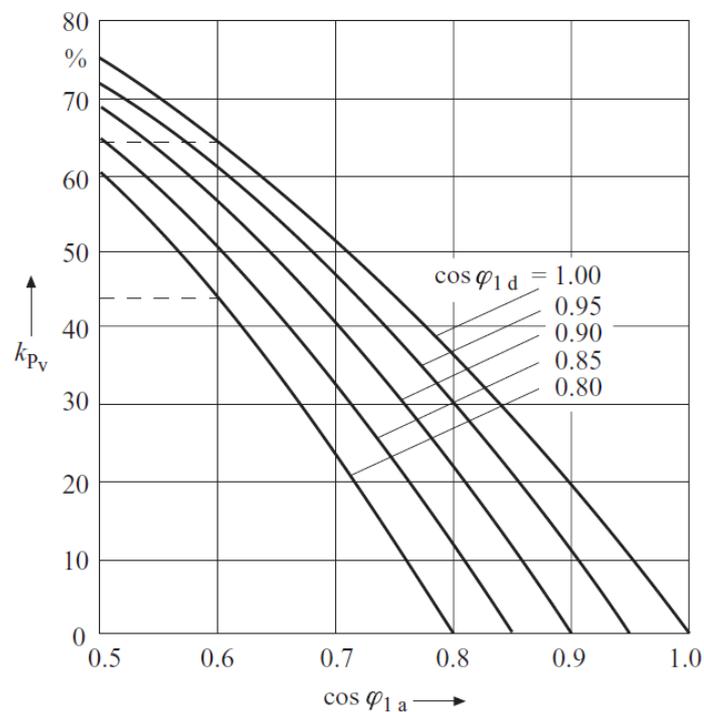


Figura 3- Fator de redução x fator de potencia

Fonte: (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

2.2.2 Queda ou aumento de tensão

A grande demanda por energia reativa, leva a um baixo fator de potência e causa quedas de tensões bruscas no transformador, o que pode causar interrupção no fornecimento de energia ou o desligamento de aparelhos sensíveis à essa variação. Da mesma forma, se o fator ficar fortemente capacitivo, há o risco do aumento da tensão, o qual pode operar os dispositivos de proteção e desligar o sistema. Esses efeitos podem ser vistos através da diminuição ou aumento de intensidade no brilho de lâmpadas e de corrente em motores. (ISONI SILVA, 2009)

2.2.3 Subutilização de transformadores

A capacidade dos transformadores de potência é expressa na potência aparente, porque corresponde à maior corrente (corrente nominal) em uma dada tensão (tensão nominal). A potência ativa a ser transferida pelo Trafo é função do FP da carga a ser suprida. Quanto maior o FP, maior a potência ativa que pode ser suprida por ele. (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

Através das formulas 1 e 3, obtém-se a equação 8 e então consegue-se encontrar a melhoria do desempenho:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (8)$$

$$\Delta S = \left(\frac{1}{\cos\varphi} - \frac{1}{\cos\varphi_{1d}} \right) \cdot P = K \cdot P \quad (7)$$

Onde:

$\cos\varphi$: cosseno da defasagem antes da correção;

$\cos\varphi_{1d}$: cosseno da defasagem depois da correção.

Essa melhoria torna possível a adição de novas cargas devido ao alívio sofrido no transformador, evitando a necessidade de novos investimentos em transformador ou substituição de condutores. (GRAMINHA BORDIM, 2011)

2.3 Causas do Baixo Fator de Potencia

A potência reativa é responsável pela manutenção dos campos elétricos e magnéticos, logo, os equipamentos com núcleo de ferro são os principais consumidores dessa energia (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012). A potência requerida depende da tensão e da carga em operação. Abaixo são vistos os principais causadores do baixo fator de potência:

- Motores de indução:

Nesse tipo de motor, a carga colocada em seu eixo não influencia no seu consumo de energia reativa, já que este é devido ao circuito magnetizante e é constante. Porém, a variação da carga no eixo do motor faz o consumo de potência ativa também variar, visto que está é a convertida em trabalho. Então quanto menor a carga, menor é a energia ativa que o motor necessita. Logo, a operação a vazio ou com cargas baixas faz com que a proporção entre potência ativa e reativa fique baixa, ou seja, fator de potência baixo.

- Transformadores a vazio ou com pouca carga:

Os transformadores são comumente estudados de forma análoga aos motores de indução, portanto a situação com pouca carga ou a vazio apresenta o mesmo comportamento. (UMANS, KINGSLEY JR e FITZGERALD, 2006)

- Lâmpadas de descarga:

Esse tipo de lâmpada necessita de reatores magnéticos que demandam energia reativa por possuírem bobinas internas. A utilização de lâmpadas sem correção individual e o grande número de unidades contribui para a redução do fator de potência geral. (ISONI SILVA, 2009)

- Grande quantidade de motores de pequena potência:

A dificuldade no dimensionamento das máquinas acopladas a eles pode provocar um baixo fator de potência, já que motores com pouca carga apresentam baixo FP. (ISONI SILVA, 2009)

- Tensão acima da nominal:

Visto que a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, a alimentação de equipamentos com uma tensão superior à especificada eleva o consumo de energia reativa, porém não afeta o consumo da ativa. (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

Os edifícios laboratoriais, como o prédio Bioagro, apresentam diversos maquinários eletroeletrônicos, iluminação fluorescente, aparelhos condicionadores de ar e elevadores que podem contribuir para um fator de potência insatisfatório.

2.4 Resumo da legislação do fator de potência

Através da resolução nº 456/2000 da ANEEL – Artigos 64 a 69 – fica regulamentado o fornecimento de energia elétrica reativa quanto ao limite de referência do fator de potência e aos demais critérios de faturamento. Sendo assim, de acordo com esta resolução, a medição do fator de potência deve ser feita de duas formas distintas: avaliação mensal e avaliação horária. Lucas (2013) explica que a avaliação mensal deve ser realizada 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. A medição deve ser feita por avaliação horária, de modo que os valores de energia ativa e reativa sejam medidos em intervalos de 1 hora ao longo das 24 horas do dia, sendo o fator 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.

O valor do Fator de Potência Médio Horário (f_i) é lido à cada hora por um registrador digital, o qual computa os valores de energia ativa (kWh) e energia reativa (kvarh). Sempre que o valor do fator de potência for menor do que 0,92, o registrador digital acumula o valor correspondente do montante de energia ativa correspondente ao excedente de consumo de energia reativa (UFER) e calcula o valor da demanda ativa corrigida (DMCR). Quando o período de faturamento é encerrado, o registrador fornece um valor acumulado de UFER e o valor máximo de DMCR. Com base nestes valores, o sistema de faturamento calcula o excedente de demanda de potência reativa e de consumo de energia reativa. (LUCAS, 2013)

2.5 Métodos de correção de fator de potência

De acordo com HOFMANN, SCHLABBACH e JUST (2012), existem essencialmente três métodos de correção de fator de potência:

- Controle da demanda de reativo sem deslocamento de fase;
- Compensação de reativo por deslocadores rotacionais de fase (motores síncronos superexcitados);
- Compensação de reativo por bancos de capacitores.

2.5.1 Controle de demanda de reativo sem deslocamento de fase

Esse tipo de correção não envolve equipamento extra. Quando em fase de projeto, pode-se limitar, por exemplo, a energia reativa que um motor síncrono consome através da distância do gap entre o estator e o rotor. Ou seja, se houver um bom planejamento e projeto da instalação industrial, de modo a dimensionar as cargas indutivas e capacitivas para que consumam somente o necessário, sem superdimensionamento, pode-se controlar com eficácia o fator de potência da instalação. (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

Já em instalações em operação pode-se verificar a possibilidade de modificação da rotina operacional no sentido de utilizar os motores o maior tempo possível com plena carga, evitando a operação a vazio. Utilização de forma racional da energia, de forma a otimizar o uso de cargas com baixa eficiência, iluminação e transformadores.

2.5.2 Máquinas síncronas superexcitadas

São normalmente utilizadas em indústrias onde esse tipo de máquina já existe e exerce função de movimentar cargas constantes devido ao seu modo de operação. Dependendo da excitação do seu enrolamento, um motor síncrono pode gerar energia reativa e dessa forma compensar parte do consumo da instalação e assim controlar o fator de potência. (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

Portanto, de acordo com a demanda de potência reativa, o motor é sobreexcitado (fornece energia reativa) ou subexcitado (consome energia reativa) para controlar o FP. Em casos onde não haja a necessidade de utilização de motor é inviável a alocação desse tipo de correção

visto o custo do equipamento e, por mais que adeque à legislação, há o consumo de energia ativa para manter a movimentação do rotor e as perdas no cobre.

2.5.3 Bancos de Capacitores

O método de correção de fator de potência mais comumente utilizado são os bancos de capacitores devido ao seu custo reduzido. Eles operam permutando com as cargas indutivas a energia reativa armazenada por eles. A corrente atrasada é compensada pela corrente adiantada do capacitor. Logo, parte da energia reativa que adivinha da concessionária, agora é fornecida pelos bancos. (ISONI SILVA, 2009)

Podem ser utilizados os bancos fixos, os quais são utilizados para cargas praticamente constantes durante o dia, com uma potência capacitiva de base correspondente à mínima. Já quando a carga é dinâmica, ou seja, varia ao longo do dia, bancos de capacitores automáticos são utilizados, os quais atuam através de controladores para o chaveamento automático dos bancos a medida que o FP varia. (PADILHA FELTRIN, 2017)

2.5.3.1 Bancos fixos

O uso de bancos fixos é o mais simples e econômico, por isso tão amplamente difundido na correção do fator de potência. Podem ser encontrados unidades monofásicas e trifásicas, com tensões nominais baixas usuais de 220, 380, 440, 480, 525, 535, 600, 660, 690 V (WEG, 2001). Os trifásicos já são encontrados com células conectadas entre si e instaladas em invólucros como visto na Figura 4.



Figura 4-Bancos de Capacitores

Fonte: (WEG, 2001)

2.5.3.2 Bancos Automáticos

Os bancos automáticos são geralmente utilizados para correções globais ou por setores de acordo com a demanda instantânea de energia reativa da instalação, que promove o controle dinâmico do fator de potência, visto a inviabilidade de operação manual. (ISONI SILVA, 2009)

Esse controle é feito através de um equipamento eletrônico que monitora os níveis de tensão e corrente do transformador. O controlador apresenta um algoritmo interno capaz de calcular o fator de potência instantâneo e decidir se é necessário a retirada ou inserção dos bancos e quais estágios, os quais já são pré-determinados e de conhecimento do dispositivo. De forma otimizada, esse processo tende a ser cíclico para que haja uma alternância em entre os capacitores para promover a durabilidade dos mesmos. (GRAMINHA BORDIM, 2011)

Entre os bancos chaveados existem os convencionais e os a tiristores.

