



UNITAU

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

Taubaté - SP

2020



UNITAU

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

ADILSON ALVES LEITE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PARA
CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS
INDUSTRIAIS**

Taubaté – SP
2020

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi
Universidade de Taubaté - Unitau**

L533a Leite, Adilson Alves

Análise do comportamento da energia elétrica para correção do fator de potência em instalações elétricas industriais / Adilson Alves Leite. -- 2020.
46 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté,
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres, Departamento de
Engenharia Elétrica.

1. Energia elétrica. 2. Potência reativa. 3. Indústria. I. Universidade
de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica. Curso
de Engenharia Elétrica e Eletrônica. II. Título.

CDD – 333.79

ADILSON ALVES LEITE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PARA
CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS
INDUSTRIAIS**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade de
Taubaté, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Graduação em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres



UNITAU

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PARA
CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS
INDUSTRIAIS**

ADILSON ALVES LEITE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA”

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Mauro Pedro Peres
Orientador/UNITAU-DEE


Prof. Me. Carlos Henrique Silva Moura
ANHANGUERRA


Prof. Me. Ramon Moreira Peres
AGC

Taubaté – SP

2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a presença de Deus em minha vida, pois ele foi de extrema importância para o nosso enriquecimento intelectual, nos proporcionando a capacidade de manter o comprometimento e foco para conquistar a minha tão sonhada graduação.

Também agradeço a minha mãe, *Regina Cleide Gomes Leite* e minha esposa de forma especial, *Tania da Silva Leite*, que foram os principais responsáveis por sempre incentivarem os meus estudos, me fornecendo todo apoio e suporte necessários.

Agradeço também as demais pessoas que participam de uma maneira muito especial nesta conquista, que tanto me apoiaram com conselhos e sábias palavras nos momentos mais delicados que me acompanharam ao longo do curso, tais como as semanas de provas, apresentações de trabalhos e seminários, pois este apoio foi de fundamental importância para que conseguisse realizar o meu sonho.

Ao meu orientador Professor Mauro Pedro Peres, por se colocar totalmente à disposição de me orientar na realização de meu trabalho, depositando sobre mim toda a confiança necessária.

Por fim, mas não menos importante e com um imenso orgulho e gratidão, agradeço aos meus colegas de classe que me acompanharam durante o período acadêmico, *Caio Chicarino, Lucas Ferreira, Leonardo Galvão, Ana Carolina Giannico, Ritchie Reymundo, Paulo César, Hércio Ribeiro* e a todos os demais por estarem sempre presentes direta ou indiretamente em minha trajetória no decorrer deste curso.

“É precisamente na fronteira do conhecimento que a imaginação tem o seu papel mais importante; o que ontem foi apenas um sonho, amanhã poderá se tornar realidade.”

Marcelo Gleiser

ALVES LEITE, Adilson. **Análise do comportamento de energia elétrica para correção do fator de potência em instalações elétricas industriais**. 2020. 47 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica-Universidade de Taubaté, Taubaté, 2020.

RESUMO

O presente trabalho procura mostrar o comportamento da energia elétrica nas indústrias, com o intuito de entender as classificações dos diferentes tipos de equipamentos e suas maneiras de interagir com a instalação. O fator de potência é a diferença entre a potência entregue, pela potência utilizada, ou seja, nem toda energia que se aplica no circuito é consumida para realizar trabalho. São exemplos de cargas indutivas motores e transformadores que para realizarem o seu trabalho criam um campo magnético em seus enrolamentos, e por consequência geram a potência reativa que na instalação elétrica traz inúmeros malefícios, como o desperdício de energia elétrica. Portanto, o objetivo deste trabalho foi compreender o comportamento da energia elétrica e a criação do fator de potência pela interação das cargas com a finalidade de corrigir e controlar a potência reativa. A metodologia empregada foi baseada em estudos bibliográficos por meio de livros e artigos. Verificou-se que é possível controlar a potência reativa pela instalação dos bancos de capacitores, compreendeu-se que em uma instalação industrial onde se encontra diversos circuitos com algumas transformações de tensão, a utilização dos bancos de capacitores pode ser empregada em diversos pontos, como na subestação primária, subestação secundária, em alguns grupos de cargas e até mesmo em uma carga específica. Embora existam várias formas de controle, entende-se que as indústrias devem seguir o padrão definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica, determina-se que o fator de potência deve ser superior a 0,92. Com isso, este estudo definiu que o fator de potência pode ser controlado e em função disso, o desperdício de energia elétrica será reduzido.

Palavras-chave: Energia Elétrica. Potência Reativa. Indústria.

ALVES LEITE, Adilson. **Analysis of the behavior of electrical energy for correction of the power factor in industrial electrical installations**. 2020. 47 sheets. Course conclusion paper in Electrical Engineering Department, Taubaté University, Taubaté, 2020.

ABSTRACT

The present work tries to show the behavior of the electrical energy in the industries, in order to understand the classifications of the different types of equipment and their ways of interacting with the installation. The power factor is the difference between the power delivered, by the power used, that is, not all the energy that is applied in the circuit is consumed to perform work. Examples of inductive loads are motors and transformers which, in order to carry out their work, create a magnetic field in their windings, and consequently generate the reactive power that in the electrical installation brings innumerable damages such as the waste of electric energy. Therefore, the objective of this work was to understand the behavior of the electric power, the creation of the power factor by the interaction of the loads with the purpose of correcting and controlling the reactive power. The methodology used was based on bibliographic studies through books and articles. It was verified that it is possible to control the reactive power by the installation of the capacitor banks, it was understood that in an industrial installation where there are several circuits with some voltage transformations, the use of capacitor banks can be used in several points, such as in the primary substation, secondary substation, in some groups of loads and even in a specific load. Although there are several forms of control, it is understood that the industries must follow the standard defined by the National Electric Energy Agency, it is determined that the power factor should be greater than 0.92. With this, this study defined that the power factor can be controlled and as a result, the waste of electric energy will be reduced.

Key-words: Electricity. Reactive Power. Industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Senoides da tensão e corrente nas resistências.....	18
Figura 2 – Senoides da tensão e corrente nas indutâncias.....	19
Figura 3 – Senoides da tensão e corrente nas cargas capacitivas.....	20
Figura 4 – Soma vetorial das impedâncias.....	21
Figura 5 – Triângulo retângulo de potência.....	22
Figura 6 – Senoides da tensão, corrente e potência nas cargas reativas.....	23
Figura 7 – Faixa permissível para o fator de potência pela atual legislação.....	28
Figura 8 – Banco de capacitor fixo.....	30
Figura 9 – Ligação de bancos de capacitores automáticos.....	31
Figura 10 – Banco de capacitor automático.....	32
Figura 11 – Controlador do fator de potência.....	32
Figura 12 – Fluxograma de funcionamento de um banco de capacitor automático.....	33
Figura 13 – Diagrama vetorial.....	35
Figura 14 – Correção do fator de potência em alta tensão.....	38
Figura 15 – Correção na entrada de energia em baixa tensão.....	39
Figura 16 – Correção do fator de potência por grupo de cargas.....	39
Figura 17 – Correção do fator de potência junto a carga localizada.....	40
Figura 18 – Correção mista do fator de potência.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação da potência do Trafo em função do fator de potência.....	27
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relações Trigonométricas.....	24
Quadro 2 – Variação da seção transversal do cabo em função do fator de potência.....	27

Sumário

1. INTRODUÇÃO	184
1.1 OBJETIVO	185
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	186
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	187
2.1 ENERGIA ELÉTRICA.....	177
2.1.1 TIPOS DE CARGA	188
2.1.2 INTERAÇÃO DAS CARGAS	211
2.2 FATOR DE POTÊNCIA	233
2.2.1 CONSEQUÊNCIAS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA	266
2.2.2 LEGISLAÇÃO (RESOLUÇÃO ANEEL).....	268
2.2.3 CAUSAS DO FATOR DE POTÊNCIA.....	289
2.2.4 TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES	30
2.2.4.1 BANCOS DE CAPACITORES FIXOS	30
2.2.4.2 BANCOS DE CAPACITORES AUTOMÁTICOS.....	31
2.2.4.3 BANCOS DE CAPACITORES PROGRAMÁVEIS	34
2.2.5 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	35
2.2.6 VANTAGENS DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	37
2.2.7 FORMAS DE CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	388
3. METODOLOGIA	43
4. COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES	44
5. CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais assuntos discutidos no mundo é a eficiência energética. Com o crescimento da população e da tecnologia por meio da globalização fez-se necessário buscar meios de diminuir o desperdício de energia elétrica.

