

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**VALDO RODRIGUES DE OLIVEIRA**

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

**Varginha**

**2016**

**VALDO RODRIGUES DE OLIVEIRA**

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

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Dr. Vinicius Miranda Pacheco.

**Varginha**

**2016**

**VALDO RODRIGES DE OLIVEIRA**  
**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS**  
**INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em:    /    /

---

Prof. Dr. Vinicius Miranda Pacheco

---

Prof. Me. Josué Alexander Aquino

---

Prof. Me. Ivana Prado de Vasconcelos

OBS:

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da força de vontade e a oportunidade, a minha família que estão juntos comigo nessa batalha diária pelo apoio, aos amigos que conheci no decorrer do curso e ao meu orientador Vinicius Miranda Pacheco, professora Luciene pela atenção, dedicação e paciência.

“As dificuldades são o aço estrutural na construção do caráter.”

Carlos D. Andrade

## RESUMO

O seguinte trabalho tem como objetivo principal apresentar a correção de fator de potência de uma carga industrial. O objetivo é demonstrar princípios básicos da correção de fator de potência, demonstrando os ganhos advindos com o ótimo fator de utilização de energia elétrica. Visando aumentar o fator de potência foi feito um levantamento sobre a correção do fator de potência e um estudo de caso utilizando o banco de capacitores.

**Palavras-chave:** Fator de Potência. Cargas Industriais. Banco de capacitores.

## **ABSTRACT**

*The following work is in its present features power factor correction of an industrial load. The aim is to demonstrate the basic principles of power factor correction , showing the gains arising with the optimal utilization factor of electricity. To increase the power factor was made a survey of the correction of the power factor and a case study using the capacitor bank.*

**Keywords:** *Power factor. Industrial load s. Capacitors bank*

## LISTA DE FORMULAS

FÓRMULA 1-  $FP = \frac{P}{S} = \cos\varphi = \cos\left(\arctg\frac{Q}{P}\right)$

FÓRMULA 2-  $Q_{capacitor} = q - [P \cdot \tan(\varphi_2)]$

FÓRMULA 3-  $Q_{capacitor} = [(P \cdot \tan\varphi_1) - (P \tan\varphi_2)]$

FÓRMULA 4-  $P \cdot [\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2] = P \cdot [\tan(\cos^{-1}(FP_1)) - \tan(\cos^{-1}(FP_2))]$

FÓRMULA 5-  $REDUÇÃO DAS PERDAS(\%) = \left(1 - \frac{FP_i^2}{FP_f^2}\right) \cdot 100$

FÓRMULA 6-  $\Delta V\% = \frac{(P_C \cdot X_L \cdot L)}{10 \cdot V^2}$

FÓRMULA 7-  $Q_{MÁX} = \sqrt{3} \cdot V_{N,MOTOR} \cdot I_{MAG,MOTOR}$

FÓRMULA 8-  $I_{MAG,MOTOR} = 20\% \cdot I_{N,MOTOR}$

FÓRMULA 9-  $S_3\varphi = 3V_f \cdot I_f$

FÓRMULA 10-  $V_f = \frac{\sqrt{V_L}}{3}$

FÓRMULA 11-  $F_p = \cos\theta = \frac{P}{S_3\varphi}$

FÓRMULA 13-  $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

FÓRMULA 14-  $Q = S_3\varphi \sin\theta$

FÓRMULA 15-  $S_3\varphi = \sqrt{P^2 + Q^2}$

FÓRMULA 16-  $I = \frac{S_3\varphi}{3 \cdot V_f}$

FÓRMULA 17-  $I_{NC} = \frac{POTÊNCIA REATIVA(kVar) \cdot 1000}{3 \cdot V_{FF}}$

FÓRMULA 18-  $I_{NF} = I_{NC} \cdot 1,65$

FÓRMULA 19-  $Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot c}$

FÓRMULA 20-  $P\% = \frac{Z_L}{Z_C} \cdot 0,07$

FÓRMULA 21-  $U_C = \frac{V_L}{(1 - P\%)}$

FÓRMULA 22-  $Z = -jZ_C + jZ_L$

FÓRMULA 23-  $Q = \frac{U^2}{Z}$



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 FATOR DE POTÊNCIA.....</b>	<b>12</b>
2.1 Baixo fator de potência.....	14
2.2 Perdas na rede.....	15
2.3 Quedas de tensão .....	15
2.4 Subutilização da capacidade instalada .....	16
2.4.1 Considerações de possibilidades de correção do fp.....	17
2.5 Benefícios extras vindos da utilização de banco de capacitores .....	19
<b>3 CAPACITORES .....</b>	<b>21</b>
3.1 Banco de capacitores .....	21
3.2 Banco de capacitores automático .....	23
3.3 Bancos de capacitores fixos.....	24
3.4 Banco de capacitores semiautomáticos.....	25
<b>4 INSTALAÇÃO, LOCALIZAÇÃO E RECOMENDAÇÕES DO BANCO DE CAPACITORES .....</b>	<b>26</b>
4.1 Localização dos capacitores.....	26
4.2 Instalação junto a motores.....	26
4.3 Instalação junto a transformadores para compensação em vazio .....	28
<b>5 BREVE VISÃO DA LEGISLAÇÃO .....</b>	<b>31</b>
5.1 Legislação .....	32
5.2 Legislação atual .....	34
<b>6 ESTUDOS DE CASO.....</b>	<b>35</b>
6.1 Harmônicas .....	41
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento da sociedade, a energia elétrica (EE) desde sua descoberta e o aprendizado de seu manuseio, ocupa lugar de destaque no cotidiano das pessoas, tendo em vista que hoje a sociedade depende dessa energia para garantir sua qualidade de vida e do progresso contínuo com desenvolvimento que a energia nos proporciona.

Com o aumento descontrolado da população acarretando o aumento do consumo de energia elétrica baseado nas bibliografias pode-se entender que a energia veio a se tornar um produto de comercialização, e com isso o rigor da fiscalização pela sua qualidade na área de distribuição de energia, torna-se cada vez mais intenso sendo essa fiscalização procedente do órgão máximo relacionado a energia elétrica a Agência nacional de energia elétrica(ANEEL, 2016; BORDIM,2011).

A necessidade de uma boa energia elétrica entregue aos consumidores veio junto com as primeiras experiências comerciais relacionadas ao sistema elétrico de potência, (conjunto que engloba a geração, transmissão e a distribuição de energia), no século XIX. No Brasil no ano de 1934 estabeleciam, em seu Código de Águas, os primeiros indicadores de controle sobre esta qualidade.

Durante muito tempo a preocupação era única e exclusivamente em minimizar o tempo de interrupção, com o decorrer das décadas de 1970 e 1980, começam a ser implantados estudos de distorções harmônicas e cintilação luminosa (mais conhecida como flicker). A partir daí começam a ser discutida pelo setor elétrico nacional, resultando em uma série de procedimentos criados pelas concessionárias visando aos atendimentos de novas cargas isso tudo, porém sem se estabelecer uma legislação específica sobre o assunto.

Apenas no final da década de 1990 a legislação começou a tomar forma, sendo criada pela recém ANEEL (Agência nacional de Energia elétrica) , o Grupo de Trabalho especial-QEE (qualidade de energia elétrica), sendo controlado pela ONS ( Operador Nacional do Sistema elétrico) e sendo ele formado por agentes, universidades, consumidores, etc. O resultado foi o documento Procedimentos de Redes, segundo ANNEEL pela sua resolução de 791/02 de 24/12/2002, tem a finalidade coordenar as ações da ONS visando ampliações e reforçando a Rede Básica, bem como fornecer meios de subsidiar a coordenação de acesso ao

sistema de transmissão; criar estudos para o planejamento e programação da operação tal qual fazer a própria operação em tempo real do sistema de transmissão.

A Rede Básica é formada pelas instalações de tensão igual ou maior que 230KV, incluindo algumas linhas de 138 KV, e constitui a principal ligação do sistema elétrico, pois leva a energia gerada direto para os centros de distribuições.

A qualidade de energia elétrica junta uma série de antigos e novos conceitos utilizados em engenharia elétrica. Por exemplo, na atualidade os equipamentos elétricos mais sensíveis a variações de QEE do que equipamentos de modelos mais antigos. Muitos desses equipamentos possuem controles de microprocessadores e equipamentos de eletrônica de potência, sensíveis a maioria dos distúrbios.

Uma maior consciência por parte da maioria dos consumidores sobre a qualidade de energia faz crescer a demanda de informações a respeito de informações relativas a respeito de interrupções, afundamentos de tensão, harmônicos e transitórios.

## 2 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência é uma unidade de medida relacionada ao índice de utilização de energia elétrica. É extremamente importante, não apenas sob o ponto de vista eletroenergético, mas também, pelo fato de ser monitorado pelos sistemas de medição das concessionárias, podendo incorrer em ônus (muitas vezes significativos) nas contas de energia elétrica (SILVA, 2009).