- Bancos convencionais:

Compostos por capacitores acionados via contatores eletromecânicos, os quais são energizados a partir da decisão do controlador como visto no esquema simplificado da Figura 5. Devem operar ajustados para que sejam chaveados somente quando estiverem descarregados a fim de evitar diferenças de potencial elevadas entre a rede e os bancos. Por causa disso, uma das desvantagens desse tipo de banco é o tempo de retardo nas energizações que limita o tempo de resposta a uma variação mais rápida da demanda de reativo. Existem unidades comerciais cujas faixas para ajuste do tempo de retardo variam de 1 segundo até 1000 segundos. Para efetuar a descarga desses bancos, são utilizados os resistores de descarga. Segundo IEEE (2002), os capacitores devem apresentar dispositivos de descarga capazes de reduzir a tensão residual a 50V em menos de 1 min, considerada a desconexão no instante de pico da tensão nominal de operação.

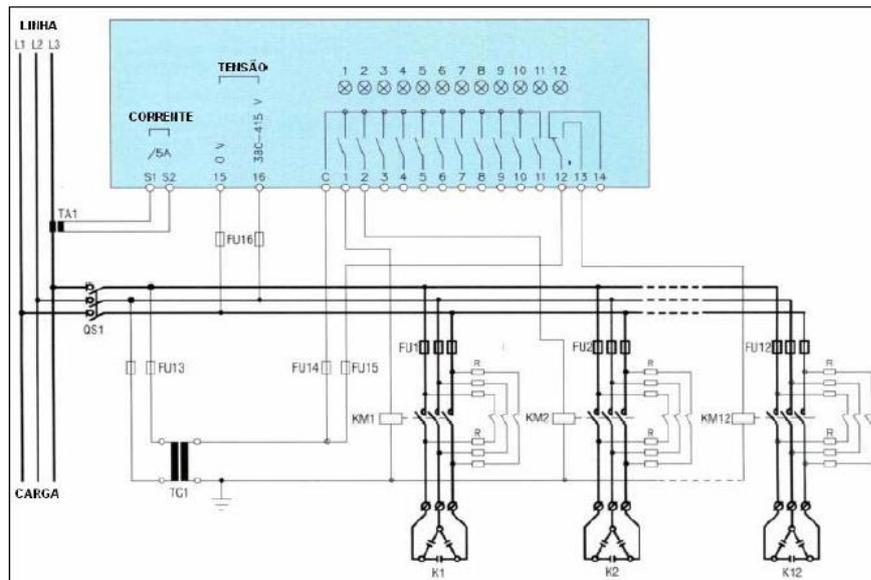


Figura 5- Esquema de ligação de um banco automático convencional

Fonte: (LOVATO ELETRIC DO BRASIL LTDA, 2004)

Outra desvantagem são as correntes *inrush*, que ocorrem na reenergização dos bancos que podem ter efeito similares a curtos-circuitos, chegando a casos extremos de 200 vezes a corrente nominal do capacitor, caso não haja a limitação. Esse tipo de transitório apresenta frequência e amplitude elevadas, que causa surtos de tensão da rede e reduz a vida útil dos componentes do sistema devido ao estresse térmico e eletrodinâmico, aumentando a chance de curtos-circuitos.

Visando a minimização desse fenômeno, foram criados os resistores de pré-inserção, que limitam as correntes de *inrush* a valores bem inferiores. Esse tipo de dispositivo é visto na Figura 6.



Figura 6 - Contadores com resistores de pré-inserção

Fonte: (WEG, 2001)

- Bancos tiristorizados:

Em sistemas de correção dinâmicas, ao invés de contatores eletromecânicos, os acionadores dos capacitores são módulos de potência configurados com tiristores, capazes de chavear os bancos a velocidades muito rápidas a partir dos comandos dados pelo controlador automático com estágios de controle a transistor. Uma configuração genérica deste tipo de dispositivo pode ser vista na Figura 7.

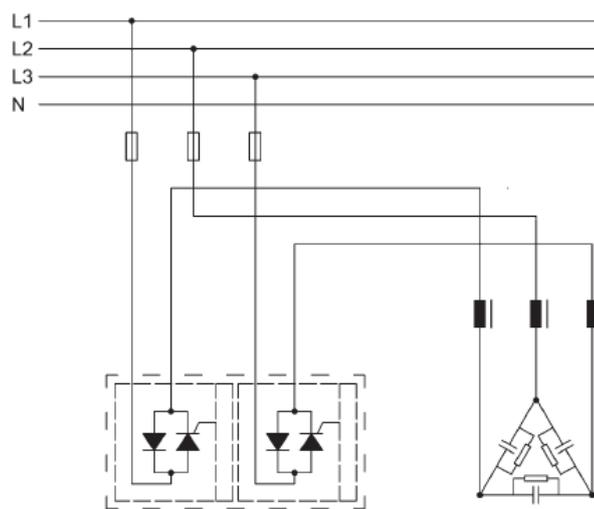


Figura 7- Esquema de um banco trifásico controlado por um módulo a tiristor

Fonte: (HOFMANN, SCHLABBACH e JUST, 2012)

Esse tipo de configuração atua da mesma forma dos sistemas convencionais, captura as informações através de transformadores de corrente (TCs) e sinais da rede e processa no programa interno que muda os estados dos transistores de acordo com a demanda e estes enviam sinais de comando aos tiristores, os quais tem a função de energizar e desenergizar os BCs.

Com relação ao tempo de resposta, os tiristorizados mais rápidos comercialmente disponíveis apresentam tempos muito inferiores aos convencionais. Em aproximadamente 1,5 ciclo de frequência da tensão da rede (25 ms em 60 Hz) eles são capazes de processar as informações, tomar decisão e inserir ou retirar os bancos. (ABB, 2007)

Outra característica vantajosa em relação aos convencionais é a ausência das correntes transitórias pois a energização, por ação do controlador, só ocorre no momento em que não há diferença de potencial entre a rede e os capacitores, esse

método é chamado de “*zero-crossing*” (ISONI SILVA, 2009). Na Figura 8 e 9 podem ser vistos módulos tiristorizados e controladores, respectivamente.

Com relação às desvantagens, pode-se citar o custo, a queda da capacidade de corrente reativa do compensador quando a tensão cai e os tiristores já estão desligados, e a inserção de harmônicos de corrente de baixa ordem no sistema devido ao controle do ângulo de disparo. Essa inserção de harmônicos, no entanto pode ser minimizada com o aumento do número de pulsos. (COSTA, 2007)



Figura 8- Módulo tiristorizado

Fonte: (2006)



Figura 9- Controlador automático

Fonte: (WEG, 2013)

2.6 Tipos de correção do FP

Segundo WEG (2001), existem cinco métodos de compensação de potência reativa:

- **Compensação na entrada da alta tensão:** somente corrige o fator de potência visto pela fornecedora, mas mantém todos os problemas citados na seção 2.2.

- **Compensação na entrada de energia de baixa tensão:** corrige significativamente o fator de potência, utilizado em instalações com cargas de potências diferentes e regimes de utilização não uniformes. Apresenta custo baixo, mas não causa alívio sensível nos circuitos de alimentação de cada equipamento.

- **Compensação localizada:** capacitores são instalados juntos aos equipamentos que necessitam de ajuste de FP. É vantajosa quanto a redução das perdas energéticas em toda a instalação, diminuição da carga dos circuitos alimentadores dos equipamentos, utilização de sistema único de acionamento carga-capacitor e geração de reativo localizada. Porém o seu custo é mais elevado e a manutenção é mais difícil.

- **Compensação por grupos de cargas:** os capacitores são instalados junto ao quadro de distribuição de um conjunto de cargas com potências menores a 10 cv. Apresenta menor custo que a compensação localizada, porém não diminui a corrente dos circuitos de alimentação de cada equipamento.

- **Compensação mista:** considerada do ponto de vista “Conservação de Energia”, a melhor solução, pois abrange a vantagem de cada um dos tipos de correção. Para tal, instala-se capacitores fixos e automáticos no secundário, correção localizada nos motores de mais de 10 cv, por grupos nos menores de 10 cv e redes de iluminação.

2.7 Cuidados a serem tomados

2.7.1 Harmônicas

A questão da presença de harmônicos vem se tornando cada vez mais importante e comentada visto o desenvolvimento de novas tecnologias que utilizam de componentes não lineares, como diodos, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, retificadores e transistores por exemplo, que acabam por distorcer a forma de onda original da rede e inserem harmônicas no sistema elétrico (F. FUCHS e A. S. MASOUM, 2008). As harmônicas apresentam frequência múltipla da frequência nominal e podem ser vistas na Figura 10.

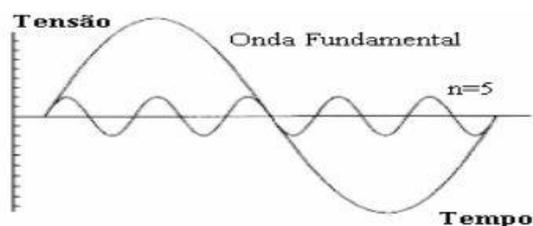


Figura 1: Onda fundamental com sua harmônica n=5 abaixo



Figura 2: Onda resultante da soma da onda da tensão e da harmônica n=5

Figura 10- Harmônicos

Fonte: <http://eletricaesuasduvidas.blogspot.com.br/2010/10/harmonicass.html>

Esse fenômeno, se acentuado, traz diversos problemas para o sistema em geral, pode-se citar a atuação indevida dos dispositivos de proteção, desligamento ou queima de equipamentos, aumento das perdas elétricas e estresse térmico no cabeamento. (F. FUCHS e A. S. MASOUM, 2008)

Com relação à correção do fator de potência, elas influenciam diretamente a inserção dos capacitores no sistema, visto que pela Equação 7, a impedância de qualquer capacitor diminui com a frequência da rede. Com isso, um caminho de baixa impedância é aberto para a circulação de harmônicos e grande parte das correntes harmônicas passem pelo capacitor.