As indústrias são grandes consumidoras e representam uma parcela significativa no consumo de energia. Os equipamentos utilizados são motores, transformadores, fornos de indução, máquinas de solda, reatores, que para realizarem o seu trabalho necessitam de energia reativa. Esta energia quando utilizada de uma forma descontrolada torna-se um distúrbio e acaba fazendo com que o consumo de energia seja maior. Ao invés de ser consumida ela é desperdiçada.

É importante ressaltar que este tema é extremamente importante para sociedade. Sem este desperdício os equipamentos são preservados, os investimentos em novas tecnologias são maiores e em outro aspecto não menos importante é que muitos recursos naturais são preservados.

Estes equipamentos geram um baixo fator de potência. Dessa forma, como é gerado o fator de potência em um sistema industrial e qual a maneira de analisá-la e corrigi-la? Com isso, o objetivo principal foi compreender como funciona uma instalação elétrica industrial para demonstrar os meios de corrigir o fator de potência. Para atingir este objetivo fez-se necessário: entender como a energia elétrica interage com estes tipos de equipamentos, compreender como é criado o fator de potência e apresentar os meios de correção e controle da interação destas cargas.

A metodologia adotada a fim de cumprir este propósito foi através de uma pesquisa puramente bibliográfica, fundamentada nas literaturas presentes que abordam este assunto, na qual foi realizada uma consulta por meio de livros, manuais, artigos.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi realizar um estudo abrangente sobre o comportamento da energia elétrica nas instalações indústrias que segundo estudos bibliográficos tem um grande potencial para serem desenvolvidas formas de compreender e controlar o fator de potência por meio dos bancos de capacitores.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho foi organizado através de um estudo realizado sobre o tema escolhido, estudo esse feito em modo de pesquisas, onde foram utilizados artigos *online*, livros, revistas e meu local de trabalho, onde é realizado o controle do fator de potência com banco de capacitores onde pode-se fotografar, realizar pesquisas e compreender melhor sobre o assunto.

Para a documentação, todas as ideias obtidas foram organizadas no aplicativo Word, onde a formatação seguiu as regras das normas ABNT, além dessa ferramenta, foram utilizados aplicativos para auxílio na organização da pesquisa e armazenamento de *backups* da documentação, sendo eles Excel, Note Pad, Google Planning e Google Drive.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ENERGIA ELÉTRICA

Capelli (2013, p.17) afirma que fisicamente, energia é a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de fornecer. Ela não pode ser criada, consumida ou destruída, apenas transformada.

Energia elétrica é a capacidade de uma corrente elétrica realizar trabalho. A aplicação de uma diferença de potencial entre dois pontos de um condutor, gerando uma corrente elétrica entre seus terminais, entende-se como energia elétrica. Em termos elétricos, a potência (P) é o produto da diferença de potencial com a intensidade de corrente elétrica que percorre um dado circuito, em outras palavras, nada mais é do que o produto da tensão (U) pela corrente (I) (RODRIGUES, 2012).

E é representada pela Equação 1.

$$P = I \cdot U \quad (1)$$

Onde:

P = Potência é o que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo, dada em Watt (W).

I = Corrente elétrica é a taxa temporal do fluxo de carga elétrica por um condutor ou elemento de circuito. A unidade é o Ampère (A), que equivale a coulombs por segundo (C/s). (HAMBLEY, 2016, p.5).

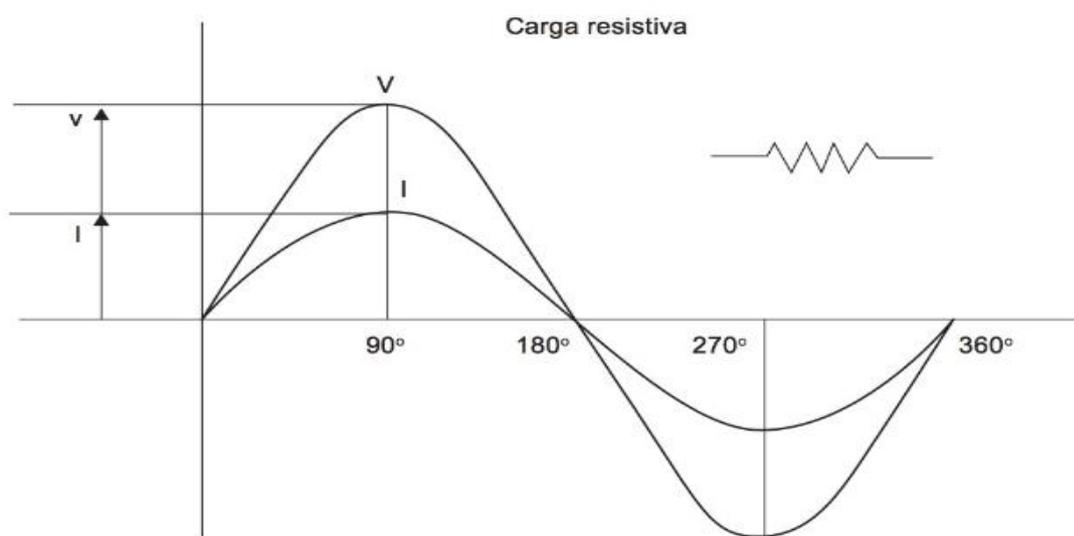
U = A tensão elétrica é uma grandeza elétrica, também chamada de diferença de potencial, força eletromotriz, ou seja, é a capacidade que a carga elétrica tem de realizar trabalho. A unidade é o Volt (V). (MENDES, 2010).

Este sistema acontece a partir de uma análise de um sistema puramente resistivo. No entanto, a maioria dos circuitos são grandes portadoras de cargas não lineares, como as indústrias.

2.1.1 TIPOS DE CARGA

Encontra-se em circuitos elétricos cargas resistivas, indutivas e capacitivas. A principal característica das cargas resistivas é o fato de que a senoide da tensão e corrente passam pelos valores máximo, zero e mínimo simultaneamente, ou seja, a tensão e a corrente estão em fase, como mostra a Figura 1 (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

Figura 1: Senoide da tensão e corrente nas resistências



Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 68.

Em interação, encontra-se as cargas indutivas que são equipamentos compostos por bobinas ou indutores. Ao serem energizados, produzem um retardo na circulação de corrente, este retardo se dá pela criação de campos magnéticos. Diante deste fato, entende-se que a senoide da corrente está atrasada em relação à tensão, a senoide da corrente em um circuito ideal está atrasada em 90° conforme mostra a Figura 2 (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

Segundo Capelli (2013, p.76) a tensão em um circuito puramente indutivo está 90° adiantada em relação à corrente. Portanto, o indutor não é uma carga linear. A dificuldade na circulação de corrente se deve pela reatância indutiva (X_L), dada pela Equação 2.

$$X_L = 2\pi fL \quad (2)$$

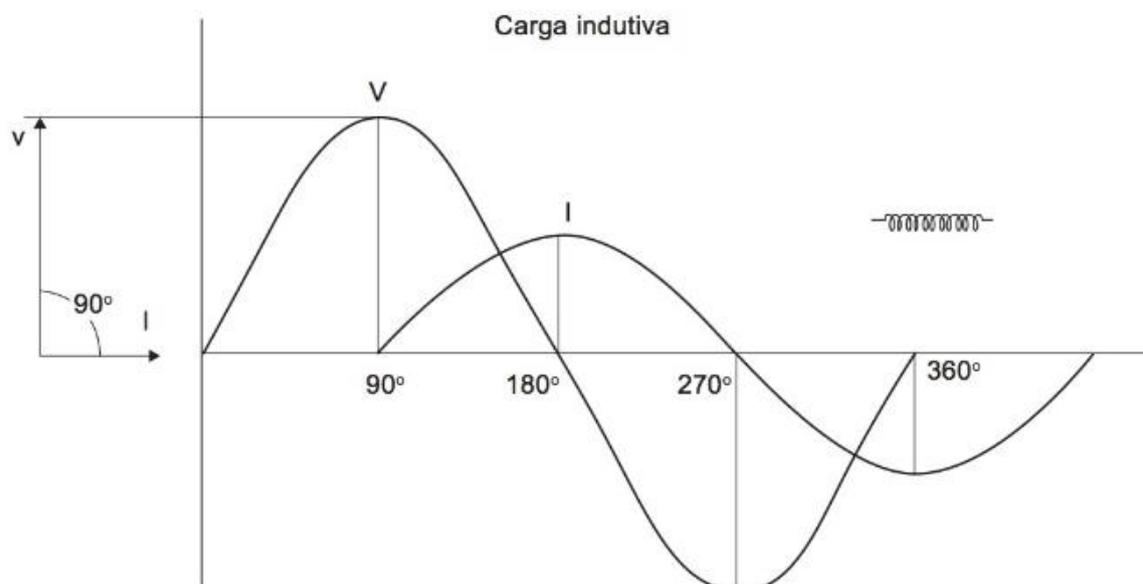
Onde:

X_L : Reatância Indutiva.

f: frequência.