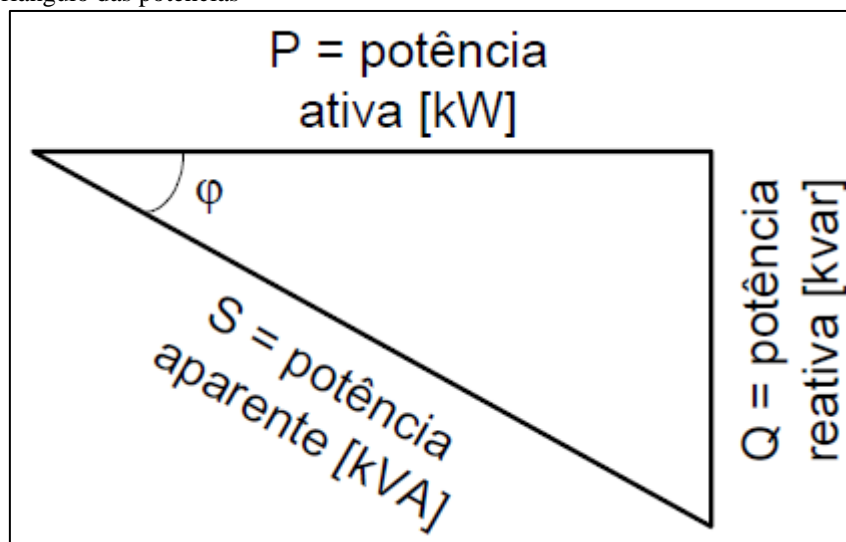
Sendo a maioria das cargas consumidoras de potência reativa indutiva, pois as mesmas contêm elementos que necessitam de campo magnético para seu funcionamento, sendo eles motores, transformadores, lâmpadas de descarga, fornos de indução e etc. A sua operação também depende outra grandeza, a potência ativa. Que aqui neste trabalho baseando-se nas bibliografias está sendo simbolizada pela letra P (BORDIM, 2011).

A potência ativa é a potência efetiva, é aquela que realmente gera trabalho. A sua unidade de medida é o watt(W). Para tensão e corrente senoidais, a potência ativa é a parte ativa ou a parte real da potência complexa. Já para tensão e corrente periódicas não senoidais, a potência ativa é a soma das potências dos componentes contínuos das potências ativas, dos componentes fundamentais e dos harmônicos (BORDIM, 2011).

Já a potência reativa que baseado nas bibliografias aqui presente está sendo representada pela letra Q, é a potência usada exclusivamente para ajudar a gerar e a manter os campos magnéticos nas cargas indutivas. Sua unidade de medida é o volt ampère reativo (Var). Sendo assim enquanto a potência ativa é consumida na geração de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho algum, percorre um ciclo entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia estar sendo utilizado para passagem de mais energia ativa (EDIMINISTER, 2001).

A potência total ou potência aparente aqui representada pela letra S, sua medida volt-ampère (VA). Pode-se entender que a potência aparente é o produto dos valores eficazes da tensão e da corrente. As três potências (ativa, reativa e aparente) podem ser representadas de várias maneiras, uma delas é a representação do triângulo das potências. Onde através de um triângulo retângulo, seus catetos representam a energia ativa e a energia reativa, sendo a potência aparente representada pela hipotenusa. Podemos ver essa representação na figura 1.

Figura 1: Triângulo das potências



Fonte: Fonseca, 2000.

O ângulo que se forma entre a potência total e a potência ativa, é representada pelo ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, ou também, o ângulo de fase, sendo que este ângulo vai variar em função do tipo da carga que está sendo alimentada (BORDIM, 2011).

Veremos na equação 1 a fórmula do fator de potência.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\varphi = \cos\left(\arctg\frac{Q}{P}\right) \quad (1)$$

Pode-se definir o fator de potência como sendo a relação entre potência ativa e a potência aparente. Já em um circuito puramente senoidal, entende-se que o fator de potência é igual ao  $\cos$  do ângulo entre a tensão e a corrente eficaz, e ou ainda, que utilizando o triângulo das potências obtemos mais uma forma de solução em que o cosseno do arco tangente (ou tangente inversa em algumas bibliografias) da divisão entre potência reativa e potência ativa (BORDIM, 2011).

Em um circuito onde à presença de harmônicos na rede, devem ser levar em consideração os valores dos componentes fundamentais e dos harmônicos para determinação da potência e conseqüentemente do valor do fator de potência.

O fator de potência indica uma porcentagem de potência aparente fornecida (VA) que é efetivamente transformada em potência ativa (W). Sendo assim o fator de potência nos mostra o grau de eficiência do uso de um sistema elétrico. Valores com elevado fator de potência, próximo do valor unitário indicam o uso eficiente da energia elétrica, enquanto que

valores baixos evidenciam seu mau aproveitamento, além de representar um aumento indevido de carga no sistema (DUAILIBE, 2000).

## 2.1 Baixo fator de potência

Valores baixos de fator de potência são ocasionados por valores elevados de energia reativa indutiva. Essa condição resulta em aumento na corrente total que circula nas redes de distribuição das concessionárias e das cargas consumidoras, podendo acarretar problemas de sobrecarga em subestações, nas linhas de transmissão e distribuição, prejudicando a estabilidade do sistema e da eficácia dos sistemas elétricos, ocasionando transtornos diversos como: aumento das perdas elétricas na instalação, quedas de tensão e a subutilização da capacidade instalada (WEG industrias S.A, 2001; SILVA, 2009).

Na maioria dos casos o baixo fator de potência é causado por:

- a) Presença predominante de motores elétricos de indução (e de máquinas de solda do tipo motor-gerador), fundamentalmente os de baixas e médias potências, equipamentos que, mesmo operando à plena carga, em geral não atendem ao fator de potência de referência (0,92) exigido pela legislação;
- b) Presença de motores elétricos operando em vazio ou com baixas condições de carregamento, situações agravantes que reduzem drasticamente seus fatores de potência operacionais;
- c) Presença de máquinas de solda do tipo transformador-retificador, principalmente quando existentes em maior número e com elevadas jornadas de funcionamento diário;
- d) Presença de tensão elétrica elevada (nos equipamentos com princípios de funcionamento baseados na geração de campos magnéticos, a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão aplicada);
- e) Presença de reatores de sistemas de iluminação de descarga sem correção individual incorporada, por não atenderem ao fator de potência de referência (0,92);
- f) Existência de transformadores operando em vazio ou com baixas condições de carga por longos períodos, uma vez que a potência reativa necessária para a manutenção do fluxo magnético interno permanece inalterada desde que mantido o nível da tensão de alimentação;
- g) Operação de fornos a indução e fornos a arco;

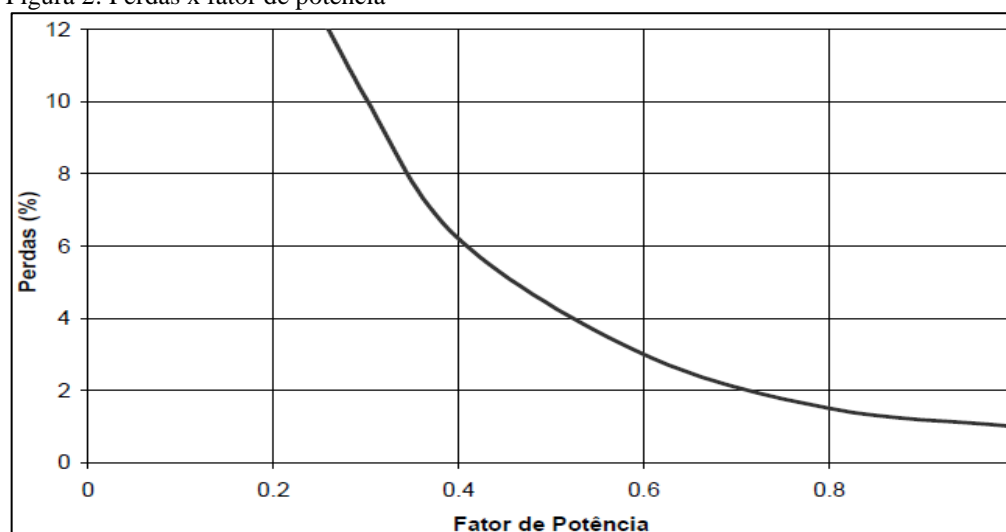
h) No caso dos consumidores com monitoramento horário do fp: excesso de capacitores em operação no período geralmente compreendido entre 0:00 e 6:00 horas da manhã. (SILVA, 2009).

Outros problemas, mas em instalações onde já existe o banco de capacitores são: capacitores fora de operação, já degradados, com proteções queimadas ou atuadas, com dispositivos de controle ajustados inadequadamente (SILVA, 2009).

## 2.2 Perdas na rede

Perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total. Devido a essa corrente crescer com o aumento da energia reativa (VAR), estabelece-se uma relação direta entre o incremento das perdas e o baixo fator de potência, provocando o aumento do aquecimento dos condutores dos equipamentos. Podemos ver este processo de perdas na figura 2 (DUAILIBE, 2000).

Figura 2: Perdas x fator de potência



Fonte: Fonseca, 2000.

## 2.3 Quedas de tensão

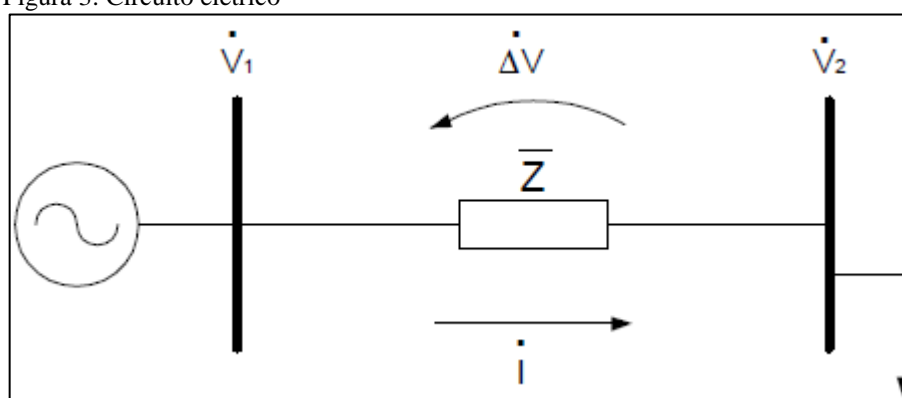
A elevação da corrente devido ao excesso de reativo leva a quedas de tensão acentuadas, podendo ocasionar a interrupção do fornecimento de energia e a sobrecarga em certos elementos da rede gerando prejuízos econômicos e de operação. Esse risco é

acentuado nos quais a rede é solicitada em excesso, mais conhecido como horário de ponta (DUAILIBE, 2011).