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (10)$$

No qual:

X_C : Impedância capacitiva em ohm;

f : Frequência da rede me Hz;

C : Capacitância em Farad.

Os seus indicadores são o DHT (Distorção Harmônica Total) e o DHI (Distorção Harmônica Individual) e podem ser referentes a corrente ou a tensão, se tornando DHTv ou DHIV e analogamente para o DHI. Indicam o conteúdo harmônico presente na onda distorcida e são calculados da seguinte forma: (F. FUCHS e A. S. MASOUM, 2008)

$$DHT = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} (Y_n)^2}{Y_1}} \cdot 100\% \quad (11)$$

$$DHI = \frac{Y_n}{Y_1} \cdot 100\% \quad (12)$$

Onde:

Y_n : valor eficaz da componente harmônica de ordem “n”;

Y_1 : valor eficaz da componente fundamental;

Segundo WEG (2001), se as cargas não lineares ultrapassarem o valor de 20% da carga total instalada, deve-se verificar através de medições detalhadas a existência de harmônicas presentes na instalação elétrica. Se os valores medidos excederem os limites de 3% para DHIV e 5% para DHTv deve-se instalar indutores de proteção anti-harmônicas com capacitores de tensão nominal de no mínimo 10% acima da tensão da rede.

Os capacitores não são causadores de distorções harmônicas, contudo podem agravar os potenciais problemas das harmônicas, visto o comportamento da reatância em altas frequências como explicitado anteriormente.

2.7.2 Ressonância

Um dos principais problemas é a ressonância, efeito que é caracterizado pela variação não linear da impedância equivalente em certo ponto do circuito, em função de uma frequência presente no sistema. (FRAGOAS, 2008)

A frequência na qual acontece esse fenômeno é chamada de frequência de ressonância para qual as reatâncias indutivas e capacitivas do circuito se equivalem em módulo. Ela pode ser calculada genericamente por:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (12)$$

Sendo:

f_{res} – Frequência em hertz para qual um sistema entra em ressonância;

C – Capacitância em farad;

L – Indutância em henry.

Quando capacitores estáticos de potência são adicionados em um sistema elétrico para a compensação reativa, a frequência de ressonância se aproxima das harmônicas mais comumente vistas, logo poderão existir uma ou mais frequências nas quais os capacitores entrarão em ressonância com as indutâncias do sistema (MILLER, 1982). Elas podem ser classificadas em ressonância paralela ou ressonância série e são vistas na Figura 11.

- **Ressonância série:** ocorre quando as combinações em série das capacitâncias dos bancos e, indutâncias das linhas ou transformadores se igualam e criam um caminho de baixa impedância para as correntes na frequência de ressonância.

- **Ressonância paralela:** ocorre quando a combinação da indutância e capacitância do circuito ressonante está em paralelo com a fonte de tensão. Nesse tipo de ressonância a impedância resultante se eleva a valores extremamente altos, levando a tensão a valores também muito altos e a soma vetorial das correntes é zero.

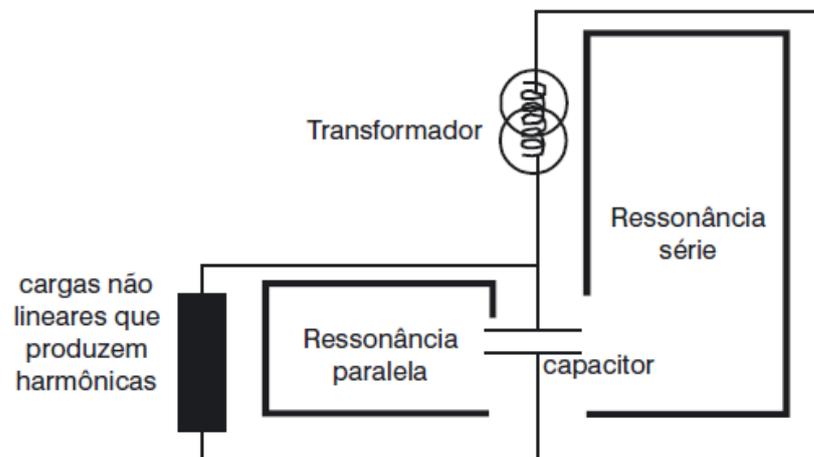


Figura 11- Ressonância série e paralela

Em uma instalação em que se deseja compensar o reativo presente, a frequência de ressonância também pode ser calculada através da Equação 13:

$$f_{res} = f_o \cdot \sqrt{\frac{S_{tr}}{Z \cdot Q_c}} \quad (13)$$

Onde:

f_{res} : frequência de ressonância

f_o : frequência fundamental

S_{tr} : potência aparente do transformador

Z : impedância do transformador

Q_c : potência reativa inserida

Deve-se lembrar que para cada estágio do banco automático, ela deverá ser calculada e se for próxima da frequência de alguma harmônica, indutores anti-harmônica ou mais capacitores deverão ser instalados. (WEG, 2001)

3. Metodologia do projeto

3.1 Dimensionamento dos bancos

Existem duas maneiras de se determinar a energia reativa necessária para o ajuste do fator de potência:

- Método Analítico: é baseado na análise do triângulo das potências. Primeiramente se obtém a potência ativa demandada, que se mantém igual ante e após o ajuste. Com o fator de potência preterido ($\cos \varphi_d$), calcula-se a potência reativa após a correção e, portanto, a potência reativa a ser introduzida é a diferença entre a potência anterior e posterior à correção (PADILHA FELTRIN, 2017). Os cálculos são descritos a seguir.

$$Q_d = S_d \cdot \sin \varphi_d = \frac{P}{\cos \varphi_d} \cdot \sin \varphi_d = P \cdot \tan \varphi_d \quad (13)$$

$$Q_C = Q - Q_d \quad (14)$$

Onde:

Q_d : Potência reativa após a correção;

Q_C : Potencia necessária para correção;

S_d : Potência aparente após a correção;

P: Potencia ativa.

A partir dos valores encontrados, pode-se determinar a capacitância dos capacitores

$$C = \frac{Q_C}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2} \quad (15)$$

Onde:

C: Capacitância do capacitor

Q_C : Potencia necessária para correção;

V_n : Tensão nominal.

- Método Tabular: é um método no qual se utiliza a tabela da Figura 12 com a relação entre os valores dos fatores de potência original e desejado através de um multiplicador que é substituído na Equação 16. (PADILHA FELTRIN, 2017)

$$Q_c = P \cdot \Delta tg \tag{16}$$

Sendo que:

Δtg : o valor encontrado na tabela considerando fator de potência corrigido e original