L: Indutância.

Figura 2: Senoides da tensão e corrente nas indutâncias



Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 69.

De acordo com Mamede Filho (2017, p.162):

Os capacitores são equipamentos capazes de acumular eletricidade. São constituídos basicamente de duas placas condutoras postas frontalmente em paralelo e separadas por um meio qualquer isolante, que pode ser ar, papel, plástico, etc. Nas faces externas dessas placas, liga-se uma fonte de tensão que gera um campo eletrostático no espaço compreendido entre as duas placas.

As cargas capacitivas são elementos compostos por capacitores que acumulam energia ao longo do tempo e ao mesmo oferecem resistência à circulação de corrente que se deve a reatância capacitiva (XC). Portanto, ele não é uma carga linear e a tensão está atrasada em 90° em relação à corrente elétrica, sendo que o seu cálculo se encontra pelos dados obtidos a partir da Equação 3 (Capelli, 2013).

$$XC = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3)$$

Onde:

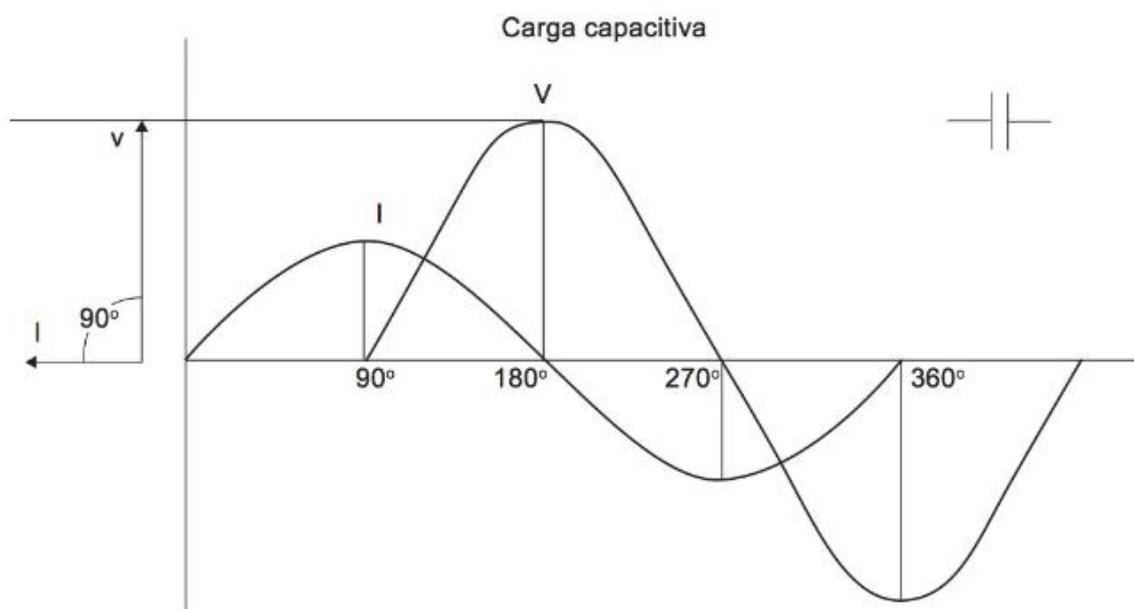
XC: Reatância Capacitiva.

F: frequência

C: Capacitância.

A Figura 3 mostra a interação da potência em uma carga capacitiva, ou seja, a corrente está adiantada em 90° em relação a tensão.

Figura 3: Senoides da tensão e corrente nas cargas capacitivas



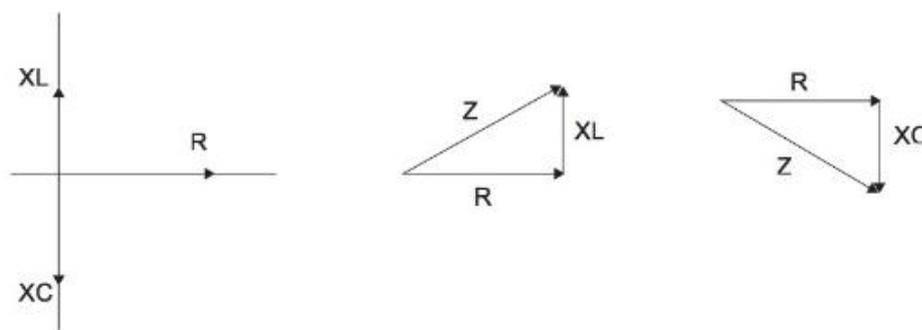
Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 69.

2.1.2 INTERAÇÃO DAS CARGAS

Em um circuito de corrente alternada encontra-se a interação de cargas resistivas, indutivas e capacitivas. Baseado em Capelli (2013) se todas as cargas fossem puramente resistivas, não haveria variação de corrente e tensão. As cargas não lineares não se comportam desta maneira. Uma parcela de energia aplicada em uma carga não linear é perdida.

A reatância nas cargas não lineares gera uma resistência que é chamada de impedância (Z), medida em Ohm (Ω). A Figura 4 mostra a relação entre a reatância capacitiva, indutiva e resistiva, ou seja, mostra a soma vetorial das impedâncias (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

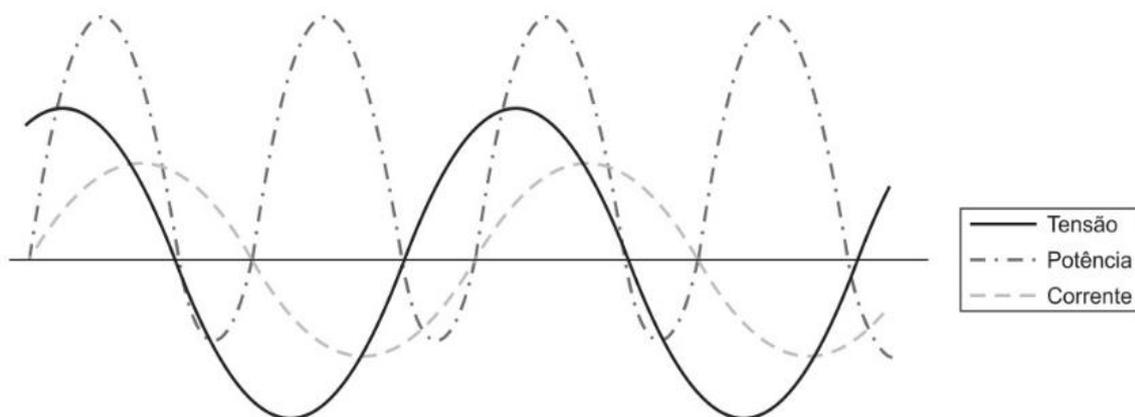
Figura 4: Soma vetorial das impedâncias



Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 70.

Em um circuito de corrente alternada, onde se encontra motores elétricos, transformadores e fornos de indução, observa-se que a potência total é determinada pelo produto da corrente pela tensão. A potência que gera o trabalho não será igual, pois a diferença é consumida pela energia reativa conforme mostra a Figura 5. (NISKIER; MACINTYRE, 2013).

Figura 5: Senoides da tensão, corrente e potência nas cargas reativas.



Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 71.

A energia reativa é consequência do efeito de autoindução na formação do campo magnético pela passagem da corrente nas bobinas dos equipamentos citados. Portanto, o comportamento da energia elétrica ao se deparar com cargas não lineares é variável. Entende-se que esta variação gera o fator de potência (NISKIER; MACINTYRE, 2013).