Embora os capacitores tenha a função de elevar a tensão, não é de modo geral economicamente viável sua instalação exclusivamente para este fim. A melhoria dos níveis de tensão deve ser vista como um benefício adicional aos capacitores (DUAILIBE, 2011).

Na figura 3 podemos ver o exemplo de um circuito elétrico onde a tensão num ponto de um circuito elétrico pode ser calculada da seguinte maneira.

Figura 3: Circuito elétrico



Fonte: Fonseca, 2000.

Ou seja:

$$V_2 = V_1 - \Delta V$$

$$\Rightarrow \Delta V = Z \cdot I$$

Analisando o circuito e as fórmulas, fica claro que quanto maior a queda de tensão em  $\Delta V$ , menor será a tensão entregue a carga.

Com a utilização de capacitores e a melhoria do fator de potência, a corrente equivalente no circuito diminui, reduzindo também a queda de tensão na linha, melhorando o nível de tensão a carga (DUAILIBE, 2000).

## 2.4 Subutilização da capacidade instalada

Ao sobrecarregar um sistema a energia reativa, inviabiliza sua plena utilização, ocasionado o condicionamento da instalação de novas cargas e investimentos que poderiam ser evitados se o fator de potência apresenta-se valores mais elevados. O lugar ocupado pela



energia reativa poderia ser então utilizado para o atendimento de novas cargas (WEG indústrias S.A, 2001).

Os altos valores de investimentos em ampliação das instalações estão relacionados principalmente aos transformadores e condutores necessários. O transformador a ser colocado deve atender a potência total dos equipamentos, mas devido a energia reativa presente no sistema, o mesmo deve ser dimensionado tomando como base a potência aparente das instalações (BORDIM, 2011).

O custo e manutenção dos sistemas de proteção, controle e comando dos equipamentos também se elevam com o aumento de energia reativa, desta maneira, para transferir a mesma potência ativa, a seção dos condutores deve aumentar á medida que o fator de potência decresce. A correção do fator de potência por si só já libera capacidade para novas cargas, sem ser necessário o investimento em transformadores ou a substituição dos condutores para este fim (WEG indústrias S.A, 2001).

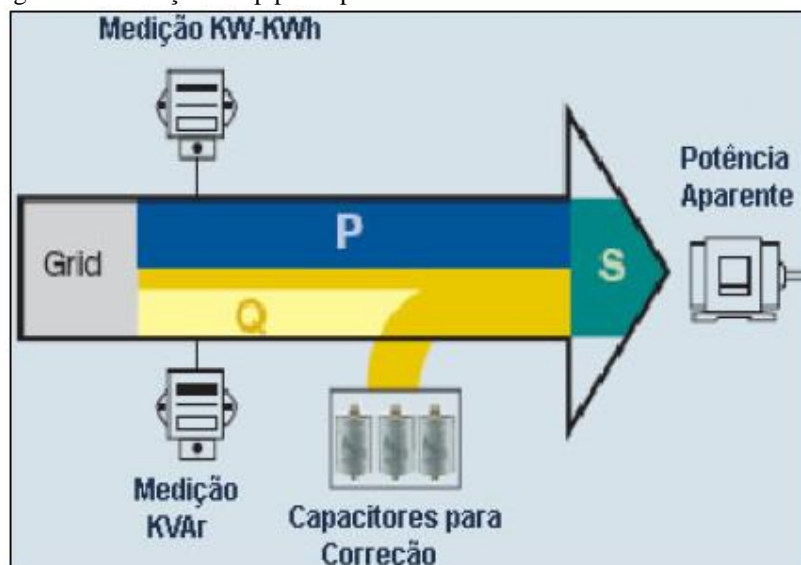
#### **2.4.1 Considerações de possibilidades de correção do fp**

Existem três tipos de correção de fator de potência, são elas (CEMIG, 2016) :

- a) Aumento do consumo de energia ativa;
- b) Utilização de motores síncronos superexcitados; e
- c) Utilização de capacitores. (CEMIG, 2016)

Podemos ver na figura 4 a utilização de capacitores.

Figura 4 – Correção do fp por capacitores



Fonte: (EPCOS(1), 2007)

Na prática, pode-se considerar que esse é o único método efetivamente utilizado tendo como objetivo principal a correção do fp; capacitores estáticos são equipamentos de custo relativamente baixo, dimensões reduzidas, fácil instalação e que operam permutando a energia reativa, por eles acumulada, com as cargas indutivas presentes; parte da energia reativa (ou toda ela) originalmente fornecida pela concessionária, passa a ser fornecida pelos bancos de capacitores. Em linhas gerais, para a correção do fp por capacitores, calcula-se a potência capacitiva necessária por meio das seguintes expressões. (SILVA, 2009, p.37).

$$Q_{\text{capacitor}} = q - [P \cdot \tan(\varphi_2)] \quad (2)$$

$$Q_{\text{capacitor}} = [(P \cdot \tan \varphi_1) - (P \tan \varphi_2)] \quad (3)$$

$$P \cdot [\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2] = P \cdot [\tan(\cos^{-1}(FP1)) - \tan(\cos^{-1}(FP2))] \quad (4)$$

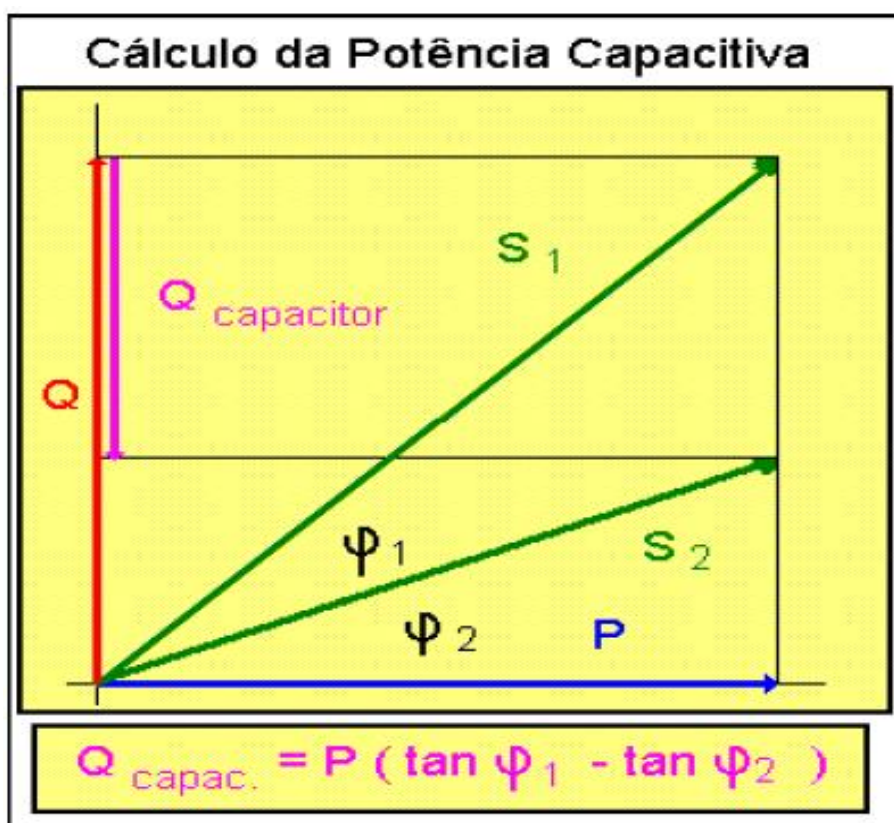
Onde as constantes são:

- $Q_{\text{CAPACITOR}}$  = potência necessária em capacitores (kVAr);
- $P$  = potência ativa demandada pela carga (kW);
- $Q$  = potência reativa indutiva demandada pela carga (kVAr);
- $\varphi 1$  = ângulo relativo ao fator de potência antes da correção;
- $\varphi 2$  = ângulo relativo ao fator de potência requerido após a correção;
- $FP1$  = fator de potência antes da correção;

- $FP2$  = fator de potência requerido após a correção.

Na figura 5 pode-se perceber e compreender o conteúdo das expressões 2 até 4 e a alteração no “triângulo de potências” em decorrência de injeção da potência reativa capacitiva(SILVA, 2009).

Figura 5: O triângulo de potências e a correção do fp



Fonte: (SILVA, 2009, p.36)

## 2.5 Benefícios extras vindos da utilização de banco de capacitores

Benefícios adicionais da correção de fator de potência. (MAMEDE, 1993; SILVA, 2009):

- A liberação da capacidade de transformadores, em decorrência de menor circulação de correntes de origem reativa e, conseqüentemente, em decorrência da redução dos kVAs associados às parcelas adicionais de potência reativa suprida para as cargas;

- Pelo mesmo motivo, a liberação da capacidade dos circuitos de distribuição geral e parcial, com a conseqüente redução das perdas de energia em condutores (a redução de perdas pode ser calculada percentualmente para uma determinada carga e uma dada potência capacitiva em operação (SILVA, 2009).

Na equação 5 podemos ver como é feito o calculo de perdas.

$$REDUÇÃO DAS PERDAS(\%) = \left(1 - \frac{FPi^2}{FPf^2}\right) \cdot 100 \quad (5)$$

Onde as constantes são:

- $FPi$  = fator de potência inicial (antes da correção); e
- $FPf$  = fator de potência final (após a correção).