| Fator de Potência Original (F_{p1}) | Fator de Potência Corrigido - F_{p2} | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0,85 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,89 | 0,90 | 0,91 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1,00 |
| 0,50 | 1,11 | 1,14 | 1,16 | 1,19 | 1,22 | 1,25 | 1,27 | 1,30 | 1,33 | 1,37 | 1,40 | 1,44 | 1,48 | 1,53 | 1,59 | 1,73 |
| 0,51 | 1,07 | 1,09 | 1,12 | 1,14 | 1,17 | 1,20 | 1,23 | 1,26 | 1,29 | 1,32 | 1,36 | 1,39 | 1,43 | 1,48 | 1,54 | 1,69 |
| 0,52 | 1,02 | 1,05 | 1,07 | 1,10 | 1,13 | 1,16 | 1,19 | 1,22 | 1,25 | 1,28 | 1,31 | 1,35 | 1,39 | 1,44 | 1,50 | 1,64 |
| 0,53 | 0,98 | 1,03 | 1,03 | 1,06 | 1,08 | 1,11 | 1,14 | 1,17 | 1,20 | 1,23 | 1,27 | 1,31 | 1,35 | 1,39 | 1,45 | 1,60 |
| 0,54 | 0,94 | 0,96 | 0,99 | 1,02 | 1,04 | 1,07 | 1,10 | 1,13 | 1,16 | 1,19 | 1,23 | 1,26 | 1,31 | 1,35 | 1,42 | 1,56 |
| 0,55 | 0,89 | 0,92 | 0,95 | 0,98 | 1,00 | 1,03 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,15 | 1,19 | 1,22 | 1,26 | 1,31 | 1,37 | 1,52 |
| 0,56 | 0,86 | 0,89 | 0,91 | 0,94 | 0,96 | 0,99 | 1,02 | 1,05 | 1,08 | 1,12 | 1,15 | 1,19 | 1,23 | 1,28 | 1,34 | 1,50 |
| 0,57 | 0,82 | 0,85 | 0,87 | 0,90 | 0,92 | 0,96 | 0,98 | 1,01 | 1,05 | 1,08 | 1,11 | 1,15 | 1,19 | 1,24 | 1,30 | 1,44 |
| 0,58 | 0,78 | 0,81 | 0,84 | 0,86 | 0,89 | 0,92 | 0,95 | 0,98 | 1,01 | 1,04 | 1,07 | 1,11 | 1,15 | 1,20 | 1,26 | 1,40 |
| 0,59 | 0,75 | 0,77 | 0,80 | 0,83 | 0,85 | 0,88 | 0,91 | 0,94 | 0,97 | 1,00 | 1,04 | 1,08 | 1,12 | 1,16 | 1,22 | 1,37 |
| 0,60 | 0,71 | 0,74 | 0,76 | 0,79 | 0,82 | 0,85 | 0,88 | 0,91 | 0,94 | 0,97 | 1,00 | 1,04 | 1,08 | 1,13 | 1,19 | 1,33 |
| 0,61 | 0,68 | 0,70 | 0,73 | 0,74 | 0,78 | 0,81 | 0,84 | 0,87 | 0,90 | 0,93 | 0,97 | 1,00 | 1,05 | 1,09 | 1,15 | 1,30 |
| 0,62 | 0,64 | 0,67 | 0,70 | 0,72 | 0,75 | 0,78 | 0,81 | 0,84 | 0,87 | 0,90 | 0,93 | 0,97 | 1,01 | 1,06 | 1,12 | 1,26 |
| 0,63 | 0,61 | 0,64 | 0,66 | 0,69 | 0,72 | 0,75 | 0,77 | 0,81 | 0,84 | 0,87 | 0,90 | 0,94 | 0,98 | 1,03 | 1,09 | 1,23 |
| 0,64 | 0,58 | 0,61 | 0,63 | 0,66 | 0,68 | 0,72 | 0,74 | 0,77 | 0,80 | 0,84 | 0,87 | 0,91 | 0,95 | 0,99 | 1,06 | 1,20 |
| 0,65 | 0,55 | 0,57 | 0,60 | 0,63 | 0,65 | 0,68 | 0,71 | 0,74 | 0,77 | 0,80 | 0,84 | 0,88 | 0,92 | 0,96 | 1,02 | 1,17 |
| 0,66 | 0,52 | 0,54 | 0,57 | 0,60 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,71 | 0,74 | 0,77 | 0,81 | 0,84 | 0,88 | 0,93 | 0,99 | 1,14 |
| 0,67 | 0,49 | 0,51 | 0,54 | 0,57 | 0,60 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,71 | 0,74 | 0,78 | 0,81 | 0,86 | 0,90 | 0,96 | 1,11 |
| 0,68 | 0,46 | 0,48 | 0,51 | 0,54 | 0,56 | 0,59 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,71 | 0,75 | 0,78 | 0,83 | 0,87 | 0,93 | 1,08 |
| 0,69 | 0,43 | 0,45 | 0,48 | 0,51 | 0,53 | 0,56 | 0,59 | 0,62 | 0,65 | 0,68 | 0,72 | 0,76 | 0,80 | 0,84 | 0,90 | 1,05 |
| 0,70 | 0,40 | 0,43 | 0,45 | 0,48 | 0,51 | 0,53 | 0,56 | 0,59 | 0,62 | 0,66 | 0,69 | 0,73 | 0,77 | 0,82 | 0,88 | 1,02 |
| 0,71 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,51 | 0,53 | 0,56 | 0,60 | 0,63 | 0,66 | 0,70 | 0,74 | 0,79 | 0,85 | 1,00 |
| 0,72 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,54 | 0,54 | 0,57 | 0,60 | 0,63 | 0,67 | 0,71 | 0,76 | 0,82 | 0,96 |
| 0,73 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,39 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,51 | 0,54 | 0,57 | 0,60 | 0,64 | 0,68 | 0,73 | 0,79 | 0,93 |
| 0,74 | 0,30 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,51 | 0,54 | 0,58 | 0,61 | 0,66 | 0,70 | 0,76 | 0,91 |
| 0,75 | 0,26 | 0,29 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,45 | 0,48 | 0,52 | 0,55 | 0,59 | 0,63 | 0,68 | 0,74 | 0,88 |
| 0,76 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,43 | 0,46 | 0,50 | 0,52 | 0,56 | 0,60 | 0,65 | 0,71 | 0,85 |
| 0,77 | 0,21 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,31 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,43 | 0,46 | 0,50 | 0,53 | 0,58 | 0,62 | 0,68 | 0,83 |
| 0,78 | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,32 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,44 | 0,47 | 0,51 | 0,55 | 0,60 | 0,66 | 0,80 |
| 0,79 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,38 | 0,41 | 0,44 | 0,48 | 0,52 | 0,57 | 0,63 | 0,77 |
| 0,80 | 0,13 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,39 | 0,42 | 0,46 | 0,50 | 0,54 | 0,61 | 0,75 |
| 0,81 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,18 | 0,21 | 0,24 | 0,27 | 0,30 | 0,33 | 0,36 | 0,39 | 0,43 | 0,47 | 0,52 | 0,58 | 0,72 |
| 0,82 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,18 | 0,21 | 0,24 | 0,27 | 0,30 | 0,33 | 0,37 | 0,40 | 0,44 | 0,49 | 0,55 | 0,70 |
| 0,83 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,21 | 0,24 | 0,28 | 0,31 | 0,34 | 0,38 | 0,42 | 0,47 | 0,53 | 0,67 |
| 0,84 | 0,02 | 0,05 | 0,08 | 0,10 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,32 | 0,35 | 0,39 | 0,44 | 0,50 | 0,64 |
| 0,85 | 0,00 | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,11 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,29 | 0,33 | 0,37 | 0,41 | 0,47 | 0,62 |
| 0,86 | - | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,08 | 0,11 | 0,13 | 0,16 | 0,20 | 0,23 | 0,26 | 0,30 | 0,34 | 0,39 | 0,45 | 0,59 |
| 0,87 | - | - | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,08 | 0,11 | 0,14 | 0,18 | 0,20 | 0,24 | 0,27 | 0,31 | 0,36 | 0,42 | 0,56 |
| 0,88 | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,11 | 0,15 | 0,18 | 0,21 | 0,25 | 0,29 | 0,34 | 0,39 | 0,54 |
| 0,89 | - | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,05 | 0,08 | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,22 | 0,26 | 0,31 | 0,37 | 0,51 |
| 0,90 | - | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 | 0,15 | 0,19 | 0,23 | 0,28 | 0,34 | 0,48 | |
| 0,91 | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,13 | 0,16 | 0,20 | 0,25 | 0,31 | 0,45 | |
| 0,92 | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,13 | 0,17 | 0,22 | 0,28 | 0,42 | |
| 0,93 | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,10 | 0,14 | 0,19 | 0,25 | 0,39 | |
| 0,94 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,03 | 0,07 | 0,11 | 0,16 | 0,22 | 0,36 | |
| 0,95 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,18 | 0,33 | |
| 0,96 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,04 | 0,09 | 0,15 | 0,29 | |
| 0,97 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,05 | 0,11 | 0,25 | |
| 0,98 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,06 | 0,20 | |
| 0,99 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,00 | 0,14 | |

Figura 12- Tabela do fator multiplicador

Fonte: (PADILHA FELTRIN, 2017)

De acordo com WEG (2001), é recomendado que se o capacitor de cada estágio do banco automático for maior que 25 kVAr (380/440V) ou 15 kVAr (220V), é necessário um reator anti-surto ou resistores de pré-inserção, e que um dos estágios deve ter a metade da potência em kVAr do maior estágio para facilitar o ajuste fino do fator de potência.

3.2 Dimensionamento dos condutores

O dimensionamento dos condutores leva em consideração como base a corrente nominal do banco e estes devem ser superdimensionados em 1,45 vezes a corrente nominal do banco (WEG, 2001). Ou seja,

$$I_c = 1,45 \cdot I_{nb} \quad (17)$$

I_c : Corrente admissível do condutor

I_{nb} : Corrente nominal do banco

Deve-se atentar para as outras condições de instalação como temperatura ambiente, modo de instalação, fator de agrupamento e outras que são descritas na norma NBR 5060. Valores calculados fora dos encontrados comercialmente, adota-se o valor superior mais próximo.

3.3 Dimensionamento dos dispositivos de manobra

Para sistemas automáticos convencionais são utilizados os contatores com resistores de pré-carga, categoria AC-6b, para a limitação das correntes *inrush* como visto na seção 2.4.3.2. WEG (2001) cita que eles variam de potência de algumas dezenas a centenas de watts e chegam a até 2Ω no valor de resistência. Esses valores dependem da tensão e potência dos bancos de capacitores, sendo possível através dos catálogos dos fabricantes a determinação do melhor dispositivo. A corrente nominal do contator deve ser 1,5 vezes a corrente do banco.

Para sistemas tiristorizados, para a determinação do módulo de potência são levados em conta também a tensão do projeto, tensão de alimentação auxiliar, corrente nominal, potência reativa a ser acionada e outros aspectos que são fornecidos pelos fabricantes.

3.4 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

3.4.1 Fusíveis

Devem ser utilizados fusíveis retardados para sistemas convencionais com valor de corrente nominal 1,65 vezes a corrente nominal do banco. Com os valores calculados, verifica-se se eles protegem os cabos contra curtos-circuitos nos trechos onde instalados e se são compatíveis aos fusíveis máximos aplicáveis aos contadores adotados. (ISONI SILVA, 2009)

Nos sistemas dinâmicos (a tiristores), deve -se utilizar fusíveis ultrarrápidos para os circuitos terminais e retardados para os alimentadores gerais dos bancos. Nesse tipo de sistema, a proteção adequada dos tiristores pelos fusíveis ultrarrápidos deve ser verificada.

Segundo WEG (2016), a corrente nominal do fusível ultrarrápido deve ser no mínimo 1,2x maior que a corrente nominal da carga em condições que não ocorram carregamentos cíclicos, como em soft-starter e conversores de frequência. Nestes casos deve-se levar em conta também os valores de redução de corrente para os fusíveis instalados em bases individuais e/ou chaves seccionadoras.

3.4.2 Disjuntores termomagnéticos

Adota-se o primeiro valor comercial acima de 1,5 vezes a corrente nominal do banco e utilizado somente nos convencionais, visto a utilização dos fusíveis ultrarrápidos nos dinâmicos. E assim como com os fusíveis, deve-se verificar a proteção dos cabos contra curto-circuito.

3.4.3 Indutores de dessintonia

Na inserção dos bancos de capacitores, existe a possibilidade de haver o fenômeno da ressonância como explicado na seção 2.6.2. Para evitá-lo, utiliza-se reatores de dessintonia, que são indutores conectados em série com o intuito de desviar a frequência de ressonância para uma abaixo da primeira harmônica presente no sistema, de modo a garantir a integridade da instalação (PERETA, LANDIM e NOGUEIRA, 2009). Devem ser utilizados caso o valor recomendado pela IEEE 519 (1992) de 5% de DHT de tensão esteja sendo ultrapassado ao analisar as medições. (SANTOS, 2013).

O dimensionamento do reator é feito através da relação entre a impedância deste e a do capacitor. Este parâmetro é chamado de fator de dessintonia (p), dado em percentual e é expresso da seguinte forma:

$$p\% = \frac{Z_L}{Z_C} \cdot 100 \quad (19)$$

Onde:

$p\%$: Fator de dessintonia

Z_L : Indutância do reator

Z_C : Indutância do BC

A frequência de dessintonia é calculada através de:

$$f_s = f_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{(p\%/100)}} \quad (20)$$

Onde:

f_s : Frequência de sintonia

f_1 : Frequência nominal

Existem já valores pré-determinados de reatores devido ao conhecimento dos dimensionamentos usuais de BCs comerciais e das harmônicas típicas industriais que são mostrados na Tabela 1: (LUCAS, 2013)

Tabela 1 – Valores de reatores comumente usados

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

A instalação de um reator em série com o banco eleva a tensão permanente no mesmo, logo capacitores sem filtro de dessintonia não podem ser utilizados em sistemas anti-

ressonantes dada uma mesma tensão de rede (SANTOS, 2013). A equação 21 calcula a tensão no capacitor com filtro:

$$U_{cap} \geq \frac{U_{rede}}{1-p\%} \quad (11)$$

Onde:

U_{cap} : Tensão no capacitor (V)

U_{rede} : Tensão da rede (V)

3.5 Controladores automáticos do fator de potência

Os controladores comerciais encontrados hoje em dia disponibilizam 4,6,8,12,14 estágios de controle, com saídas a relés ou a transistores, sendo que marcas disponibilizam a associação dos dois tipos em um único dispositivo.