2.2 FATOR DE POTÊNCIA

Potência é uma grandeza que mede a conversão de energia de uma forma em outra, também é realizado em determinado período, ou seja, é a velocidade com que um trabalho é executado. Como a energia convertida é medida em joules (J) e o tempo em segundos (s), a potência é medida em joules/segundos (J/s). A unidade elétrica de medida é o watt. (BOYLESTAD, 2004).

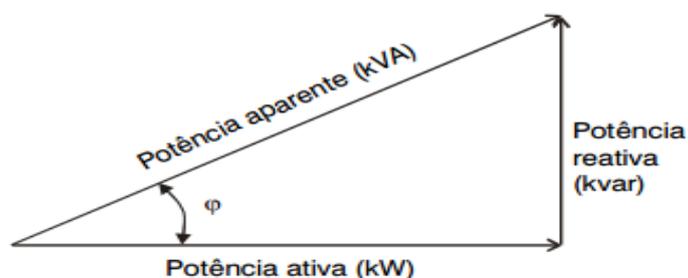
O fator de potência é uma grandeza de muita importância. Baseia-se em parte no impacto econômico que ela tem entre os usuários industriais de grandes quantidades de potência. Também no impacto do desperdício de energia elétrica para todo sistema de geração, transmissão e distribuição. (IRWIN, 2000)

A potência que verdadeiramente realiza o trabalho é a potência ativa cujo valor é expresso em Watt (W), representada pela letra (P) (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

A potência reativa é usada para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas cujo valor é medido em (VAR), representada pela letra (Q). Assim, a potência ativa é sempre absorvida na consumação de trabalho e a potência reativa é aquela que circula entre a fonte de alimentação e a carga, ocupando um espaço no sistema elétrico (WEG, 2009, p.7). Embora o produto da tensão pela corrente nem sempre seja igual à potência fornecida, trata-se de um parâmetro útil para descrição e análise de circuitos de corrente alternada, para a especificação de componentes e sistemas senoidal e para especificação de componentes e sistemas elétricos. A potência aparente é obtida pela soma vetorial da potência ativa junto à potência reativa, ou seja, é a potência total do sistema. A potência aparente é expressa em (VA), representada pela letra (S). (BOYLESTAD, 2004).

Empregando as relações trigonométricas no triângulo, denominado triângulo das potências representado pela Figura 6.

Figura 6: Triângulo retângulo de potência



Fonte: WEG, 2009, p. 7.

Para determinar a relação trigonométrica para as cargas, segue o Quadro 1 qual representa os cálculos para cargas monofásicas e trifásicas onde encontra-se os cálculos para determinar a potência.

Quadro 1: Relações Trigonométricas

Para as cargas monofásicas	Para as cargas trifásicas:
$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
$Q = P \times \tan \phi$	$Q = P \times \tan \phi$
$S = V \times I$	$S = \sqrt{3} \times V \times I$
$P = S \times \cos \phi$	$P = S \times \cos \phi$
$P = V \times I \times \cos \phi$	$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$
$Q = S \times \sin \phi$	$Q = S \times \sin \phi$
$Q = V \times I \times \sin \phi$	$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi$

Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 73.

A razão entre a potência ativa e a potência aparente indica a eficiência do uso da energia. Um alto fator de potência indica uma eficiência alta e inversamente um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética. (WEG, 2009, p. 7).

Estabelece-se como o cosseno do ângulo (ϕ) construído entre a potência ativa e a potência aparente. É um número entre zero e um, se o fator de potência for igual a um a energia gerada será consumida pela carga, se o fator de potência foi igual à zero a energia será devolvida a fonte, ou seja, é um número adimensional que representa a quantidade de potência que gera o trabalho (BOYLESTAD, 2004).

A Equação 4 que o representa é:

$$Fp = \cos\phi \quad (4)$$

A Equação 5 representa o $\cos\phi$.

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

Dessa forma, enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de um trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte pelo campo magnético, ocupando o lugar no sistema elétrico que poderia ser utilizado para circular mais energia ativa. (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

Para controlar e estabelecer os parâmetros, a ANEEL que é uma agência reguladora do Governo Federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, que tem a atribuição de regular e fiscalizar a prestação dos serviços de produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica relata a legislação vigente, decretada pela resolução 414 de 09/10/2010 e alterada pela resolução 569 de 23/07/2013, que disciplina o limite de energia reativa para 0,92 indutivos e 0,92 capacitivos para o controle do fator de potência (MAMEDE FILHO, 2017).

2.2.1 CONSEQUÊNCIAS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

- Nas instalações elétricas ocorrem a perdas de energia em forma de calor que ocorrem pelo efeito Joule, proporcionais ao quadrado do valor da corrente total resultante da soma vetorial das correntes ativa e reativa;
- Quedas de tensão pelo aumento excessivo de energia reativa, podendo gerar sobrecarga e interrupção no fornecimento de energia, podem provocar ainda a diminuição da intensidade luminosa das lâmpadas e o aumento da corrente nos motores;
- Maiores investimentos na instalação elétrica, pela necessidade de maiores bitolas em função das elevadas correntes, representado pelo Quadro 2;
- Maiores investimentos em transformadores e dispositivos de proteção em função de maiores correntes presentes na instalação, a Tabela 1 apresenta uma comparação da relação do fator de potência e a potência de um transformador;
- Para os consumidores, o acréscimo na conta de energia elétrica em função do pagamento de multas por um baixo fator de potência (WEG, 2009, p.7).

Quadro 2: Variação da seção transversal do cabo em função do fator de potência.

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

Fonte: Weg, 2009, p. 8.

Tabela 1: Variação da potência do Trafo em função do fator de potência.

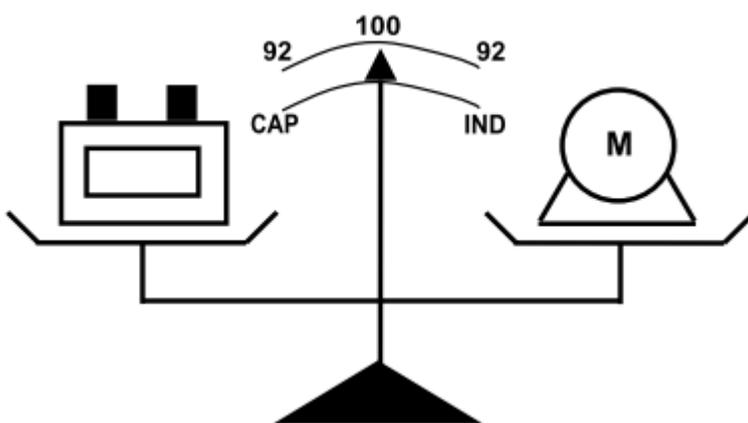
Fator de Potência	Potência do Trafo (KVA)
0,50	750
0,80	469
0,92	408
1,00	375

Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 73.

2.2.2 LEGISLAÇÃO (RESOLUÇÃO ANEEL)

Como mencionado anteriormente, a potência reativa não desempenha nenhum papel, mas é essencial para o correto funcionamento de alguns sistemas, portanto, a potência reativa deve ser transmitida da fase de geração de energia para a unidade usuária. Essa energia será convertida em receita. A Resolução nº 414 da Administração Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de setembro de 2010, determinou o valor mínimo do fator de potência de referência (indutivo ou capacitivo) do dispositivo elétrico da unidade de energia elétrica para 0,92, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7: Faixa permissível para o fator de potência pela atual legislação



Fonte: (CODI, 2004)

Por meio da Resolução 456, a Aneel determinou que o fator de potência dos consumidores industriais é de no mínimo 0,92 (92%), ou seja, se o fator de potência do cliente for inferior a este valor, ele deverá pagar a multa apurada da seguinte forma: multa = conta de luz o preço x $(0,92 / \text{fator de potência} - 1)$. Por exemplo, se uma indústria calcula um fator de potência de 0,85 (85%) em um determinado mês, ela pagará multa de 8,235% sobre o valor da conta de luz.

Segundo Fragoas (2008), esta legislação em específico reforça os seguintes fundamentos:

1. Necessidade de liberação da capacidade do sistema elétrico nacional;
2. A importância do uso racional da energia elétrica;
3. Redução no consumo de energia reativa indutiva, a qual pode vir a provocar sobrecarga nos sistemas das empresas fornecedoras e concessionárias de energia elétrica;
4. Redução no consumo de energia reativa capacitiva, a qual pode vir a provocar elevação da tensão no sistema de suprimento, havendo necessidade de investimento na aplicação de equipamentos corretivos e realização de procedimentos operacionais nem sempre de fácil execução;
5. Criação de condições para que os custos de expansão do sistema elétrico nacional sejam distribuídos para a sociedade de forma justa.