A melhoria de níveis de tensão no ponto de instalação do banco de capacitores; mas na prática, o percentual de elevação na tensão é relativamente à tensão na origem (geralmente o transformador ) pode ser calculado pela seguinte expressão . Equação 5, tensão na origem.

$$\Delta V\% = \frac{(Pc \cdot XL \cdot L)}{10 \cdot V^2} \quad (6)$$

Onde as variáveis são:

- $\Delta V\%$  = elevação percentual da tensão no ponto de instalação do banco de capacitores;
- $Pc$  = potência capacitiva em operação (kVAr);
- $XL$  = reatância indutiva unitária dos circuitos entre a origem e o banco (ohms/km);
- $L$  = comprimento dos circuitos entre a origem e o banco (km); e
- $V$  = tensão fase-fase (kV) na origem.

### 3 CAPACITORES

É um componente que armazena carga elétrica. Normalmente, está presente em todos componentes, mas é uma propriedade fundamental dos capacitores. O capacitor básico tem duas placas planas isoladas com um dielétrico.

A função de um capacitor é suprir a potência reativa (VAr) ou a parte do sistema que está ligado. Na figura 6 podemos ver um exemplo de capacitor para correção de fator de potência:

Figura 6: Capacitor de correção do fator de Potência WEG - UCW-T 220V



Fonte: (ATLASBOMBAS, 2016).

#### 3.1 Banco de capacitores

Os bancos de capacitores são bastante utilizados na compensação de reativos, primeiro pelo seu baixo custo e sua facilidade na instalação e aplicação. São conectados nas barras de alta tensão das subestações. Os bancos de capacitores geram reativo capacitivo, ou seja, ele eleva a tensão até os níveis desejados. (NATURESA, 2001)

A Geração de reativos de um capacitor aumenta com o quadrado da corrente, de acordo com a equação,  $Q_c = I^2.X_c$ . Sendo assim um aumento repentino no fluxo de potência em LT ( linhas de transmissão), que ocasionalmente provoca uma diminuição da tensão, faça com que o capacitor em série gere mais (VAR) provocado pelo aumento da corrente, diminuindo o afundamento de tensão provocado pelo aumento de fluxo. (PAIXÃO, 2003,)

Um capacitor em derivação, quando está ligado juntamente a motores ou transformadores ele faz o trabalho de limitar o fluxo de energia reativa através dos circuitos elétricos. A energia reativa que é necessária para magnetização das máquinas de indução passa a ser produzida pelos capacitores, ao invés de fluir pelos circuitos de alimentação das referidas cargas. (DUAILIBE, 2009)

Conjunto de banco de capacitores mostrados na figura 7.

Figura 7: Módulo capacitivo trifásico



Fonte: (ATLASBOMBAS, 2016).

Existem três modelos para se trabalhar com banco de capacitores, são eles:

- a) Banco de capacitores fixos: Com funcionamento bem simples e dinâmico aonde todas as células capacitivas são acionadas e desacionadas diretamente ao ligar/desligar o disjuntor ou chave geral. Ele se torna ideal para instalações e equipamentos onde não existe variações nos níveis de consumo. É um banco mais barato e normalmente utilizado para transformadores operando a vazio.

- b) Banco de capacitores semiautomático: ideal para instalações e equipamentos onde os picos nos níveis de consumo sejam previstos ou controlados. Opera por meio de temporizador permitindo a atuação apenas nos períodos desejados.
- c) Banco de capacitores automático: É um equipamento que permite um controle mais sofisticado do fator de potência através de um controlador eletrônico. O banco de capacitores automático permite alta precisão no controle por meio de estágios, permitindo um controle fino no fator de potência. Indicado para grandes instalações com níveis de consumo altamente variáveis.

A escolha do banco de capacitor vai depender do problema, e certamente do quanto a empresa quer gastar.

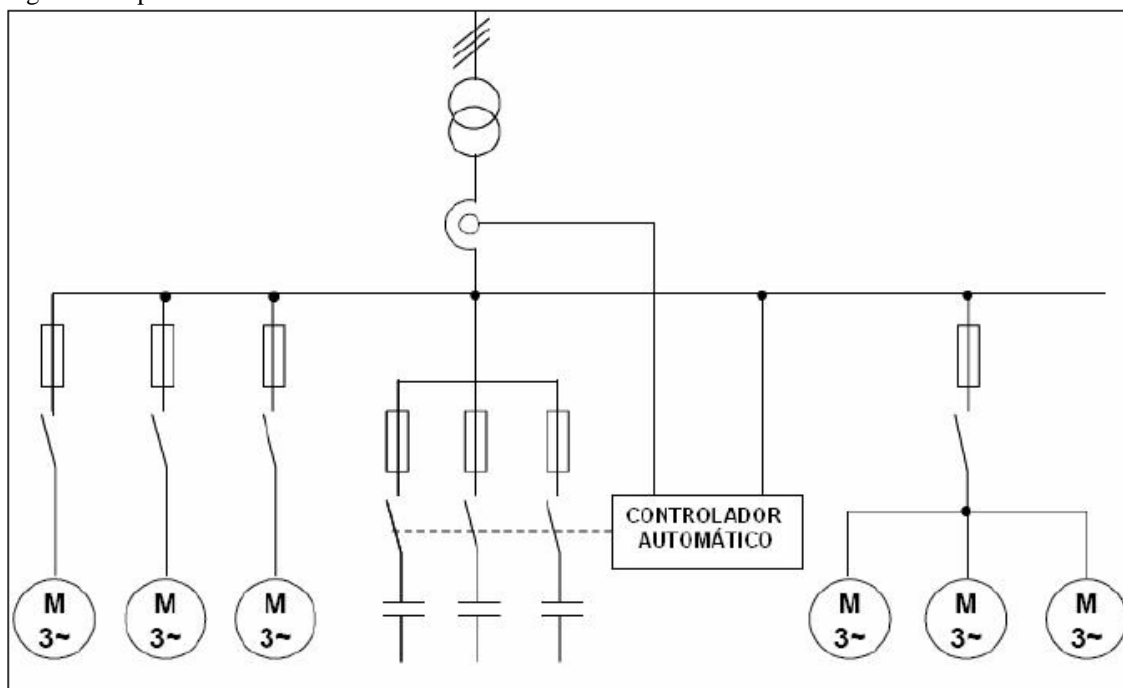
### **3.2 Banco de capacitores automático**

Para a operação automática de banco de capacitores, utiliza-se equipamentos de manobra (contator) controlados por um controlador automático de fator de potência (DUAILIBE, 2000).

A necessidade potência reativa é variável ao longo do dia e a entrada de capacitores em operação causa o aumento da tensão que pode ser demasiada, principalmente em períodos que não necessita de tanta carga. Mas também é inviável a colocação e retirada do equipamento por operação manual diariamente, os bancos de capacitores podem adotar os sistemas automáticos, que controlam as operações de ON-OFF dos bancos de capacitores, como é o dispositivo sensor do controle utilizado (YAMATAWA, 2007).

Os sistemas para correção automática do fp são geralmente adotados para correção global ou correção por setores (instalações de médios e grandes portes), considerando o suprimento de energia reativa capacitiva conforme as necessidades momentâneas da instalação (ou de parte dela) e promovendo o controle dinâmico do fator de potência. Um esquemático orientativo e bastante simplificado dessa configuração pode ser visualizado pela Figura 8. (SILVA, 2009)

Figura 8: Capacitores controlados automaticamente



Fonte: Silva, 2009, p.38

O controle é exercido por um equipamento eletrônico (controlador automático do fp - CAFP).(SILVA, 2009)

Monitoram-se os níveis de tensão (através de sinais obtidos a partir da rede monitorada) e os níveis de corrente em um alimentador geral obtido a partir da rede monitorada e os níveis de corrente em um alimentador geral (através do secundário de TCs - transformadores de corrente). (SILVA, 2009)

### 3.3 Bancos de capacitores fixos

O Banco de Capacitor Fixo é indicado para a correção do fator de potência de cargas sem grandes variações na necessidade de energia reativa, tais como Transformadores em vazio.

Os capacitores fixos são dispositivos fixados permanentemente na rede, ou seja trabalho o tempo que o circuito estiver energizado. Independente do nível da carga ou da hora do dia eles agem normal e são os mais utilizados para correção do FP, tanto na indústria, quanto no sistema de distribuição de energia elétrica (BORDIM, 2011).



### 3.4 Banco de capacitores semiautomáticos

Os bancos semiautomáticos devem possuir contador próprio para ligar os capacitores e relé de programação horária no qual se programa a hora em que o capacitor deve ser ligado e a hora em que deve ser desligado. Além disso, deve possuir relé tipo falta de fase para evitar que os capacitores queimem em uma possível falta de fase da rede elétrica e relé de retardo na energização de aproximadamente 15 segundos para evitar que os capacitores e contador queimem quando ocorrer um afundamento da tensão. É indicada para corrigir o fator de potência de pequenos estabelecimentos, até no máximo 15kVAr/220VAC, no qual o fator de potência tem pouca variação, em torno de no máximo 10%.

No entanto apesar de ter o fator de potência corrigido e a eliminação da energia reativa excedente, se utilizar os bancos de capacitores semiautomáticos para as empresas que têm muita variação no fator de potência, quando as cargas (motores, transformadores, etc) desligarem, a rede poderá ficar capacitiva(excesso de capacitores ligados) elevando a tensão da rede. Com a elevação da tensão, aumentará o consumo de energia ativa da empresa, aumentando assim a conta de luz e o risco de queima de equipamentos. Conclusão: da mesma forma que os bancos fixos, com a solução dos bancos semiautomáticos elimina-se a multa da energia reativa, porém pode ocorrer um aumento do consumo ativo e queima de equipamentos eletroeletrônicos do estabelecimento.