Uma funcionalidade a ser destacada é a sensibilidade do controlador, a qual influencia a velocidade e/ou frequência de intervenção do controlador dada a menor diferença de potência reativa existente entre estágios. Se a sensibilidade for baixa, o controle é mais refinado e implica em uma regulação mais rápida e um maior número de chaveamentos, se for alta o oposto acontece.

Isoni Silva (2009) explica que alguns fabricantes adotam um índice de ajuste da sensibilidade do processo de correção do FP chamado C/k que representa o degrau mínimo em corrente reativa capacitiva a ser introduzido pelo controlador, calculado por

$$\frac{C}{k} = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U \cdot k_{tc}} \quad (18)$$

Na qual:

U : tensão fase-fase (V);

k_{tc} : relação de transformação do TC;

Q : potência reativa do menor degrau possível para inserção ou retirada (Var)

4. Projeto

4.1 Medições

Os dados do projeto de correção do fator de potência foram realizados no Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO) da Universidade Federal de Viçosa. Esse instituto desenvolve pesquisas na área de biotecnologia para a criação de produtos e processos biotecnológicos. Conta com 27 laboratórios instalados, além de 3 laboratórios associados, e confere uma utilização de aproximadamente 600 usuários. (BIOAGRO, 2014)



Figura 13- BIOAGRO

Fonte: (AMIKY, 2016)

Nesse edifício se encontra 2 transformadores de 500 kVA cada, responsáveis pela alimentação geral do prédio e anexos. Porém, esse trabalho de correção só visa o transformador da instalação principal já que o outro, que alimenta a extensão do prédio não está em plena carga visto o projeto de ampliação ainda não totalmente concluído.

Esse transformador apresenta as seguintes características:

Tabela 2: Características do Trafo

| | |
|--------------------------------|------------|
| Relação de transformação (V) | 13800/220 |
| Potência (kVA) | 500 |
| Impedância (Z%) | 4,57 |
| Frequência (Hz) | 60 |
| Esquema de ligação | Δ/Y |
| Corrente de curto-circuito (A) | 14360 |

Para a realização das medições foi utilizado o Analisador de Qualidade Trifásica Fluke 435, visto na Figura 14, o qual realiza o registro de diversas grandezas previamente programadas. No caso em estudo, foram registrados os valores máximos, médios e mínimos de tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica total de corrente e tensão.

Tendo em vista o tipo de carga da instalação, caracterizada por diversos superfreezers, ar condicionados, estufas, geladeiras, autoclaves e outros aparelhos eletroeletrônicos, foram feitas medições em ambos os semestres letivos com intuito de adequar a proposta de correção da melhor maneira possível, já que a demanda de energia se diferencia de acordo com a época do ano. O aumento da temperatura ambiente influencia diretamente na frequência de utilização e no desempenho dos aparelhos refrigeradores e condicionadores de ar. Aparelhos esses que possuem os compressores elétricos que são cargas indutivas.

A diferença de estação do ano também influencia na utilização das lâmpadas que permanecem ligadas por um maior período de tempo no inverno, no qual os dias são mais curtos e nublados.

Portanto, as medições foram feitas no secundário do Trafo nos meses de maio e outubro com intervalos de medições de 5 min, mas posteriormente calculadas as médias a cada hora, visto que a legislação utiliza esses intervalos de amostragem. A figura 14 mostra a instalação do aparelho no barramento do Quadro de Distribuição de Força (QDF).



Figura 14- Aparelho em medição no barramento

4.2 Resultados

4.2.1 Análise Principal

Primeiramente foi medido a assimetria da instalação para analisar se há desequilíbrio de tensão e assim determinar se a correção poderia ser trifásica ou monofásica. Encontrou-se o seguinte resultado nos dias de medição: 19 a 28 de maio e 20 a 28 de outubro.

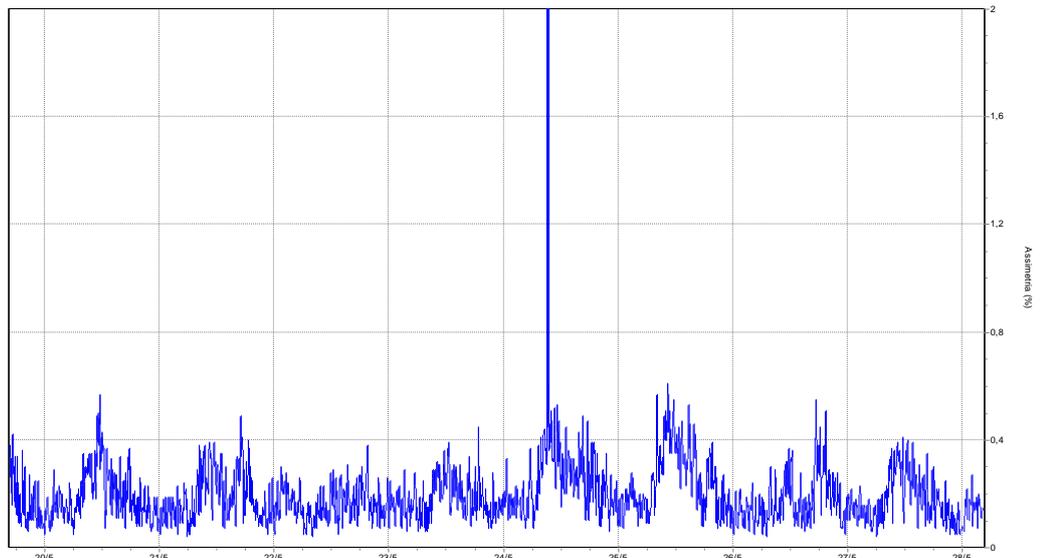


Figura 15- Desequilíbrio de tensão 19 a 28 de maio

Fonte: Medições do *Fluke435*

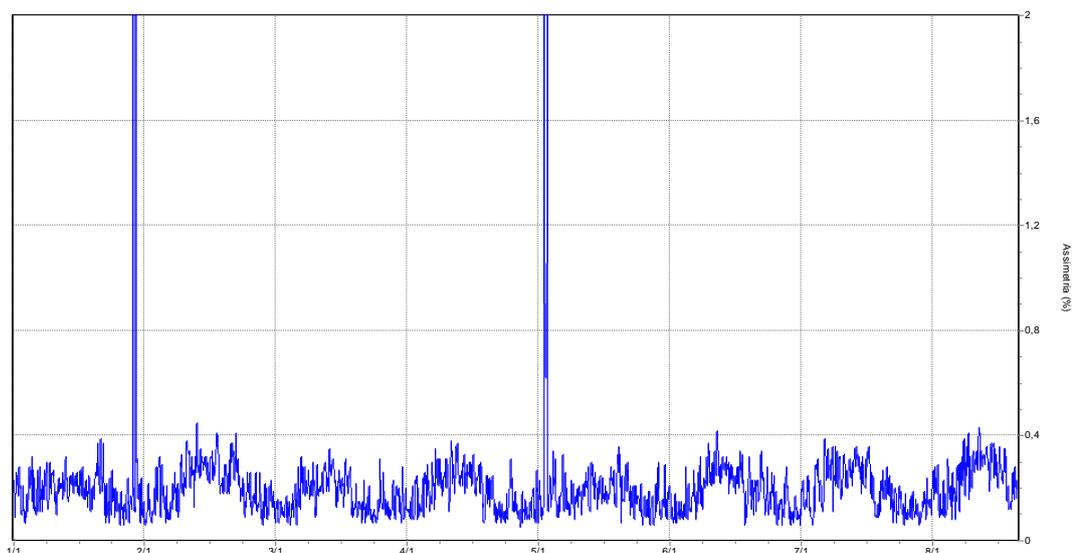


Figura 16- desequilíbrio de tensão dos dias 20 a 28 de outubro

Fonte: Medições do *Fluke435*

Pode-se ver pelos gráficos acima que o sistema apresenta níveis, em sua maioria, abaixo dos 2% recomendado pelo Módulo 8 do PRODIST. Os valores superiores a esse limite são decorrentes dos transitórios causados por queda e retomada da energia do prédio. Logo pode-se fazer a correção através de bancos trifásicos sem a preocupação de danos aos mesmos.

Os próximos gráficos a seguir são referentes ao fator de potência e potências aparentes, ativas e reativas trifásicos medidos do dia 19 ao 28 de maio com os valores médios a cada hora.

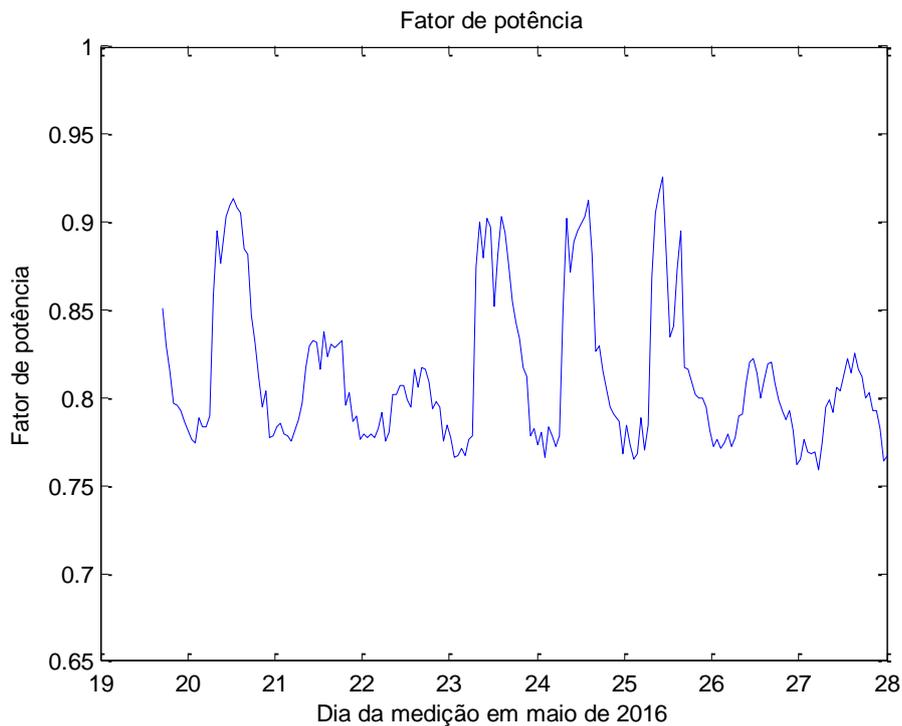


Figura 17- Fator de potência medido (19-28 de maio)

Fonte: Medições do *Fluke435*

Com essas medições, tem-se os valores máximo, médio e mínimo das grandezas vistas tabela a seguir:

Tabela 3- Valores das medições dia 19 a 28 de maio

| Grandeza | Máximo | Médio | Mínimo |
|---------------------|--------|-------|--------|
| FP | 0,93 | 0,81 | 0,76 |
| Pot. Aparente (kVA) | 159,1 | 84,6 | 47 |
| Pot. Ativa (kW) | 143,2 | 69,3 | 38,9 |
| Pot. Reativa (kVAr) | 72,2 | 46,4 | 25,7 |

Para o cálculo da demanda de reativo para a correção do FP foi feito um script na ferramenta computacional, *Matlab*. De posse do programa obteve-se a curva de demanda de

potência reativa para o ajuste do FP para 0,95, visto que é o valor máximo conseguido sem correção e é uma margem para que o valor médio corrigido seja maior que 0,92.