2.2.3 CAUSAS DO FATOR DE POTÊNCIA

As possíveis causas do fator de potência são:

- Grande número de motores de pequena potência;
- Forno a arco;
- Fornos de indução eletromagnética;
- Máquina de solda a transformador;
- Reatores inseridos nos sistemas de iluminação. Como as lâmpadas fluorescentes, vapor de mercúrio e vapor de sódio;
- Motores de indução trabalhando com pequenas cargas, superdimensionados ou até mesmo em vazio, pois possuem como característica absorver da rede praticamente a mesma quantidade de energia reativa quando operando em vazio ou a plena carga; e
- Transformadores interligados a pequenas cargas, analogamente aos motores superdimensionados em relação à carga conectada, absorvem do sistema uma grande quantidade de energia reativa, a qual é imprescindível para a magnetização do seu núcleo (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

Entende-se que para controlar o fator de potência é preciso corrigir o mesmo para equilibrar o circuito. Portanto, deve-se analisar como o circuito se comporta para definir a forma de correção.

2.2.4 TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES

Segundo Kikushi (2015), o tamanho do banco de capacitores deve ser determinado de acordo com as características e requisitos da carga conectada a ele. Portanto, existem três tipos principais de bancos de capacitores, que serão descritos a seguir.

2.2.4.1 BANCOS CAPACITORES FIXOS

Este tipo de banco de capacitores tem um valor de capacitância fixo e geralmente é dedicado a circuitos ou dispositivos individuais, pois são projetados para corrigir o fator de potência em condições especiais. Segundo Barreto (2017), a utilização de bancos fixos é o método mais fácil e econômico, por isso os bancos fixos são tão amplamente utilizados no fator de potência fixa. Um exemplo realista do banco de capacitor fixo está representado na Figura 8.

Figura 8: Banco de capacitor fixo



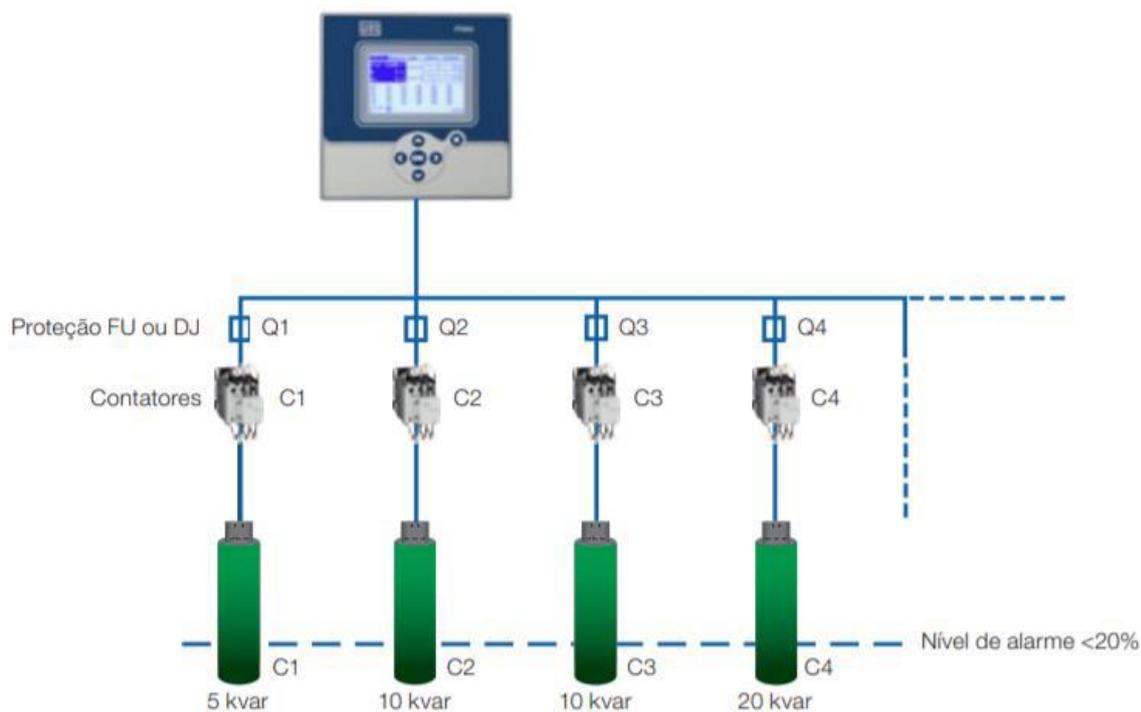
Fonte: Próprio autor.

2.2.4.2 BANCOS CAPACITORES AUTOMÁTICOS

Este tipo de banco de capacitores recebe instruções por meio de software para operar em um horário pré-determinado. Isoni (2009) destacou que de acordo com a demanda instantânea de potência reativa do equipamento, a biblioteca de armazenamento automático costuma ser utilizada para correção global de diversas indústrias, o que promove o controle dinâmico do fator de potência quando a operação manual não é possível. Portanto, através da lógica do algoritmo interno, o controlador pode decidir se deseja inserir ou remover o reator capacitivo na rede.

Um exemplo do esquemático de um banco capacitor automático está representado na Figura 9, tendo também referência realística nas Figuras 10 e 11.

Figura 9: Ligação de bancos capacitores automáticos



Fonte: Próprio autor.

Figura 10: Banco de capacitor automático



Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Controlador do fator de potência

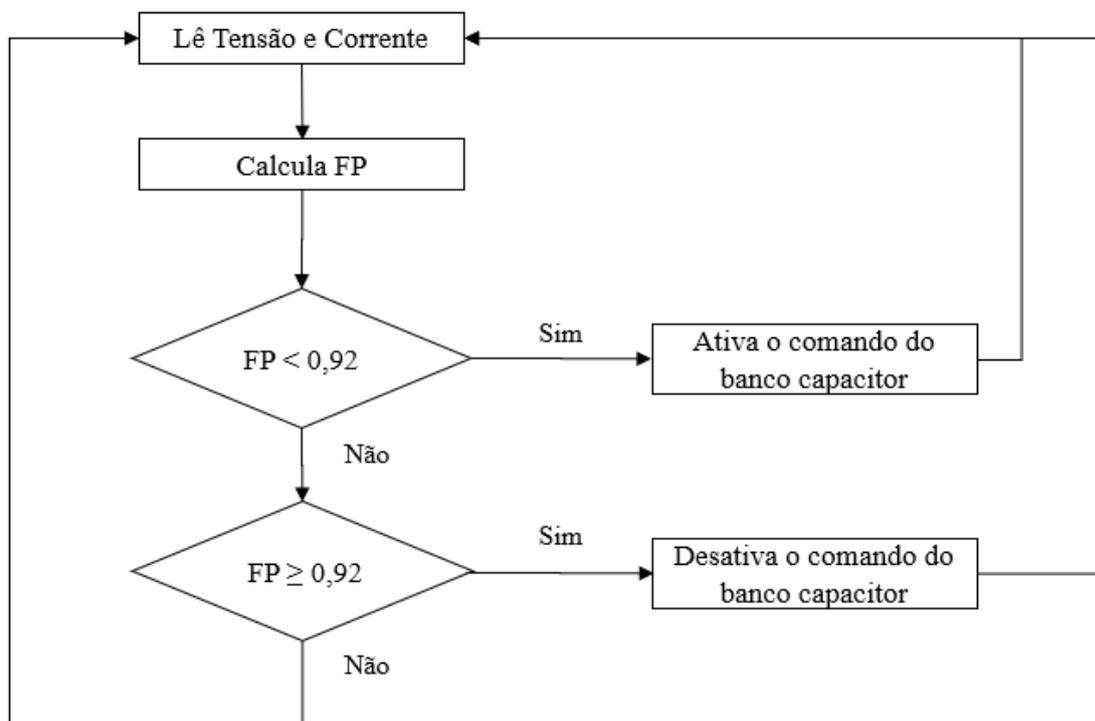


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 9, existem várias unidades de capacitores representando diferentes estágios do banco de capacitores. Quando a correção de FP precisa atingir um valor específico de energia reativa do capacitor, ela geralmente é diferenciada e separada em estágios no BC, que normalmente não é tão alto nem tão baixo, pois o excesso de energia reativa do capacitor também não é necessário ao sistema. Por esse motivo, algumas unidades capacitivas do banco de capacitores têm diferentes valores de potência reativa.

