

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO  
Curso de Engenharia Elétrica

DANIEL BERTI THOMAZINI

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA:  
VANTAGENS E DESVANTAGENS

Itatiba

2011

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO  
Curso de Engenharia Elétrica

DANIEL BERTI THOMAZINI

CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA:  
VANTAGENS E DESVANTAGENS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade São Francisco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: M.e. Marcos Rosa Santos

Itatiba

2011

THOMAZINI, Daniel Berti. **Correção do Fator de Potência**. Itatiba, 2011. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.

---

Profº M.e. Marcos Rosa Santos (orientador)

Universidade São Francisco

---

Profº M.e. Renato Franco de Camargo (examinador)

Universidade São Francisco

---

Engº Mauricio Dallacqua Franceschini (examinador)

Coca-Cola Femsa

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a oportunidade de viver e poder adquirir o conhecimento, agradeço também a minha família que me apoiou e me deu força para aceitar o desafio e cumpri-lo com muita determinação e coragem e a minha noiva Juliana dos Santos, que nas horas mais difíceis me deu o suporte para enfrentar as dificuldades e superá-las.

E finalmente agradeço aos Mestres que com dignidade conseguiram passar seus conhecimentos e experiências já vividas, nos transformando em profissionais competentes e responsáveis.

*A mente que se abre a uma nova idéia  
jamais voltará ao seu tamanho original*

*(Albert Einstein)*

## RESUMO

THOMAZINI, Daniel Berti. **Correção do Fator de Potência**. Itatiba, 2011. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.

Atualmente com a necessidade de se economizar energia e com as grandes dificuldades em se construir novas fontes geradoras de energia, há uma enorme procura por estudos que reduzam o consumo de energia que não realiza trabalho, estas são produzidas por motores síncronos, transformadores, inversores de frequência, etc, e são tarifadas pelas concessionárias e pagas pelas indústrias, e no caso, a correção do fator de potência é o principal estudo para a redução deste consumo. Assim este trabalho tem como objetivo avaliar as vantagens e desvantagens da correção do fator de potência para o consumidor e para as concessionárias de energia, de forma a apresentar toda a estrutura de cálculo, as formas de faturamento do consumo de energia determinado pela ANEEL, órgão regulamentador, as principais causas para o baixo fator de potência, os benefícios para a correção e a partir de uma metodologia, apresentar dispositivos que atualmente são os mais utilizados e os que possuem os melhores resultados, e finalmente apresentar um estudo de caso com medições de potência realizadas de 10 em 10 minutos em uma empresa multinacional do ramo de cosméticos.

**Palavras-chave:** Fator de Potência, Correção do Fator de Potência.

## ABSTRACT

*Nowadays with the need of saving energy and with the great difficulties to build new hydroelectric plants, there's a huge search for studies that reduce the energy consumption which does not do this work, but it is produced by synchronous engines, transformers, frequency inverters, etc and are charged by dealerships and paid by industries. At this case, the correction of power factor is the most study issue to reduce this consumption. This way, this work aims to evaluate the advantages and disadvantages of the correction of power factor for the consumer and for all the power dealerships, presenting all its calculus structure, the billing forms of energy consumption according to ANEEL, the regulator organ, the main causes to the low power factor, the benefits of the correction and from a method shows devices that nowadays are the most used ones and the ones which have the best results. Finally present a case study with power measurements taken from 10 to 10 minutes and a multinational company in the field of cosmetics.*