## **4 INSTALAÇÃO, LOCALIZAÇÃO E RECOMENDAÇÕES DO BANCO DE CAPACITORES**

Os capacitores podem ser instalados em paralelo com qualquer carga com o fator de potência baixo, com a necessidade de suprir energia reativa indutiva exigida por essa carga, que vai de um simples motor até uma grande indústria. Estes capacitores podem ser instalados na entrada de energia ou também perto das cargas individuais, reduzindo as perdas e aumentando a capacidade disponível do sistema, e assim melhorando os níveis de tensão (DUAILIBE, 2011).

### **4.1 Localização dos capacitores**

Para se parametrizar o local de um banco de capacitores, muitos pontos tem que serem revisados, tais como os circuitos de instalação, seu comprimento, as variações de carga, tipos de motores e distribuição das cargas. De forma geral, os capacitores ou banco de capacitores podem estar localizados:

- a) Na entrada de energia;
- b) No secundário do transformador;
- c) No quadro de distribuição de agrupamento de cargas;
- d) Junto a carga.

### **4.2 Instalação junto a motores**

Um dos locais para instalação do banco de capacitores é nos terminais dos motores de indução.

A determinação da potência do banco deve ser elaborada a fim de evitar eventuais problemas com sobretensões após a abertura da chave. A corrente total no banco de capacitor não pode ultrapassar a corrente do motor a vazio (chamada corrente de magnetização) (DUAILIBE, 2000).

A visualização fica mais fácil pela formula a seguir.

$Q_{MAX}$  = Potência máxima do banco de capacitores.

$$Q_{MÁX} = \sqrt{3} \cdot V_{N,MOTOR} \cdot I_{MAG,MOTOR} \quad (7)$$

$$Q_{BANCO} \leq Q_{MÁX}$$

Por questão de segurança considera-se  $Q_{BANCO} \leq 90\% \cdot Q_{MÁX}$ .

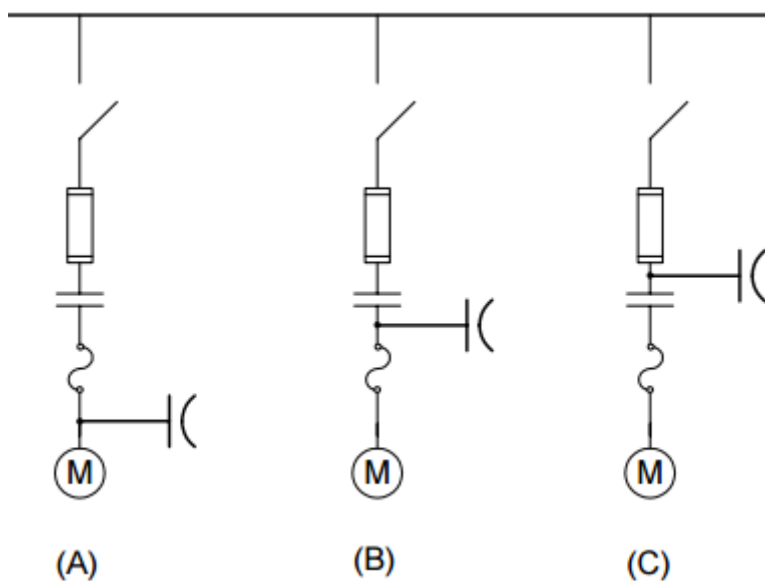
Normalmente a corrente de magnetização do motor é fornecida pelo fabricante, no entanto caso esse dado não esteja disponível, o seguinte calculo pode ser adotado.

(DUAILIBE)

$$I_{MAG,MOTOR} = 20\% \cdot I_{N,MOTOR} \quad (8)$$

Basicamente, existe 3 opções de conexão de banco de capacitor junto a motores. O capacitor pode ser acionado juntamente com o motor, demonstrado pela figura 9.

Figura 9: opções para instalação de capacitores junto a motores



Fonte: Duailibe, 2000

### 4.3 Instalação junto a transformadores para compensação em vazio

Para o dimensionamento de capacitores instalados para compensação de transformadores rodando a vazio depende fundamentalmente das perdas dos transformadores. Tendo isso em vista que este caso é indicado para suprir a energia reativa dos transformadores operando a vazio (BORDIM, 2011).

A energia reativa dos transformadores que estão operando a vazio pode ser obtida através do fabricante, ou nos dados de placa. Sendo esse dado não disponível, pode ser considerados na tabela que está representada pela figura 10, em que mostra a potência reativa média de transformadores até 1000kVA (DUAILIBE, 2000).

Figura 10: Potência reativa média de transformador trifásico em vazio.

Potência (kVA)	Carga Reativa em Vazio (kvar)
10	1,0
15	1,5
30	2,0
45	3,0
75	4,0
112,5	5,0
150	6,0
225	7,5
300	8,0
500	12,5
750	17,0
1000	19,5

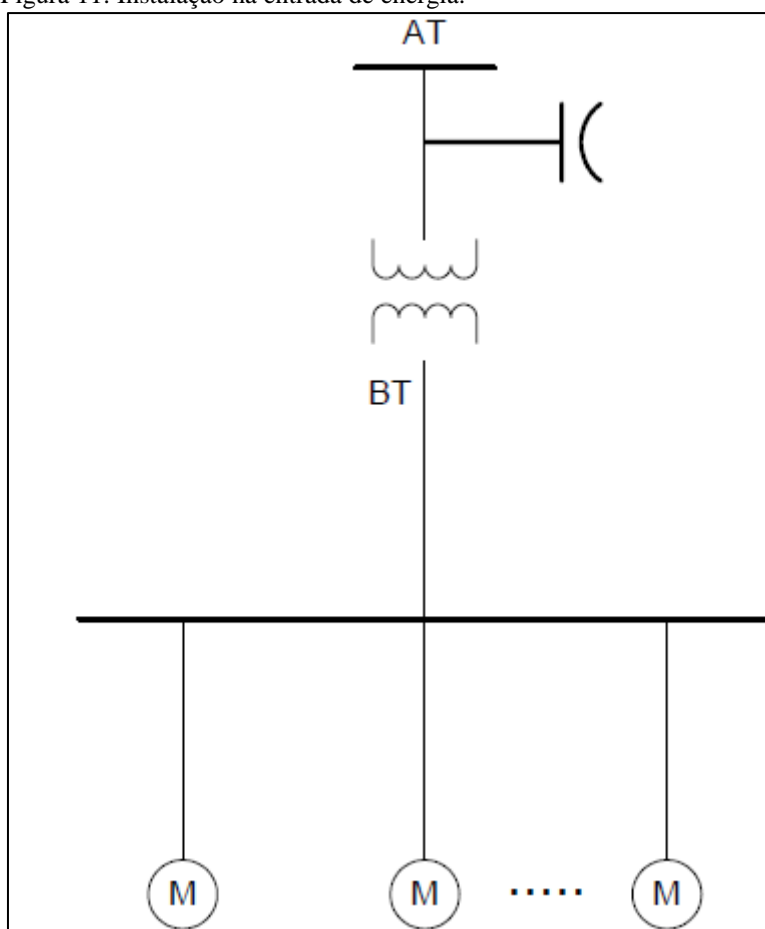
Fonte: Duailibe, 2000

É bastante comum em períodos em que a carga está leve encontrar transformadores operando a vazio ou alimentando poucas cargas, acarretando um baixo fator de potência (MAMEDE, 2007)

#### 4.4 Instalação na entrada de energia

Capacitores que estão localizados no lado de AT, não vão avaliar os transformadores e os circuitos alimentadores dos quadros de distribuição e das cargas. Neste caso, a instalação são utilizados dispositivos de manobra de proteção dos capacitores com isolação e tensão primária (DUAILIBE, 2000).

Figura 11: Instalação na entrada de energia.



Fonte: Duailibe, 2000

#### 4.5 Algumas recomendações

Algumas recomendações e especificações que se devem ter o conhecimento antes da instalação do banco de capacitores. As normas recomendam que os itens a seguir tem que seguir alguns procedimentos para capacitores com tensão maior ou igual a 600 V.

- a) Os capacitores devem ser providos de meios de escoamento de carga, uma vez após seu desligamento;
- b) A tensão residual do capacitor deve estar abaixo dos 50 V no máximo até 1 minuto após o desligamento da fonte que o alimenta;
- c) O circuito que descarrega o banco deve estar permanentemente ligado aos terminais do banco de capacitores, ou no mínimo serem providos de sistemas de controle automático que conectem aos terminais de desligamento da linha. ( ANEEL, 2005)

## 5 BREVE REVISÃO DA LEGISLAÇÃO

De acordo com (CODI, 2004), em consonância com o estabelecido pelo Decreto nº 62.724 de maio de 1968 e com a nova redação dada pelo Decreto nº 75.887 de junho de 1975, as concessionárias de energia elétrica adotaram, à época, o fator de potência igual a 0,85 como patamar de referência para limitar o fornecimento de energia reativa sem a incidência de ônus adicional para os consumidores. Em março de 1992, o Decreto nº 479 reiterou a obrigatoriedade de se manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade (1,00) tanto pelas concessionárias quanto pelos consumidores, recomendando, ainda, ao então Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, órgão hoje já extinto, o estabelecimento de um novo limite de referência para fator de potência indutivo e capacitivo, bem como a forma de avaliação e de critério de faturamento da energia reativa excedente perante esse novo limite. Nessa época, portanto, foram estabelecidas pela Portaria nº 1.569 de 23 de dezembro de 1993 do DNAEE, as bases da renovação dessa legislação, introduzindo-se uma nova forma de abordagem do ônus por baixo fator de potência, com os seguintes aspectos relevantes:

- a) Aumento do limite mínimo de 0,85 para 0,92;
- b) Faturamento da energia reativa capacitiva excedente; e
- c) Redução do período de avaliação / monitoramento do fator de potência, passando-o de mensal para horário a partir de 1996.