A Figura 12 representa um fluxograma mostrando os processos principais de funcionamento de um banco capacitor automático.

Figura 12: Fluxograma de funcionamento de um banco capacitor automático



Fonte: Próprio autor.

2.2.4.3 BANCO DE CAPACITORES PROGRAMÁVEIS

Ideal para centros de carga pequenos e médios com curvas de demanda de perfil estáveis, cumpre totalmente os regulamentos atuais e atua na conexão do sistema durante o tempo de indução e desconecta durante o período capacitivo.

A conexão é protegida de acionamento intermitente, que reproduz o "buzzer" da bobina do contator através de um relé temporizador.

2.2.5 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

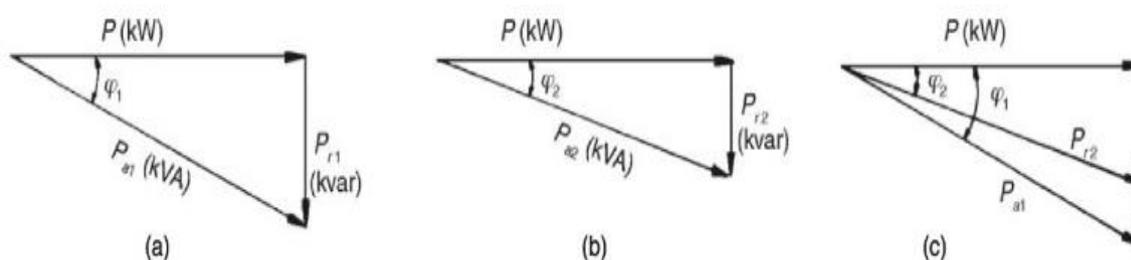
A correção do fator de potência se faz necessária para atender o mínimo exigido de energia reativa dentro dos sistemas que é 0,92, tanto em reativo capacitivo quanto reativo indutivo. Como a maioria das cargas é indutiva, a utilização de capacitores para corrigi-la é imprescindível (MENDES, 2010).

Embora os capacitores elevem os níveis de tensão, é raramente econômico instalá-los em estabelecimentos industriais apenas para esse fim. A melhoria da tensão deve ser considerada como um benefício adicional dos capacitores. A tensão em qualquer ponto de um circuito elétrico é igual à da fonte geradora menos a queda de tensão até aquele ponto. Assim, se a tensão da fonte geradora e as diversas quedas de tensão forem conhecidas, a tensão em qualquer ponto pode ser facilmente determinada. Como a tensão na fonte é conhecida, o problema consiste apenas na determinação das quedas de tensão (WEG, 2009).

O objetivo de utilizar os capacitores é incorporar capacitância em um circuito elétrico, equilibrando ou neutralizando o efeito de indução das cargas indutivas (NISKIER; MACINTYRE, 2013).

Conforme mostra a Figura 13, a redução do fator de potência estabiliza-se a partir do momento que o circuito é tratado com compensação capacitiva.

Figura 13: Diagrama vetorial



Fonte: NISKIER; MACINTYRE, 2013, p 275.

A possibilidade de utilizar o banco de capacitores é por meio fixo, com acionamento semiautomático e por acionamento automático.

O banco de capacitor fixo é empregado praticamente para cargas indústrias que de fato, não variam ao longo de uma curva de carga diária. Sendo assim, a porção de reativos fornecidos para a melhoria do fator de potência não varia ao longo do período de operação (NISKIER; MACINTYRE, 2013).

O banco de capacitores com acionamento semiautomático é obtido pela utilização de programadores horários, que ligam ou desligam, na hora programada, contadores que conectam ou desconectam o banco de capacitores (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

O banco de capacitores com acionamento automático é utilizado em instalações que sofrem com a variação constante da curva de carga reativa. Utiliza-se um dispositivo conhecido como controlador, que possui a característica de calcular o fator de potência da instalação utilizando os sinais de tensão e de corrente que recebe provenientes do emprego de transformadores de corrente (TCs). A saída do controlador é normalmente interligada a contadores especiais, que são os responsáveis pelo acionamento ou desligamento dos capacitores, permitindo fornecer a quantidade necessária de reativos diante das necessidades da instalação (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

2.2.6 VANTAGENS DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

As vantagens da correção de fator de potência para as indústrias são:

- Atenuação de energia reativa nas instalações elétricas;
- Acréscimo da eficiência energética das empresas;
- A vida útil dos equipamentos e instalações;
- Redução da corrente reativa na rede elétrica;
- Ganho na capacidade dos condutores e dispositivos de manobra;
- Aperfeiçoamento no nível de tensão em razão da redução das perdas por Joule;
- Contração das faturas de energia elétrica em função da ausência da cobrança de ultrapassagem do fator de potência (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

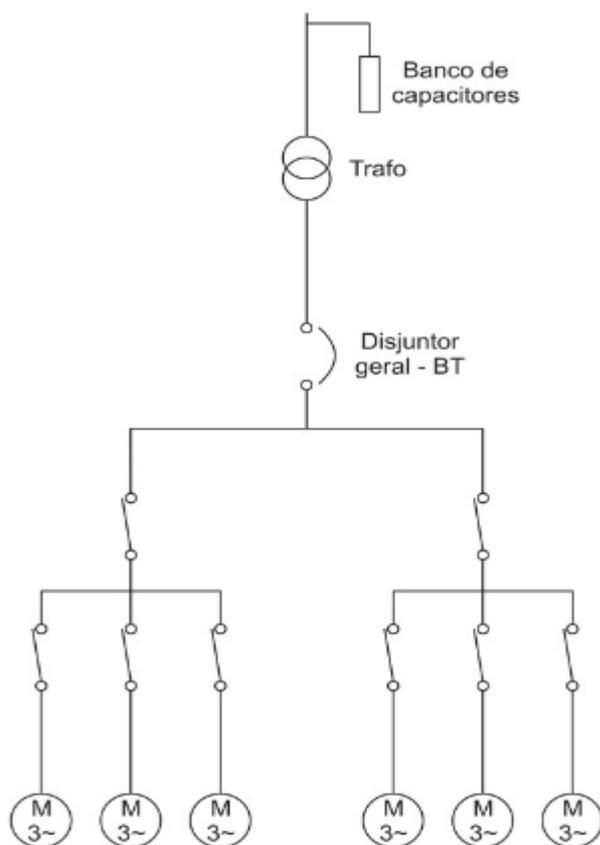
As vantagens da correção de fator de potência para concessionária são:

- O bloco de potência reativa deixa de circular no sistema de transmissão e distribuição;
- Evita as perdas pelo efeito Joule;
- Aumenta a capacidade do sistema de transmissão e distribuição para conduzir o bloco de potência ativa;
- Aumenta a capacidade de geração com intuito de atender mais consumidores;
- Diminui os custos de geração (WEG, 2009, p.9).

2.2.7 FORMAS DE CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

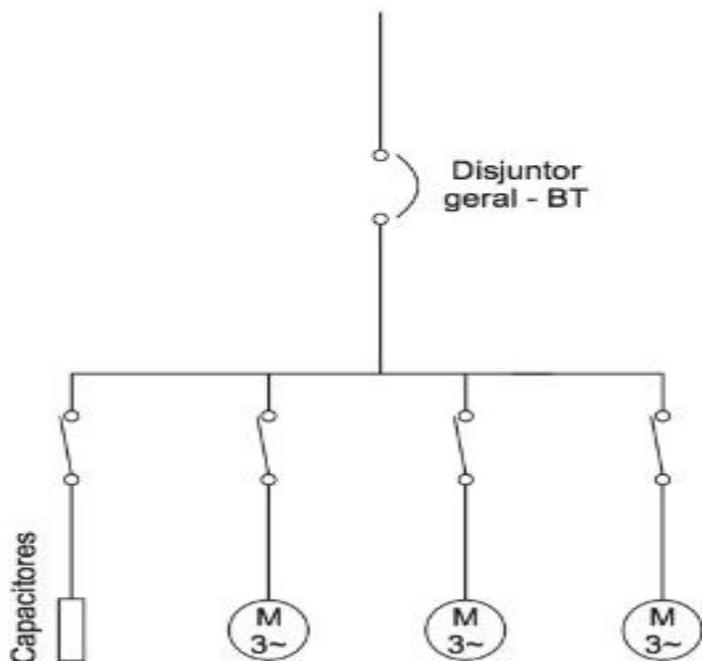
Correção na entrada da energia de alta tensão reabilita o fator de potência visto pela concessionária, permanecendo internamente todos os inconvenientes citados pelo baixo fator de potência e o custo é elevado (WEG, 2009). A Figura 14, mostra a correção do fator de potência em alta tensão.