Figura 18- Potência reativa requerida para correção (19-28 de maio)

Fonte: Medições do *Fluke435*

Como resultado obteve-se um valor máximo de 28,4 kVAr, uma média de 23,7 kVAr e o mínimo de 12,1 kVAr. Dessa forma, foi proposto um sistema com 1 estágio fixo de 22,5kVAr que é próximo ao valor médio.

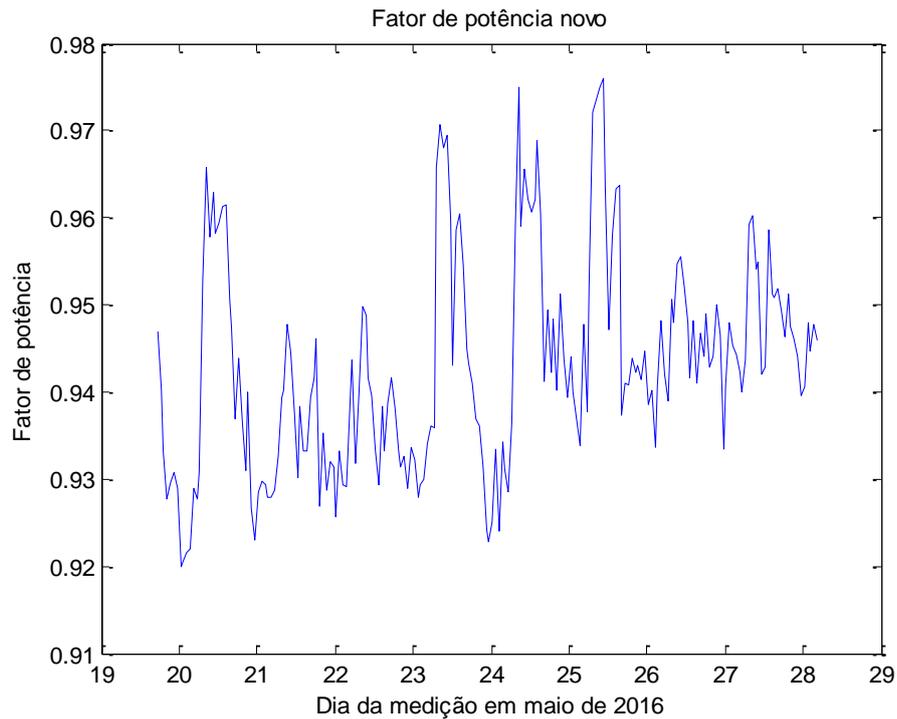


Figura 19- Fator de potência corrigido (19-28 de maio)

Fonte: Medições do *Fluke435*

Pelo gráfico, pode-se ver que o sistema proposto é eficiente e mantém todos os fatores de potência acima de 0,92 com uma média de 0,976, máximo de 0,943 e mínimo de 0,92. Esse ajuste diminui em 13,26% (11,23kVA) na carga média utilizada do transformador e o fator de redução k_{pv} é 25,81%.

De maneira análoga foram coletados os dados do dia 20 a 28 de outubro e geraram os seguintes gráficos e a os valores da Tabela 4:

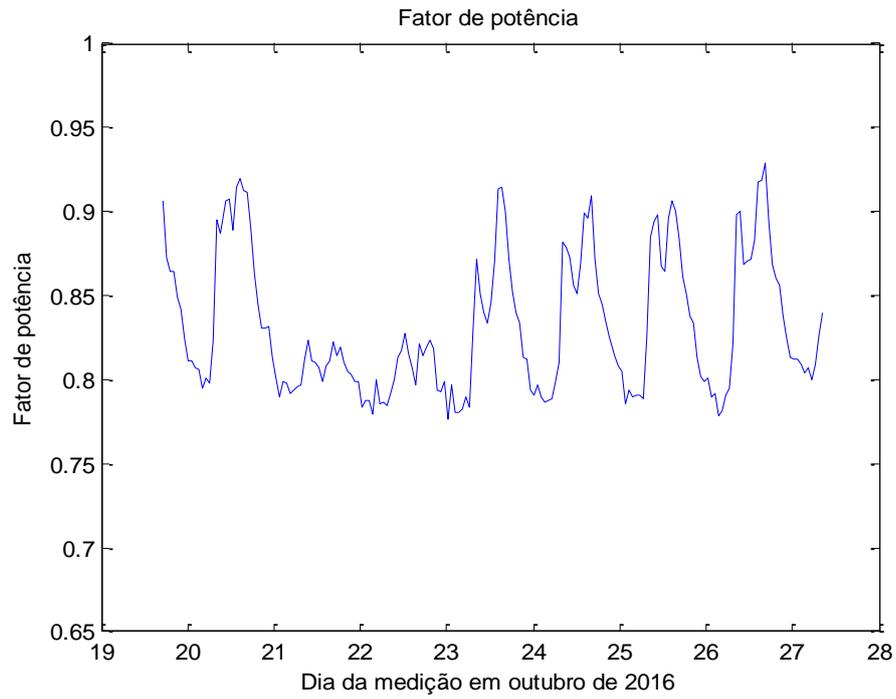


Figura 20-Fator de potência medido (20-28 de outubro)

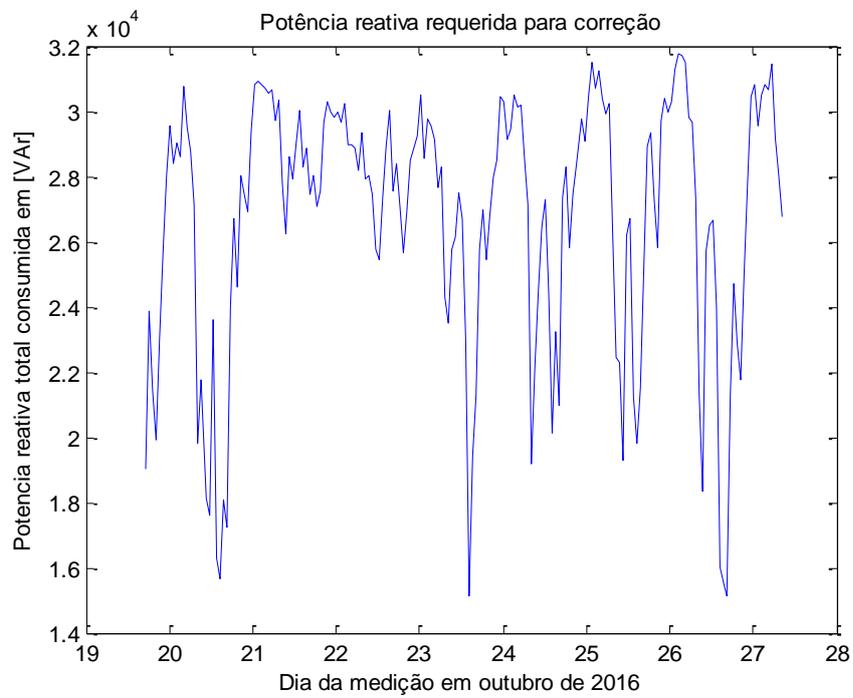
Fonte: Medições do *Fluke435*

Figura 21- Potência reativa requerida (20-28 de outubro)

Fonte: Medições do *Fluke435*

Tabela 4- Valores das medições dia 20 a 28 de outubro

| Grandeza | Máximo | Médio | Mínimo |
|---------------------|--------|--------|--------|
| FP | 0,93 | 0,83 | 0,77 |
| Pot. Aparente (kVA) | 273,5 | 108,16 | 72,6 |
| Pot. Ativa (kW) | 240,0 | 90,78 | 56,0 |
| Pot. Reativa (kVAr) | 131,0 | 56,6 | 41,2 |

A discrepância de certas medições vistas nos gráficos é decorrente de transitórios causados por interrupção e reenergização elétrica da instalação. Mas vê-se a mesma tendência da curva em relação a maio.

Fazendo a comparação com os valores de maio, ouve um significativo aumento no consumo de energia, 71,9% na potência aparente máxima, 27,9% na potência aparente média e 54,5% na potência aparente mínima. O fator de potência não apresentou muita variação com destaque para o valor médio, cujo valor aumentou 0,02 em relação a maio, porém esse valor não era esperado visto a maior utilização dos aparelhos citados na seção 4.1.

Tendo em vista esse comportamento, foi simulado o mesmo sistema de bancos proposto para as medições de maio e o resultado é visto na Figura 22.