O controle mais apurado da energia reativa visava, fundamentalmente, estimular os consumidores a melhorarem o fator de potência de suas instalações elétricas, com benefícios imediatos para eles próprios, através da redução de perdas e melhores desempenho de suas instalações, como também para o setor elétrico nacional, pela melhoria das condições operacionais e a liberação do sistema para atendimento a novas cargas com investimentos menores (ANEEL, 2005).

A portaria nº 1.569 estabeleceu um nível máximo para a utilização de energia reativa indutiva ou capacitiva, em função da energia ativa consumida (kWh). Por esse princípio, para cada kWh consumido em um determinado intervalo de tempo, a concessionária permitiria o consumo de aproximadamente 0,426 kVAr, indutivo ou capacitivo (em função do horário do dia) no mesmo intervalo, sem acréscimo nos custos com energia elétrica para as instalações consumidoras, situação que até hoje se mantém (ANEEL, 2005)

## 5.1 Legislação

Antes que seja apresentada a síntese da atual legislação relativa ao fator de potência em instalações consumidoras, é conveniente que sejam definidos os atuais grupos e subgrupos de fornecimento aos quais se enquadram os consumidores e as atuais modalidades tarifárias disponíveis, uma vez que muitos dos termos associados a esses assunto são citados em tal legislação.

Atualmente, o fator de potência é avaliado pela concessionária e passível de cobrança para consumidores atendidos em tensão primária (ou faturados como tal), ou seja, consumidores enquadrados no Grupo A, conforme as classificações abaixo (ANEEL, 2000):

Grupo “A”: grupamento composto por unidades consumidoras atendidas pelas concessionárias de energia em tensão igual ou superior a 2,3 kV ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistemas subterrâneos de distribuição e faturados pelo grupo A; caracteriza-se pela estruturação tarifária binômia (faturamento de demanda em kW e consumo de energia em kWh) e subdivide-se nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) Subgrupo A2 – tensão de fornecimento situada entre 88 kV a 138 kV;
- c) Subgrupo A3 – tensão de fornecimento equivalente a 69 kV;
- d) Subgrupo A3a – tensão de fornecimento situada entre 30 kV e 44 kV;
- e) Subgrupo A4 – tensão de fornecimento situada entre 2,3 kV e 25 kV;
- f) Subgrupo AS (subterrâneo) – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, com atendimento a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturamento pelo grupo A em caráter opcional.

No Grupo “B” encontram-se as unidades consumidoras atendidas pelas concessionárias de energia em tensão inferior a 2,3 kV (geralmente em baixa tensão) e faturadas neste Grupo; esse grupo caracteriza-se pela estruturação tarifária monômia (faturamento de consumo de energia (kWh)) e subdivide-se em vários subgrupos.

Via de regra, o fator de potência não tem sido avaliado para consumidores do Grupo B, já que, em suas instalações, geralmente não há sistemas de medição que monitorem o consumo de energia reativa. Todavia, conforme (ANEEL, 2000), autorizou-se a cobrança de energia reativa excedente através de medições transitórias em consumidores do Grupo B.

Quanto às modalidades tarifárias disponíveis, pode-se caracterizá-las da seguinte forma (ANEEL, 2000):



- Tarifação Convencional - estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica (kWh) e/ou demanda de potência (kW) independentemente dos horários de utilização no dia e dos períodos do ano.
- Tarifação Horo-sazonal - estrutura caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência (kW) de acordo com as horas de utilização no dia e dos períodos do ano, conforme especificação a seguir:
  - a) Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia (horário de ponta e fora de ponta) e os períodos do ano (período seco e período úmido), bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

Aplica-se compulsoriamente a:

- Consumidores atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV, ou seja, consumidores dos subgrupos A3, A2 e A1;
- Consumidores atendidos em tensão inferior a 69 kV (sub-grupos A3a, A4 e AS) com demanda de potência igual ou superior a 300 kW, desde que não exerçam opção pela tarifa verde.
- Consumidores faturados na estrutura tarifaria convencional que apresentem, nos últimos 11 (onze) ciclos de faturamento, 3 (três) registros consecutivos ou 6 (seis) alternados de demandas medidas iguais ou superiores a 300 kW, desde que não exerçam opção pela Tarifa Verde.

Aplica-se opcionalmente a:

- a) consumidores atendidos em tensão inferior a 69 kV (subgrupos A3a, A4 e AS), com demanda de potência entre 30 kW e 300 kW.
- b) Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização no dia (horário de ponta e fora de ponta) e os períodos do ano (período seco e período úmido), bem como de uma única tarifa de demanda de potência.
- c) Horário de Ponta (P): período definido pela concessionária de energia e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas entre 17:00 e 22:00, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, considerando as características do seu sistema elétrico.

d) Horário Fora de Ponta (F): período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares aquelas definidas no horário de ponta.

Obs.: Durante o horário de ponta as tarifas de energia elétrica são mais onerosas que no horário fora de ponta.

e) Período Úmido (U): período de 5 (cinco) meses consecutivos compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

f) Período Seco (S): período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

Obs.: Durante o período seco as tarifas de energia elétrica são mais onerosas que no período úmido. (ANEEL, 2000)

## 5.2 Legislação atual

A atual legislação do fator de potência (consumidores cativos) é regida pela referência (ANEEL, 2000). Nela são estabelecidos como pontos principais:

- Fator de potência de referência (*fpr*) indutivo ou capacitivo: 0,92;

Durante o período de 6 horas consecutivas, compreendido, a critério da concessionária, entre 23:30 hs e 06:30 hs, apenas os fatores de potência “fpt” inferiores a 0,92CAPACITIVO verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “t” contribuem para os ônus associados aos reativos excedentes; durante o período diário complementar, apenas os fatores de potência “fpt” inferiores a 0,92INDUTIVO são monitorados .

Para os consumidores livres existe legislação própria e os limites de referência para o fator de potência variam, podendo ser superiores a 0,92.

## 6 ESTUDO DE CASO

Até o momento, esta monografia demonstrou apenas a parte teórica, visando o conhecimento da importância do aproveitamento da energia elétrica. Neste capítulo haverá um pequeno estudo de caso mostrando na prática a importância de se ter o fator de potência corrigido.

Neste caso o estudo foi realizado em um armazém de café, onde se tem transformadores, compressores, elevadores com motores superdimensionados, balões de café, máquinas de solda para manutenção, lâmpadas fluorescentes e etc.

Como é uma carga de característica indutiva, seu valor é inferior a 1 e tendo vários motores e um transformador operando a vazio seu fator de potência é inferior a 0,92, valor esse estipulado pela concessionária que nesse caso é a CEMIG.

A comprovação de que o fator de potência veio baixo do valor desejado ocorreu através de medições, onde foi avaliado o gasto de energia ativa, a corrente e a tensão que estava sendo medidas de 5 em 5 minutos durante um breve período de tempo. Todas essas medidas foram conseguidas através de um wattímetro que foi colocado a disposição pela própria empresa.

Na tabela 1 podemos ver um resumo das medidas:

Tabela 1: Medidas obtidas através do wattímetro

DATA E HORA	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA ATIVA (KW)
15/05/2016 13:50	384,7	112,2	50,4
20/05/2016 17:25	384	375	243,8
25/05/2016 04:30	383,6	298,6	190,6
30/05/2016 19:45	381,8	158,5	85,9

Fonte: o autor.

Como o equipamento tem suas limitações, foi calculada apenas potência ativa, tensão e corrente, para a potência reativa e fator de potência é necessário ser feito o cálculo em cada um dos horários da tabela 1 pelas seguintes equações .

Equação 9, potência aparente:

$$S_3\phi = 3V_f \cdot I_f \quad (9)$$

Como a tensão de linha lida pelo primeiro caso é de 384 V, obtém então a tensão de fase pela equação 10.

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

Após obter o valor da tensão de fase voltamos na fórmula 9 onde os substituiremos os valores.

$$S_{3\phi} = 3 \times 222,10 \times 112,2 = 74,75 \text{ kVA} \quad (9)$$

Logo após obter o valor da potência aparente, pode também calcular o fator de potência, utilizando a fórmula 11.

$$F_p = \cos \theta = \frac{P}{S_{3\phi}} = \frac{50,4}{74,75} = 0,67 \quad (11)$$

E obtendo o valor da energia reativa nesse momento de tempo sendo essa dada pela equação 12.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{74,75^2 - 50,4^2} = 55,20 \text{ kVAr} \quad (12)$$

A energia reativa em sua particularidade não varia tanto em relação a energia ativa, ou seja, ela varia menos que a energia ativa. Isso se dá pelo fato de que a carga composta em sua maioria por motores elétricos, que quando esses ligados não variam sua demanda por energia reativa, enquanto que a demanda por energia ativa é proporcional a carga ao qual o eixo do motor é submetido. Exemplo claro disso são os elevadores de café, no qual quando ele está cheio e se dá a partida ele demanda de uma potência ativa elevada para que ele consiga fazer o trabalho, logo depois que o mesmo se estabiliza ele roda a vazio por ser um motor superdimensionado mantendo constante o seu reativo.