Figura 14: Correção do fator de potência em alta tensão



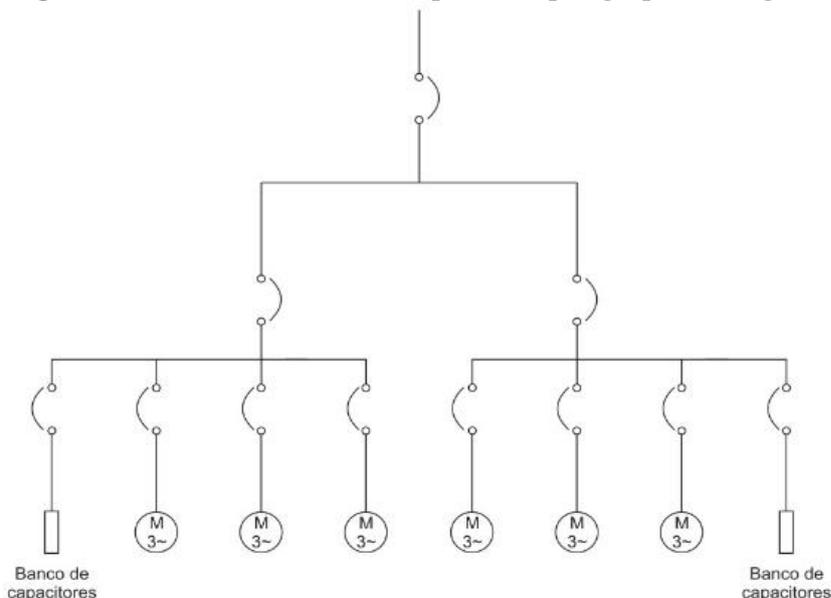
Fonte: Gedra, Barros; Borelli, 2014, p 77.

Correção na entrada de energia em baixa tensão é utilizada em instalações elétricas que possuem grande número de cargas com fator de potência desigual entre si e regime de aplicação pouco uniforme representada pela Figura 15. Neste caso geralmente é utilizado um banco de capacitor. A desvantagem desse tipo de retidão consiste em não aliviar os alimentadores pertencentes a cada equipamento (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

Figura 15: Correção na entrada de energia em baixa tensão

Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 77.

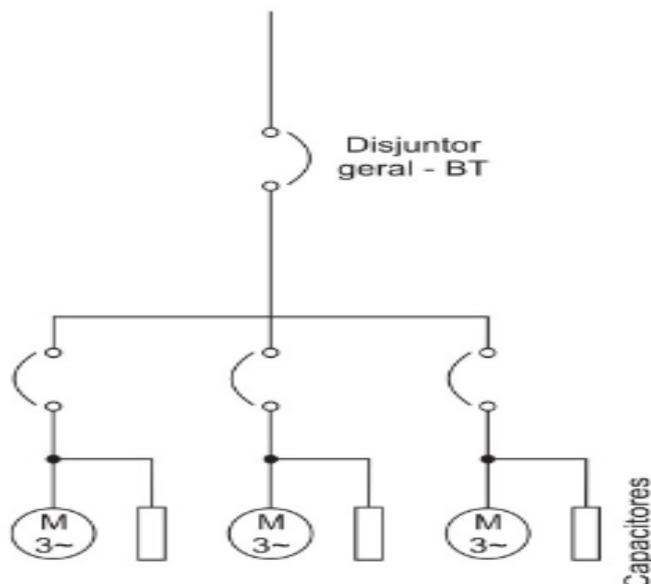
Correção por grupos de cargas obtêm-se quando o capacitor é inserido em um setor ou um conjunto máquinas maior que 7kw, para corrigir o fator de potência de um grupo de pequenas cargas, representada pela Figura 16. Tem como desvantagem não diminuir a corrente nos circuitos de alimentação de cada carga (WEG, 2009).

Figura 16: Correção do fator de potência por grupo de cargas

Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 77.

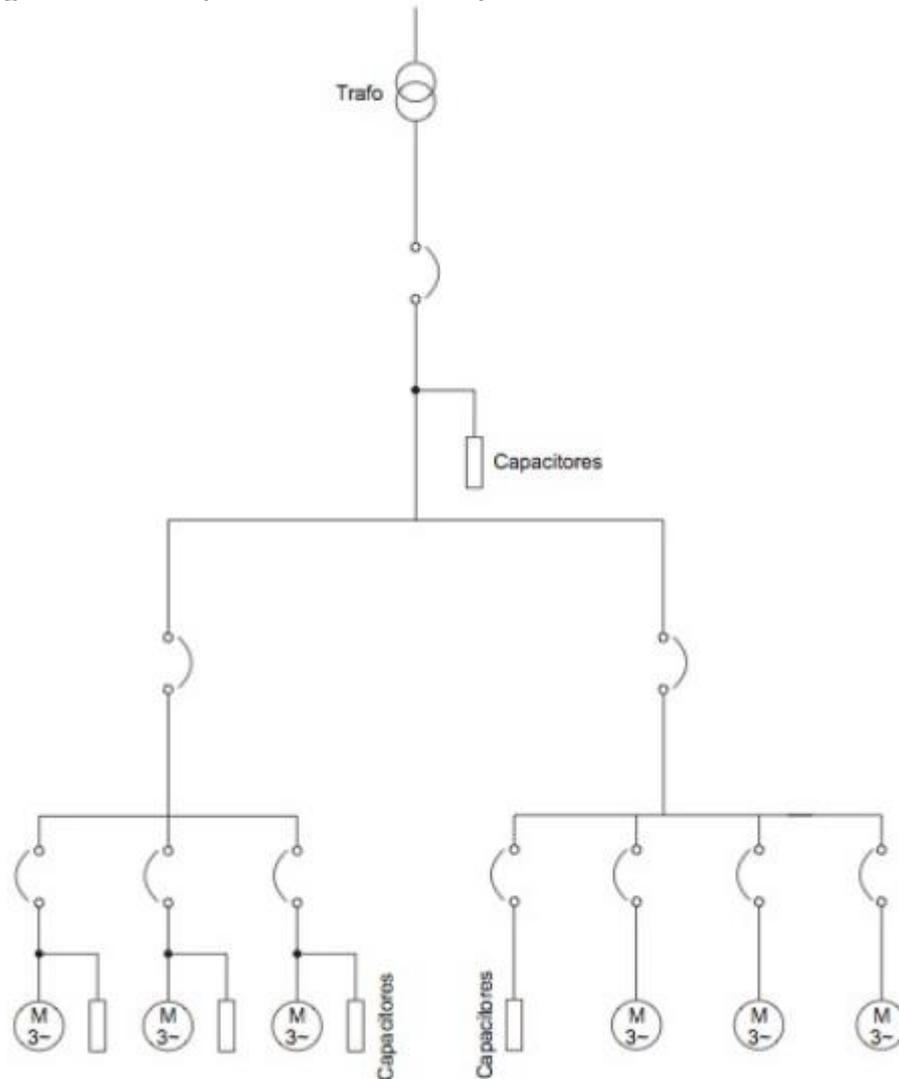
Correção localizada é obtida instalando-se os capacitores junto ao equipamento que se pretende corrigir o fator de potência. Representa do ponto de vista técnico a melhor solução, como mostra a Figura 17. A vantagem é que esta correção minimiza a carga no circuito de alimentação dos equipamentos, restringi as perdas energéticas e concebe potência reativa somente onde é indispensável (WEG, 2009).

Figura 17: Correção do fator de potência junto à carga localizada.



Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 78.

Correção Mista institui-se a convenção de outros métodos anteriormente narrados. Normalmente é instalado um capacitor no secundário do transformador em convenção com a instalação de capacitores junto ao quadro de acionamento de pequenas cargas e outro para a correção localizada das maiores cargas como mostra na Figura 18. Portanto, no ponto de vista de conservação de energia se torna a melhor solução em aspectos práticos e financeiros (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014).