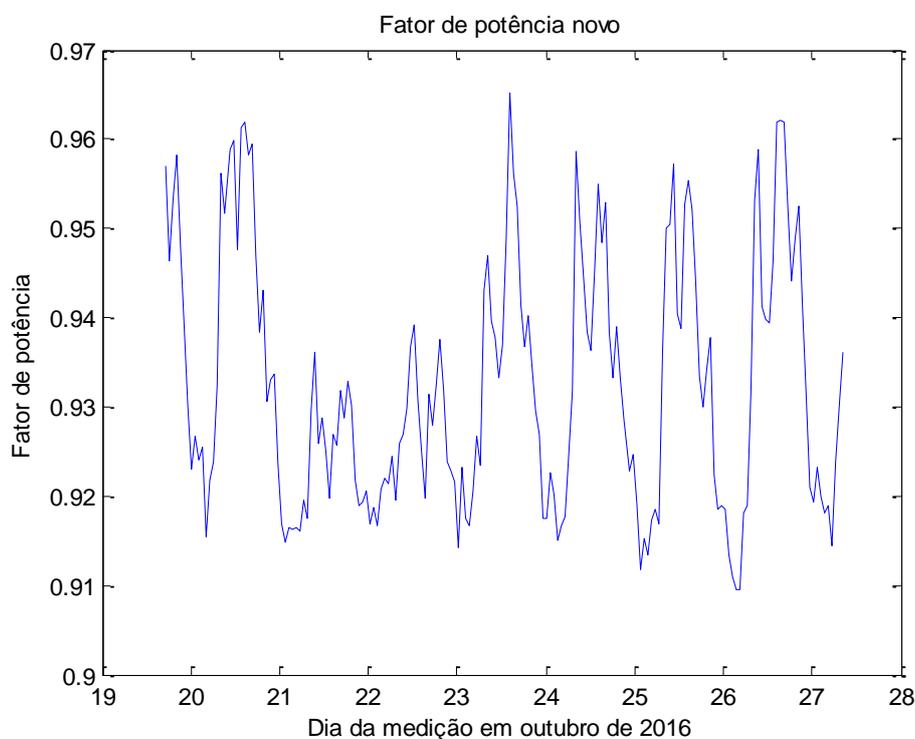


Figura 22- Fator de potência corrigido

Fonte: Autoria própria

Porém o banco não foi capaz de elevar vários pontos ao valor estipulado, o que não o torna 100% eficiente em todos os períodos do ano. Portanto foi proposto um mais um banco de 5kVAr auxiliar o qual entraria em ação através de um sistema automatizado convencional assim que necessário, totalizando um banco de 27,5kVAr. E obteve-se a resposta:

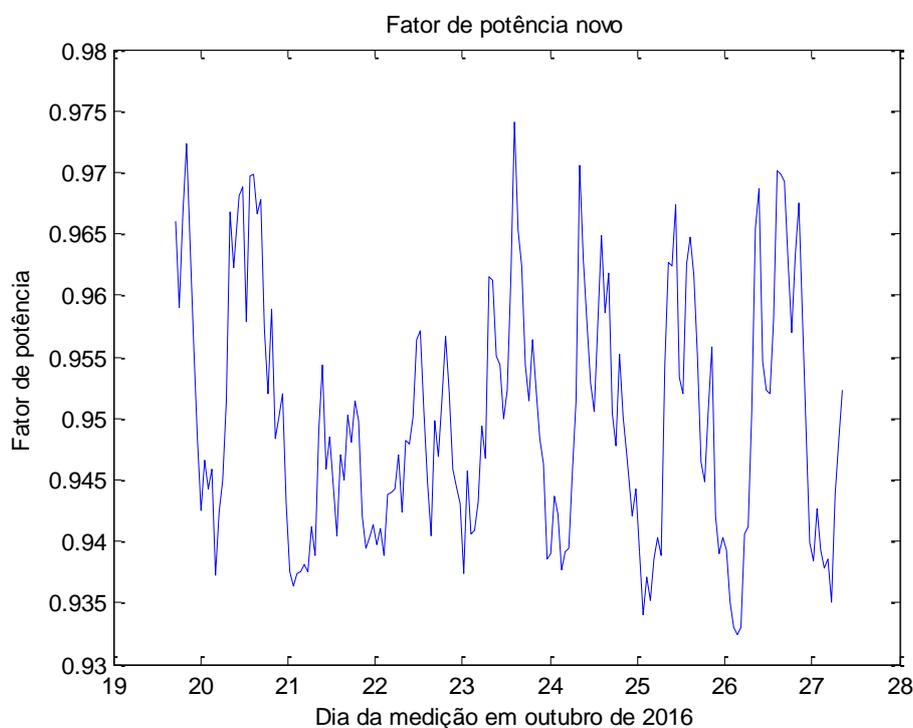


Figura 23- Fator de potência corrigido com 27,5kVAr

Fonte: Autoria própria

Com a adição de 5kVAr a banco anterior, todos os fatores medidos ficaram acima do preconizado, comprovando que o sistema com esses dois bancos é eficaz. Após a correção obteve-se um máximo de 0,97, uma média de 0,95 e mínimo de 0,9325. Em relação à redução do consumo e perdas, os resultados foram 11,82% (12,78kVA) e 23,36% respectivamente.

4.2.2 Análise Secundária

A partir da avaliação da eficácia do BC proposto em ambos os semestres letivos, parte-se agora para a avaliação dos efeitos da introdução desses capacitores na instalação.

Com relação às harmônicas foram coletados os valores de DHTv e DHIV vistos na Figura 24 e 25 estão dentro do valor estabelecido pela norma IEEE 519 (1992), logo não é necessário a inserção de filtro anti-harmônicas.

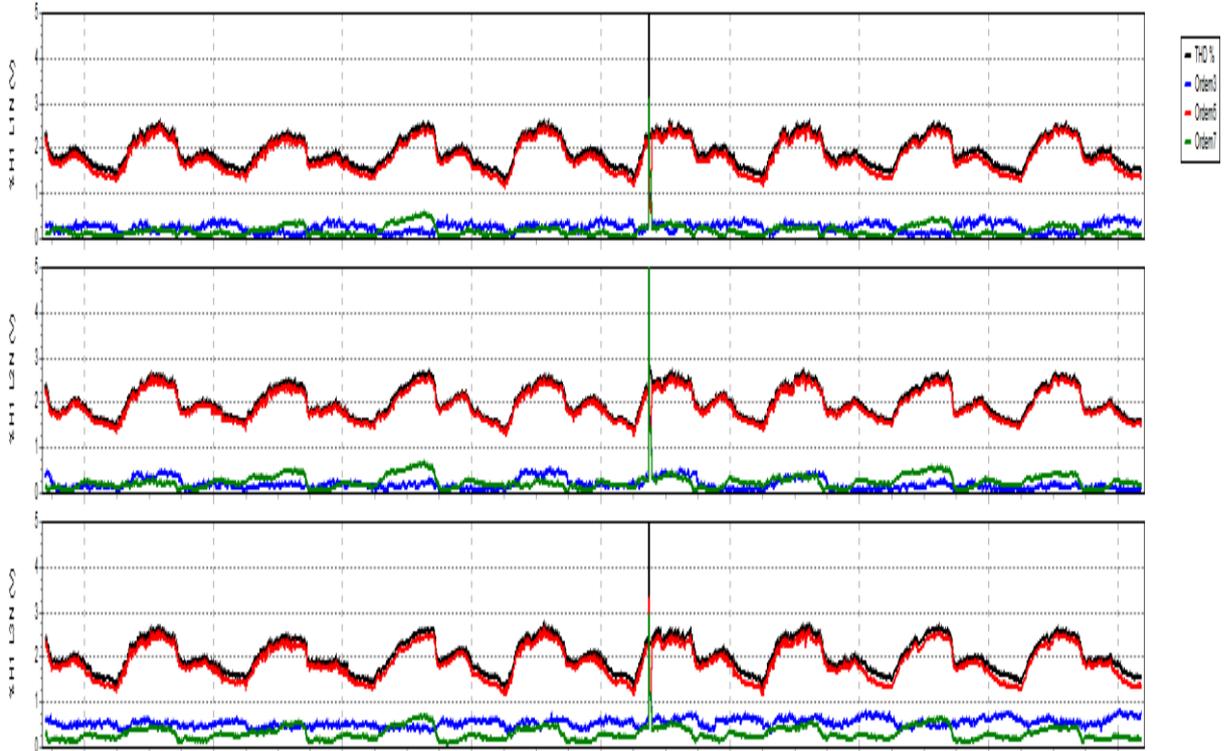


Figura 24- DHT e DHI de tensão (19-28 de maio)

Fonte: Medições do *Fluke435*

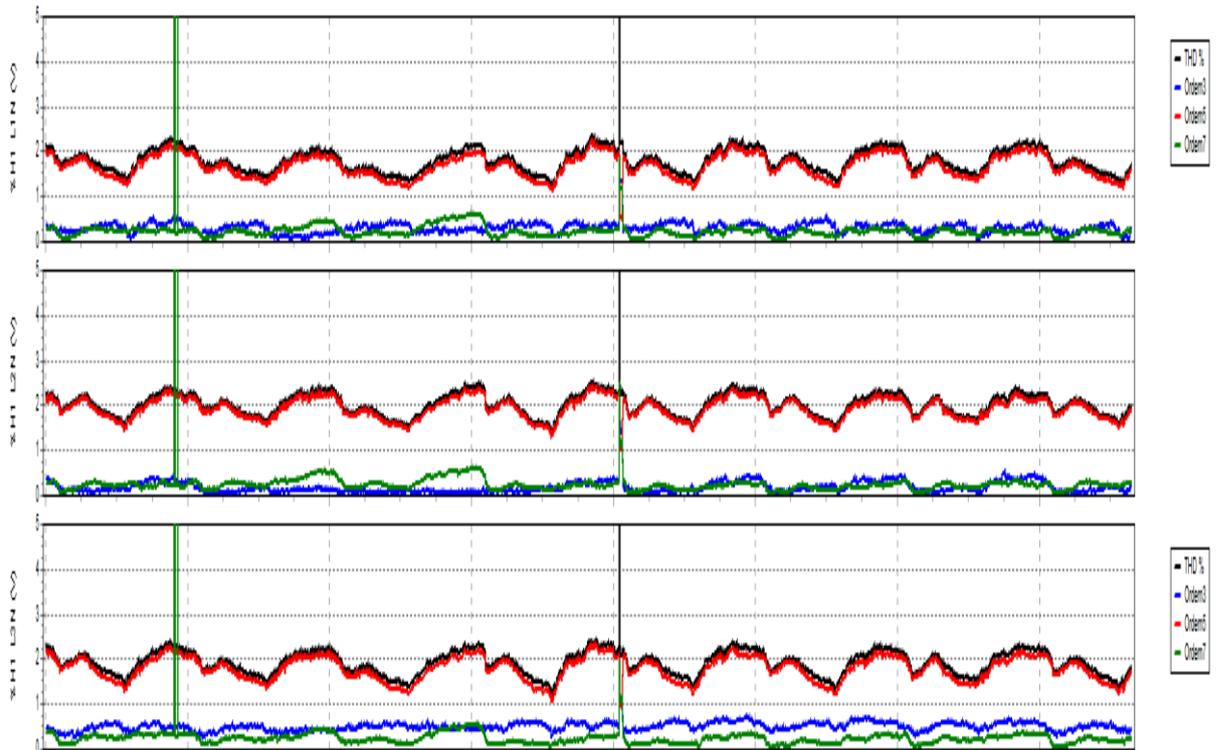


Figura 25- DHT e DHI de tensão (20-28 de outubro)

Fonte: Medições do *Fluke435*

A inserção de cada estágio do banco altera a frequência de ressonância, então a seguir é calculada a frequência das combinações dos estágios e as respectivas frequências de ressonância.