Notando que o fator de potência está abaixo do valor exigido pela concessionária (0,92 exigido pela concessionária e 0,67 medido nesse período) sendo assim podendo ser feita a

correção desse fator de potência para uma maior economia, vida útil das máquinas e o melhor aproveitamento de energia evitando também as multas por excesso de reativo.

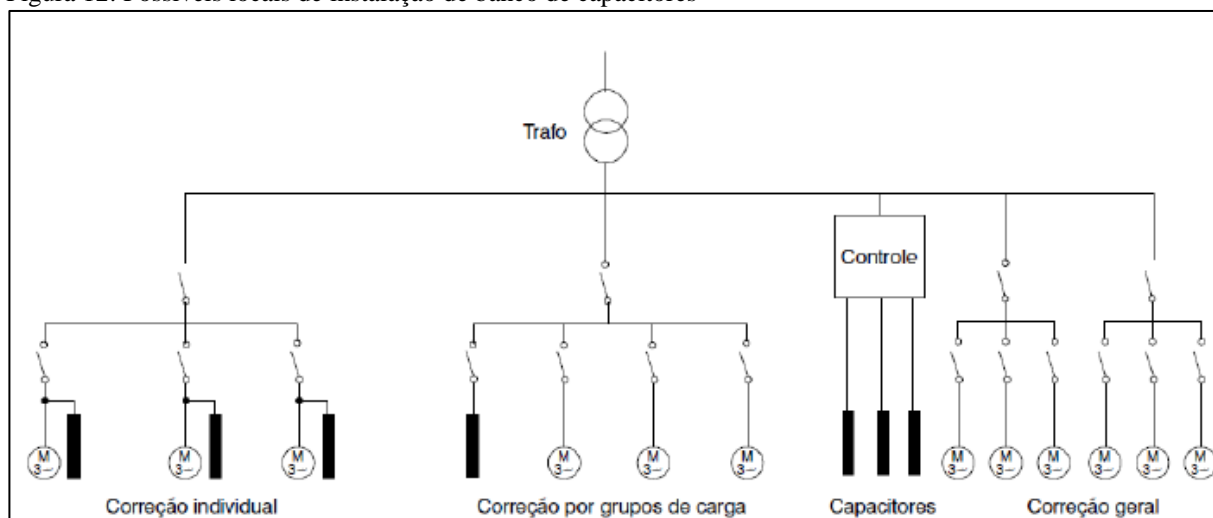
Foram avaliados alguns métodos, desde a implantação de motores síncronos até o uso de banco de capacitores. Pela simplicidade e custo o método escolhido foi o banco de capacitores, mas já demonstrados nessa monografia temos algumas maneiras de instalar os bancos de capacitores.

Por exemplo, a ligação direta de capacitores nas máquinas que necessitam de energia reativa. Essa solução iria jogar energia capacitiva diretamente sobre os equipamentos que necessite e de equipamentos de manobra individuais para fazer o controle desses capacitores junto às máquinas.

Apesar de uma solução aparentemente simples de ser elaborada, devem ser levados em conta os custos desse projeto, pois o mesmo se torna não rentável pelo ponto de vista financeiro, pois um capacitor e um comando para cada motor o investimento seria elevado de mais e sem previsão de retorno. Mas um problema também para essa solução é que nem sempre estes motores estão ligados, o que pode ser vantajoso quando se pensa em projeto de correção de fator de potência de um barramento que inclui diversos equipamentos, sendo esse chamado de correção por grupo de cargas. Sendo essa última opção sendo feita por controle automático, pois quando desliga uma série de motor os capacitores também saem de circulação, evitando reativos capacitivos.

Sem sombra de dúvidas a melhor opção para corrigir o fator de potência neste caso é o automático em decorrência da variação de cargas. Sua instalação será na BT devido a impossibilidade de sua utilização na média tensão. Dessa maneira se tem um controle, mas eficiente de reativos injetados na indústria atingindo o objetivo desse projeto. A instalação deve ser feita no QGBT (Quadro geral de baixa tensão) onde os comandos das máquinas estão. Ligando o banco de capacitores ao QGBT está aumentando o percentual de aproveitamento de energia reativa além de que a escolha pode ser explicada pelo fato que a instalação será feita onde foram realizadas as medições de potência ativa tensão e corrente. Na figura 12 o esquema de ligação do controlador automático de fator de potência.

Figura 12: Possíveis locais de instalação de banco de capacitores



Fonte: Weg, manual para correção de fator de potência, 2009.

Para o dimensionamento de banco de capacitores é necessário à correção do fator de potência, onde nosso valor está bem abaixo de 0,92 o valor atual é de 0,67.

Considerando então:

$$\cos \theta = 0,67$$

Pela fórmula 13.

$$\theta = \cos^{-1} 0,67 = 47,93 \quad (13)$$

E pela equação 14 se obtém a energia reativa.

$$Q = S_{3\phi} \sin \theta = S_{3\phi} \sin 47,33 = 55,49 \text{ kVAr} \quad (14)$$

Obtendo a energia reativa, o painel tende a compensar essa energia fornecendo energia reativa através do banco de capacitores. Baseado nas bibliografias foi escolhido capacitores com estágio de 15 kVAr (são os mesmos valores de alguns que já operam no próprio sistema da indústria) e mais um estágio de 7,5 kVAr para o ajuste fino. O banco seria programado então para fornecer 52,5 kVAr, equivalentes a três módulos de capacitores trifásicos de 15kVAr e um módulo de 7,5 kVAr, ligado em paralelo.

Agora será calculado um novo valor de fator de potência após a correção da mesma pelo banco. Subtraindo o valor do reativo indutivo pelo indutivo capacitivo se obtém:  
 $55,49 \text{ kVAr} - 52,5 \text{ kVAr} = 2,99 \text{ kVAr}$

Sendo 2,99 kVAr o novo valor reativo. Dessa forma o novo valor da potência aparente será.

$$S_{3\phi} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{50,4^2 + 2,99^2} = 50,49 \text{ kVA} \quad (15)$$

E calculando o novo valor do fator de potência pela fórmula 11.

$$F_p = \cos \theta = \frac{P}{S_{3\phi}} = \frac{50,4}{50,49} = 0,998 \quad (11)$$

Apresentando o resultando muito satisfatório, o valor de potência saltou de 0,67 para 0,998 sendo aproveitado praticamente quase toda a energia, diminuindo a zero a chance de se receber multas por excedente reativo. E um dos principais benefícios é a diminuição da corrente. Sendo a diminuição calculada pela equação 116.

$$I = \frac{S_{3\phi}}{3.V_f} = \frac{50,49 \text{ VA}}{666,3 \text{ V}} = 75,77 \text{ A} \quad (16)$$

Uma diminuição de cerca de 30% do valor inicial da corrente. Com isso o transformador trabalha com um pouco de folga, abrindo espaço para que um aumento de carga futuro, não haverá a necessidade de substituição do transformador.

Após fazer o dimensionamento dos capacitores, é necessário fazer o projeto de fusíveis e condutores dos mesmos, é necessário o calculo da corrente nominal do banco de capacitores, demonstrada na fórmula 17.

$$I_{NC} = \frac{POTÊNCIA REATIVA(kVAr).1000}{3.V_{FF}} \quad (17)$$

$I_{NC}$ : Corrente nominal no capacitor

$V_{FF}$ : Tensão entre fases.

Para o caso do capacitor de 15 kVAr (foi um dos modelos de capacitor determinado para a correção) tem o seguinte valor.

$$I_{NC} = \frac{15(kVAr) \cdot 1000}{3 \cdot 220} = 22,73 \text{ (A)}$$

E para o capacitor de 7,5 kVAr

$$: \quad I_{NC} = \frac{7,5(kVAr) \cdot 1000}{3 \cdot 220} = 11,37$$

Após obter a corrente dos capacitores, calcula o dimensionamento dos fusíveis para proteção pela fórmula 18.

$$I_{NF} = I_{NC} \cdot 1,65 \tag{18}$$

Desta maneira temos os seguintes valores (primeiro o capacitor de 15 kVAr).

$$I_{NF} = 22,73 \cdot 1,65 = 37,04$$

E agora para o capacitor de 7,5 kVAr:

$$I_{NF} = 11,37 \cdot 1,65 = 18,76$$

Conforme padrão de segurança foi determinado um fusível de corrente de 40 (A) para os capacitores de 15 kVAr e de 20 (A) para os capacitores de 7,5 kVAr.

Quanto aos condutores dos mesmos e baseados na NBR 5060 deve se considerar condutores 1,43 vezes.

Multiplicando a corrente nominal do capacitor de 15 kVAr se obtém  $(22,73 \times 1,43 = 32,5$  ou  $\pm 33$  (A), esse é o valor da corrente de projeto. Baseado na NBR 5410 considera-se o fator de agrupamento unitário e fator de temperatura unitário, tem-se que seção dos condutores, levando em consideração uma margem de segurança de 20% é de 6mm<sup>2</sup>.

Usando o mesmo raciocínio para o capacitor de 7,5 kVAr, foi dimensionado cabos de 2,5mm<sup>2</sup>.



## 6.1 Harmônicas

Buscando alcançar uma eficácia no estudo de caso, e com uma segurança maior foi feito um estudo levando em conta a filtragem de harmônicas nas correntes.

Existem dois aspectos bastante importantes a serem analisados:

- a) A ressonância entre um componente harmônico da corrente de carga e a frequência de ressonância do sistema, o que é muito destrutivo para todo o sistema e deve ser bloqueado;
- b) E os componente harmônicos mais comuns e mais relevantes que acabam por impor uma potência de distorção nos conjunto de potências, podendo ocasionar a insuficiência da compensação do fator de potência seja insuficiente, sendo o banco de capacitores um investimento perdido e um problema adicional ao sistema.