Figura 18: Correção mista do fator de potência

Fonte: Gedra; Barros; Borelli, 2014, p 78.

Para correção mista usam-se os seguintes critérios:

- Instala-se um capacitor fixo diretamente no lado secundário do transformador;
- Motores de aproximadamente 7kw ou mais, corrige-se localmente (cuidado com motores de alta inércia, pois não se deve dispensar o uso de contadores para manobra dos capacitores sempre que a corrente nominal dos mesmos for superior a 90% da corrente de excitação do motor).
- Motores com menos de 7kw corrige-se por grupos.
- Redes próprias para iluminação com lâmpadas de descarga, usando-se reatores de baixo fator de potência, corrige-se na entrada da rede;

- Na entrada instala-se um banco automático de pequena potência para equalização final. Quando se corrige um fator de potência de uma instalação (WEG, 2009).

Entende-se que as instalações industriais predominam cargas indutivas, e há diferentes meios de corrigi-la. Este método é utilizado para diversas situações e necessidades, ou seja, para cada instalação é utilizado um meio de correção do fator de potência por meio dos bancos de capacitores.

3 METODOLOGIA

A Metodologia de pesquisa utilizada durante esse trabalho foi a exploratória aplicada já que o primeiro passo do trabalho foi identificar através de uma pesquisa introdutória a formação da energia e qual o seu comportamento na interação das diversas cargas presentes em uma instalação industrial, através dos conhecimentos gerados pelo estudo pode-se diferenciar os conceitos dos diferentes tipos de cargas e de como elas respondem a energia para determinar a sua potência, ou seja, o trabalho resultante, identificando assim que esta interação se deve as cargas resistivas, indutivas e capacitivas.

Como segundo passo da pesquisa introdutória, ocorreu a compreensão do comportamento da energia elétrica, constatando-se que para um determinado equipamento funcionar parte da energia é contida em enrolamentos e bobinas presentes na grande parte da instalação. Assim foi identificada uma variação na potência instalada para potência consumida, esta diferença foi reconhecida como fator de potência e a partir deste foi caracterizada suas causas e consequências.

Com a pesquisa introdutória finalizada pôde-se entender como o fator de potência é controlado por meio da instalação dos bancos de capacitores que são anexados em diversas partes da instalação por diferentes meios, após a pesquisa introdutória, foi ressaltado um grande problema gerado pelo despreparo de diversas empresas em relação ao controle de fator de potência, sendo assim conclui-se que este problema necessitava de uma ressalva e uma solução, porém a pesquisa gerou indagações visto que, cada caso ainda era específico, e que existem diferentes formas de introduzir um banco de capacitor para a manutenção do fator de potência.

A partir da pesquisa introdutória foram realizadas pesquisas posteriores e mais específicas acerca do assunto escolhido como ressalva do trabalho, com isso compreendeu-se melhor e afinou-se o problema, assim podendo fazer com que a pesquisa do trabalho se envolvesse em uma pesquisa em torno de um fenômeno natural e na aplicação do conhecimento obtido através de estudos para uma usabilidade prática dirigida a soluções de problemas específicos, com tudo pronto e preparado, finalizou-se os estudos com a documentação do mesmo de forma a explicar e exemplificar o projeto e visão do problema ressaltado.

4 COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Durante a realização de pesquisas para a organização deste trabalho foi possível perceber e ressaltar que existe um grande desperdício de potência reativa que causam diversos danos em nosso sistema elétrico, não parando por ai também chamou atenção o fato de que o mesmo não só ocorre em industrias mas também dentro de nossas residências, já que não são apenas industrias que possuem circuitos com bastante indutores, após esse esclarecimento começou-se a discutir em relação ao mesmo e percebeu-se que lâmpadas com reatores, lâmpadas de LED e todos eletrônicos que geram um baixo fator de potência também causam o desperdício de potência reativa, isso por conta da falta de dispositivos de medição do fator de potência para que possam ocorrer correções na rede elétrica do local.

Algo fora do contexto da pesquisa em si que chamou a atenção foi o caso da usabilidade do projeto em si, pois a pesquisa não possui uma pesquisa de base financeira, assim não sabendo se se trata de um projeto realmente viável para a correção do fator de potência, por exemplo, o mesmo poderia ser utilizado para a correção em um domicilio, porém não se sabe se a manutenção e a instalação é algo economicamente positivo, assim começou uma pesquisa em relação à viabilidade projeto, posteriormente, podemos compreender que o projeto se torna viável a partir de determinado tempo, visto que a conta de luz é algo constante e que seria consideravelmente menor com a agregação da correção, sendo algo relativo de caso a caso, já que não se sabe ao certo quantos utensílios ou lâmpadas possuem esse fator de potência fora de controle, porém o projeto se vê muito mais viável em empresas, onde visivelmente o consumo de energia se vê mais abrangente.

Outra discussão gerada sobre o tema foi a falta de controle em diversas empresas e residências do fator de potência, isso gerou o questionamento da ocorrência do fator de potência verificando que é algo simplesmente esquecido por diversas empresas. Através desse questionamento, diversas empresas foram pesquisadas afim de procurar estudar suas medidas para o controle do fator de potência, percebendo que se trata de um assunto que não tem uma ressalva muito grande, sendo assim, conclui-se que muito por conta da falta de interesse em relação a esse assunto, muitas empresas acabam por não se prevenir dele, e acabam por preferirem pagar o preço dessa falta de controle, o que poderia ser facilmente inibido e gerar até mesmo lucros posteriores para muitas empresas.

Por fim uma brecha empresarial a ser explorada está facilmente detectável já que se pode facilmente criar uma empresa ou até mesmo ser autônomo trabalhando nessa área, pois diversas empresas ao compreenderem como o controle poderia ajuda-las, com certeza

contratariam o serviço, sendo assim além de trabalho de conclusão de curso também percebeu-se uma oportunidade empreendedora, visto que se trata de algo que aparentemente até mesmo fora do Brasil causam dores de cabeça para diversos donos de empresa ou até mesmo domicílios com grande distorção em suas contas de luz.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que ao estabilizar o fator de potência toda a instalação é controlada. O desperdício de energia elétrica e a preservação dos equipamentos utilizados são os maiores fatores que fazem com que este estudo seja viável. Portanto, ao atingir o objetivo de controlar a energia e seus gastos, as indústrias poderão gerar novas tecnologias, novos empregos e planejar futuros investimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOYLESTAD, ROBERT L. **INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE CIRCUITOS**. Tradução de José Lucimar do Nascimento; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. 10ª ed. São Paulo: Pearson Hall, 2004.

CAPELLI, Alexandre. **ENERGIA ELÉTRICA: Qualidade e Eficiência para Aplicações Industriais**. São Paulo: Érica, 2013.

GEDRA, Ricardo Luís, BARROS, Benjamim de, BORELLI, Reinaldo. **GERAÇÃO, TRANSMISSÃO, DISTRIBUIÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**. São Paulo: Érica, 2014.

IRWIN, J. David. **ANÁLISE DE CIRCUITOS EM ENGENHARIA**. Tradução de Luis Antônio Aguirre, Janete Furtado Aguirre; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. 4ª ed. São Paulo: Person Makron Books, 2000.

HAMBLEY, Allan R. Energia Elétrica. **Biblioteca Virtual Anhanguera**. Rio de Janeiro, ano 2016. Disponível em:
<<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633266/cfi/6/28!/4/100/4@0:48.9>>. Acesso em: 28/04/2017.

MAMEDE FILHO, João. **INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS**. 9ª ed. rev. atual. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MANUAL para correção de fator de potência, WEG. São Paulo, 2009. 40 p.

MENDES, Filomena. Eletricidade Básica. **E-TEC Brasil**. Cuiabá, ano 2010. Disponível em:
<http://ftp.comprasnet.se.gov.br/sead/licitacoes/Pregoes2011/PE091/Anexos/Inform%Edtica_M%F3dulo_I/ELETRICIDADE_BASICA/ELETRICIDADE_BASICA.pdf>. Acesso em: 29/04/2017.

NISKIER, Julio; MACINTYRE, Archibald Joseph. **INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

RODRIGUES, Fidel Junqueira. **Correção de Fator de Potência**. 2012. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)- Universidade São Francisco, Itatiba, 2012.