Tabela 5 – Frequências de ressonância da instalação corrigida

| Pot. reativa inserida (kVAr) | Frequência de ressonância (kHz) |
|---------------------------------|------------------------------------|
| 22,5 | 1,32 |
| 27,5 | 1,2 |

De acordo com a tabela das frequências de ressonância da instalação, não há também a necessidade de inserção de um reator de dessintonia, visto que a menor frequência harmônica presente é a 3ª, 180 Hz. A 5ª harmônica (300Hz) é a com maior valor e também está bem abaixo da frequência de ressonância.

Tendo em vista essas características, e escolhendo o módulo convencional pelas vantagens citadas na seção 2.4.3, pode-se agora dimensionar os condutores e os dispositivos de proteção vistos na seção 3 deste trabalho, levando-se em consideração os valores comerciais de bancos, no caso 5 e 22,5 kVAr encontrados em (WEG, 2016b) e (ABNT, 2004). Os detalhes são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensionamentos

| Potência (kVAr) | Tensão nominal (V) | Corrente Nominal (A) | Condutor (mm ²) | Fusível (A) |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------|
| 5 | 220 | 13,1 | 15 | 25 |
| 22,5 | 220 | 59,0 | 35 | 100 |

Quanto a escolha do controlador, (ISONI SILVA, 2009) faz uma tabela resumo dos dispositivos comerciais disponíveis vista na Figura 26. Muitos se encaixam na situação analisada e teria que ser feito um orçamento para verificar o melhor custo benefício

| Controlador | | | Estágios de Controle | | Tempo de conexão (estágios distintos) | Tempos de reconexão (mesmo estágio) |
|-------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|--|---|---|
| Fabricante | Modelo(s) | Sensoriamento | Relés | Transistores | | |
| EPCOS | Série BR-6000 | monofásico | 6 --- 12 --- 6 | --- 6 --- 12 6 | 40 ms (modelos a transistor) 1 s a 1200 s (modelos a relés) | 40 ms (modelos a transistor) 1 s a 1200 s (modelos a relés) |
| | BR-604 | monofásico | 4 | --- | 1 s a 255 s | 1 s a 255 s |
| SCHNEIDER | VARILOGIC | monofásico | 6 12 | --- | 1 s a 600 s (1 s a 900 s p/ modelo NRC12) | 1 s a 600 s (1 s a 900 s p/ modelo NRC12) |
| IMS | SMARTCAP | monofásico ou trifásico | --- | 6 12 | Ajustável (faixa não informada) | Ajustável (faixa não informada) |
| EMBRASUL | CM-4020 | trifásico | 6 12 | --- | 10 s a 120 s | 10 s a 120 s |
| CIRCUTOR | Computer 4er | monofásico | 4 | --- | 10 s (fixo) | 50 s |
| | Computer 6e | | 3,4,5,6 | --- | 4, 10, 30 ou 60 s | 20, 50, 150 e 300 s |
| | Computer 8d | | 8 | --- | 4 s a 999 s | 20 s a 999 s |
| | Computer 14d | | 14 | --- | 4 s a 999 s | 20 s a 999 s |
| | Computer 8df | | -- | 8 | 100 ms a 9,99 s | 100 ms a 9,99 s |
| | Computer 14df | | -- | 14 | 100 ms a 9,99 s | 100 ms a 9,99 s |
| ELSPEC | EQUALIZER ACTIVAR | trifásico | --- | 12 12 | Inferior a 1 ciclo | Inferior a 1 ciclo |
| LOVATO | DCRK | monofásico | 6 8 12 | --- | 5 s a 240 s | 5 s a 240 s |
| BELUK | BLR-CC BLR-CX | monofásico | 3,4 12 | --- | 5 s a 1200 s | 5 s a 1200 s |
| | BLR-CM | | 6 | --- | 3 s a 9999 s | 3 s a 9999 s |
| | | | --- | 6 | | |
| 12 | | | 12 | | | |
| AREVA | NOVAR 315 NOVAR 305 | monofásico | 6 12 | --- | 10, 20, 30, 60, 180, 300, 480 e 600 s | 10, 20, 30, 60, 180, 300, 480 e 600 s |
| JANITZA | PROPHI | monofásico | 3 --- 6 --- 6 12 -- | --- 3 --- 6 6 --- 12 | Inferior a 1 ciclo (modelos a transistor) 0 s a 1200 s (modelos a relés) | Inferior a 1 ciclo (modelos a transistor) 0 s a 1200 s (modelos a relés) |
| VISHAY | EstamatPFC | monofásico | 6 12 | --- | 2 s a 500 s | 20, 60, 180 ou 300 s |

Figura 26- Lista de controladores comerciais

Fonte: (ISONI SILVA, 2009)

5. Conclusão

O presente trabalho teve como meta corrigir o fator de potência do Instituto De Biotecnologia aplicada à Agropecuária (BIOAGRO) da Universidade Federal de Viçosa utilizando um sistema automatizado. Foi exposta a característica de duas possibilidades, os bancos automáticos convencionais e a tiristores. De modo que o primeiro foi escolhido por se encaixar melhor na realidade do sistema.

Além disso, abrangeu os principais fatores a serem considerados na inserção dos bancos juntamente com o dimensionamento dos componentes do sistema. Para uma melhor proposta de correção foram feitas medições em semestres letivos diferentes e foi visto que, apesar do crescente consumo de energia levado pelo aumento da temperatura, os fatores de potência máximo, médio e mínimo não sofreram grandes alterações.

Depois de medições sazonais, foi proposto um banco capacitor fixo de 22,5kVAR e um auxiliar que estrará através de automatização convencional quando houver demanda maior de reativo, no caso mais no segundo semestre letivo. Como resultado, o fator médio de potência foi elevado de 0,81 para 0,94 e de 0,83 para 0,95, uma redução de 13,26% (11,9kVA) e 11,82% (12,3kVA) e fatores de redução de 25,81% e 23,36% em maio e outubro respectivamente.

Após a comprovação da eficácia do sistema, foram dimensionados os condutores, dispositivos de manobra e proteção e os controladores de potência. Há bancos disponíveis já com os resistores pré-carga, sistemas de proteção e afins. Dessa maneira, resta fazer um orçamento para definir o produto com melhor custo benefício.

Mais uma vez mostra-se a importância da adequação do fator de potência em um consumidor, mesmo que em baixa tensão, para a extensão do consumo sem fazer maiores investimentos em transformadores, QDFs e condutores e redução das perdas na instalação.

6. Referências

- ABB. **DYNACOMP®**: The top-class reactive power compensator. Jumeat: ABB, 2007.
- ABNT. Instalações elétricas de baixa tensão. In: , A. **Norma Brasileira**. Rio de Janeiro:
- ABNT, 2004. p. 209.
- AMIKY, L.. **PROPOSTA DE MELHORIA NA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO PRÉDIO DO BIOAGRO**. Viçosa. 2016.
- BIOAGRO. Bioagro: Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária. **Universidade Federal de Viçosa**, 2014. Disponível em: <http://www.bioagro.ufv.br/?page_id=13>.
- DOS SANTOS, P. C. **COMPENSAÇÃO REATIVA DE UMA INDÚSTRIA METALÚRGICA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA**. Curitiba. 2013.
- E. A. **Rhyristor module TSM-HV50**. Germany: EPCOS, 2006.
- F. FUCHS, E.; A. S. MASOUM, M. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. [S.l.]: Academic Press, 2008.
- FRAGOAS, G. **Estudo de Caso do Uso de Bancos Capacitores em uma Rede de Distribuição Primária-Indicativos da sua Viabilidade Econômica**. São Carlos. 2008.
- GRAMINHA BORDIM, R. **Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional**. São Carlos. 2011.
- HOFMANN, W.; SCHLABBACH, J.; JUST, W. **Reactive Power Compensation**. [S.l.]: Wiley, 2012.
- IEEE. **IEEE Std 18-2002: Shunt Power Capacitors**. New York: IEEE, 2002.
- ISONI SILVA, M. C. **Correcao do fator potência de cargas industriais com dinâmica rápida**. Belo Horizonte. 2009.
- LOVATO ELETRIC DO BRASIL LTDA. **Manual de instalacao: DCRK - Controlador Automático de Fator de Potência**. Rio de Janeiro: LOVATO, 2004.
- LUCAS, F. R. **CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS**. Porto Alegre. 2013.

- MILLER, T. J. E. **Reactive Power Control in Electric Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1982.
- PADILHA FELTRIN, A. Instalações Elétricas Industriais. **UNESP**, Ilha Solteira, 26 Janeiro 2017. Disponível em: <www.feis.unesp.br/#!/insteletricasindustriais>.
- PERETA, H. A.; LANDIM, J. P.; NOGUEIRA, R. Filtro de Dessintonia para Bancos de Capacitores. **XI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica**, 2009.
- SACCOL, A. M.; GABIATTI, G.; BONAN, G. Entendendo o Fator de Potência. **www.cp.com.br**, Porto Alegre, 20-? Acesso em: 2017.
- UMANS, S. D.; KINGSLEY JR, C.; FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas com introdução à eletrônica de potência**. [S.l.]: Bookman, 2006.
- WEG. Manual para Correção de Fator de Potência. **www.weg.net**, 2001. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>>.
- WEG. **PFW01**: Controlador Automático do Fator de Potência. Jaraguá do Sul: WEG, 2013.
- WEG. Fusíveis aR e gL/gG Tipo NH Contato Faca, NH Flush End e Diametral. **www.weg.net**, Junho 2016a. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-fusiveis-ar-e-gl-gg-50009817-catalogo-portugues-br.pdf>>.
- WEG. Capacitores para Correção do Fator de Potência. **www.weg.net**, Abril 2016b. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>>.