A solução necessária para esse problema normalmente é a instalação de um reator (indutor) anti-ressoante e fazer uma relação entre a impedância do reator com a do capacitor que estão ligados em série.

Para a especificação dos reatores anti-ressoantes deve ser feita de forma que o conjunto LC (nomenclatura para indutor e capacitor) não seja momento algum perturbado por correntes harmônicas provenientes do sistema e não cause ressonância. Existem também, algumas tabelas que pré-determinam os reatores a serem ligados em série com os capacitores para evitar ressonância, isto ao devido conhecimento das cargas tipicamente industriais como se pode ver na figura 12.

Figura 12: Quadro de reatores típicos anti-ressonantes encontrados no 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: Silva, 2009

Calculando a capacitância dos bancos de capacitores pela fórmula 18.

$$C = \frac{kVAr \cdot 10^3}{2\pi f \cdot (V_L)^2} \quad (18)$$

Onde os respectivos valores dos bancos de 15 kVAr e 7,5 kVAr são.

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

Para o capacitor de 7,5 kVAr.

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

Logo após calcular a capacitância dos bancos, faz o calculo da impedância dos mesmos através da fórmula 19.

$$Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (19)$$

Substituindo os valores encontrados acima na formula 19.

$$Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 275,7 \cdot 10^{-6}} = 9,63 \Omega$$

E agora para o capacitor de 7,5 kVAr.

$$Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 137,84 \cdot 10^{-6}} = 19,25 \Omega$$

Segundo a ANEEL pelo seu manual de procedimentos de distribuição de energia elétrica (PRODIST) sabe-se que a relação de impedância vale 7% e após calcular a capacitância e a impedância, calcula-se a impedância dos reatores para os bancos de capacitores de 15 kVAr e 7,5 kVAr através da fórmula 20 (ANEEL, 2005).

$$P\% = \frac{Z_L}{Z_C} \cdot 0,07 \quad (20)$$

Substituindo os respectivos valores obteve-se.

$$P\% = \frac{Z_L}{9,63} \cdot 0,07 \rightarrow Z_L = 674 \text{ mH}$$

$$P\% = \frac{Z_L}{19,25} \cdot 0,07 \rightarrow Z_L = 1347,5 \text{ mH}$$

Os reatores anti-ressonantes causam um aumento na tensão dos bancos de capacitores que é demonstrada pela formula 21 (ANELL, 2005).

$$U_C = \frac{V_L}{(1-P\%)} \quad (21)$$

Substituindo os valores.

$$U_C = \frac{380}{1 - 0,07} = 408,6 \text{ V}$$

Para um funcionamento perfeito é extremamente necessário o uso do capacitor de 440 V (pois o banco poderia ser o de 380 V devido a tensão de linha, ser de 380 V, mas para fim de projeto e segurança na operação é necessário um capacitor de 440 V).

A impedância total nos ramos dos bancos de capacitores e seus reatores são calculados pela formula 22.

$$Z = -jZ_C + jZ_L \quad (22)$$

Substituindo os valores.

$$Z = -j 9,63 + j0,674 = 8,9526 \Omega$$

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

Agora apenas calcular a nova potência injetada pelos bancos, que estão em série com os reatores anti-ressonantes pela fórmula 23.

$$Q = \frac{U^2}{Z} \quad (23)$$

Substituindo os valores.

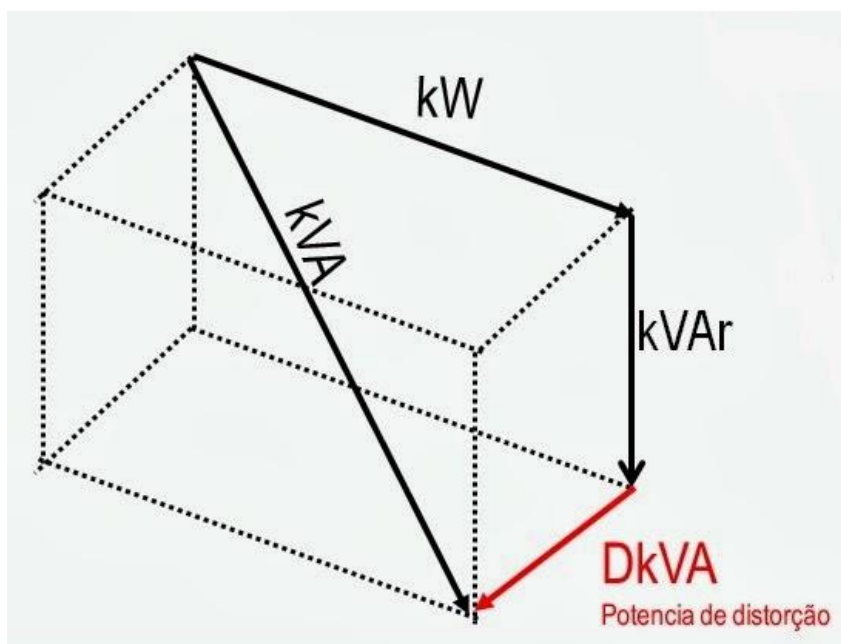
$$Q = \frac{380^2}{8,9526} = 16,129 \text{ kVAr}$$

$$Q = \frac{380^2}{17,9025} = 8,06 \text{ kVAr}$$

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

Após identificar os harmônicos na rede, o fator de potência não é mais  $\cos \varphi$ , em decorrência da distorção harmônica. Sendo assim o fator de potência fica com um novo ângulo. Como demonstra a figura 13.

Figura 13: Potência de distorção harmônica.



Fonte: ATLASBOMBAS, 2016

## 7 CONCLUSÃO

Visando um controle e um aproveitamento melhor da energia elétrica de uma carga industrial, foi realizado este estudo, no sentido de um levantamento bibliográfico e aplicação em um estudo de caso. Foi levado em conta valores obtido através do medidor da Cemig, e para um estudo mais específico foi utilizado um wattmetro para calcular grandezas específicas.

Por meio desse estudo fica comprovada a eficácia de um estudo e aplicação de correção de fator de potência, onde conclui-se que é totalmente viável sua instalação, pela facilidade e por ter um retorno rápido, pela valor reduzido da corrente aumentando a vida útil dos equipamentos e que em caso de um aumento de carga a empresa não irá precisar trocar nenhum transformador nem componente, pois o valor do fator de potência está próximo do valor unitário.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.  
Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist:  
Módulo 5 – Sistemas de medição. Brasília: ANEEL, 2005.
- ALVES, M. F. **QEE- Qualidade da energia elétrica**. CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, PUC Minas, 2010.
- Banco de capacitores fixos**. Disponível em (<http://www.wgr.com.br/fixos/banco-de-capacitores-fixos.html>). Acessado em 20 de maio de 2016
- BORDIM, J. R. G. **Instalação de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica para correção de fator de potência e regulação de tensão: projeto e simulação computacional**. Monografia (Bacharelado em Engenharia elétrica) - Universidade de São Paulo- Escola de engenharia de São Carlos-Departamento de engenharia elétrica, 2011.
- Capacitor de correção do fator de potencia WEG**. Disponível em: <http://www.atlasbombas.com.br/capacitor-de-correcao-do-fator-de-potencia-weg-ucw-t-220v-p157>, acessado 15 de maio de 2016.
- CEMIG- Companhia Energética de Minas Gerais S.A. Distribuição para baixa e média tensão. Disponível em <http://www.cemig.com.br/sites/Imprensa/pt-br/Paginas/cemig-bandeira-tarifaria-verde-abril.aspx>.. Acessado em 29 de maio de 2016.
- Copel - Companhia Paranaense de Energia. Manual de eficiência energética na indústria. Paraná , 2005
- DUAIALIBE, P. **Capacitores: instalação e correção de fator de potência**. Consultoria para uso de energia elétrica- Centro federal de educação tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2000.
- ELGERD, O. **Introdução a teoria de sistemas de energia elétrica**. Brasil: McGraw-hill do Brasil, 1977.
- EDMINISTER, J.A. **circuitos elétricos**. São Paulo: McGraw-hill, 2001.
- MAMEDE, Filho João. **Manual de equipamentos elétricos**. São Paulo, LTC, 2007.
- NATURESA, J. **A influência de compensadores estáticos de Reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica**. 2001. 220f. Dissertação (Mestrado em Compensadores estáticos de reativos) - Universidade estadual de Campinas, Campinas-SP, 2001.
- PAIXÃO, R.A **compensação série Chaveada como solução para o problema do colapso transitório de tensão na interligação Norte-Nordeste**. 2003. 98f. Dissertação (Mestrado em Sistema elétrico de potência) - Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2003.

**Revisão da Regulamentação sobre a Qualidade do Produto no Sistema de distribuição.** Disponível em:

[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/NT\\_29\\_2011-SRD\\_ANEEL\\_ANEXO.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/NT_29_2011-SRD_ANEEL_ANEXO.pdf)> Acesso em: 22 de maio de 2016.

**SILVA, M. C. I. Correção do fator de potência de cargas**

**Industriais com dinâmica rápida.** Dissertação de mestrado apresentado na universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2009.

**Variações de tensão.** Disponível em:

<[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed-88\\_Fasciculo\\_Cap-V-Qualidade-de-energia.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed-88_Fasciculo_Cap-V-Qualidade-de-energia.pdf)> Acesso em: 25 de maio de 2016.

**YAMAKAWA, E. K. Sistemas de controle nebuloso para banco de capacitores automáticos aplicados em alimentadores de distribuição de energia elétrica.**

Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, universidade Federal do Paraná.

WEG BRASIL S. A. **Manual de correção de fator de potência.** Disponível em <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em 29 de maio de 2016.