**Keywords:** *Correction of Power Factor*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Triângulo das Potências .....	3
<b>Figura 2</b> – Triângulo das Potências (a) Impedância Indutiva; (b) Impedância Capacitiva .....	3
<b>Figura 3</b> – Diagrama das Potências .....	4
<b>Figura 4</b> – Comportamento da senóide com tensão e corrente em fase .....	5
<b>Figura 5</b> – Comportamento da senóide em uma carga puramente indutiva, com a tensão adiantada em relação a corrente.....	6
<b>Figura 6</b> – Comportamento da senóide em uma carga puramente capacitiva, com a tensão atrasada em relação a corrente.....	7
<b>Figura 7</b> – Potência média.....	9
<b>Figura 8</b> – Diagrama Fasorial de tensão do circuito RL .....	11
<b>Figura 9</b> – Triângulos das Potências e suas fórmulas .....	11
<b>Figura 10</b> – Triângulo das Potências, Impedância Indutiva .....	12
<b>Figura 11</b> – Triângulo das Potências Impedância Indutiva .....	13
<b>Figura 12</b> - Exemplo de correntes comportando harmônicas, e decomposição da corrente global em seus componentes harmônicos de ordem 1(fundamental), 3,5,7 e 9 .....	15
<b>Figura 13</b> - Fundamental com presença da terceira e quinta harmônica.....	15
<b>Figura 14</b> – Composição da forma de onda .....	16
<b>Figura 15</b> - Espectro de um sinal de componente fundamental 60 Hz, e comportando harmônicas de ordens 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) e 9 (450Hz). .....	16
<b>Figura 16</b> – Exemplo do comportamento de um motor com a variação da carga.....	25
<b>Figura 17</b> – Representação gráfica da liberação da capacidade de um sistema .....	32
<b>Figura 18</b> – Campo elétrico entre placas de um capacitor .....	36
<b>Figura 19</b> – Curva de energização corrente x tempo de um capacitor. ....	39
<b>Figura 20</b> – Resistor de descarga instalado internamente em uma unidade capacitiva. ....	41
<b>Figura 21</b> – Ligação em série de um banco de capacitores. ....	42
<b>Figura 22</b> – Ligação paralela em um banco de capacitores. ....	42
<b>Figura 23</b> - Potência Ativa X Potência Reativa antes da Correção.....	51
<b>Figura 24</b> - Potência Ativa X Potência Reativa antes da Correção.....	52
<b>Figura 25</b> – Potência Liberada para a Concessionária .....	53



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Influencia da variação da tensão no fator de potência.....	24
<b>Tabela 2</b> – Capacitores para motores de baixa tensão.....	26
<b>Tabela 3</b> – Capacitores para motores de média tensão.....	27
<b>Tabela 4</b> – Solicitação de reativos de transformadores em vazio.....	28
<b>Tabela 5</b> – Parâmetros de capacitores de potência .....	47

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b> - Equação Básica do Fator de Potência .....	4
<b>Equação 2</b> – Relação entre Potência Ativa e Potência Reativa.....	5
<b>Equação 3</b> – Equação da potência instantânea.....	9
<b>Equação 4</b> – Valor médio da potência.....	10
<b>Equação 5</b> - Potência.....	10
<b>Equação 6</b> – Equação do triângulo das potências .....	12
<b>Equação 7</b> – Cálculo para faturamento mensal .....	19
<b>Equação 8</b> – Faturamento correspondente ao consumo de energia reativa excedente.....	20
<b>Equação 9</b> – Equação para avaliação horária .....	20
<b>Equação 10</b> – Somatória do Faturamento correspondente ao consumo de energia reativa excedente .....	21
<b>Equação 11</b> – Equação para faturamento de energia grupo B .....	22
<b>Equação 12</b> – Equação de energia economizada em um dado período anual.....	29
<b>Equação 13</b> - Cálculo de potência ativa .....	33
<b>Equação 14</b> - Equação para cálculo de potência aparente.....	33
<b>Equação 15</b> – Equação de capacitores .....	33
<b>Equação 16</b> – Equação para avaliar a quantidade de carga elétrica que um capacitor pode armazenar .....	37
<b>Equação 17</b> – Equação para comparar quantidade de carga elétrica pela proporcionalidade da variação da capacitância.....	38
<b>Equação 18</b> – Equação para calcular a corrente carga média do capacitor.....	38
<b>Equação 19</b> – Equação para calcular a corrente do capacitor no instante t.....	39
<b>Equação 20</b> – Equação para calcular a corrente do projeto .....	47
<b>Equação 21</b> – Calculo do Capacitor .....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
FP	Fator de Potência
Hz	hertz
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
KW	Kilo watts
KVA	Kilo volt amper
KVAr	Kilo volt amper reativo
CCM	Centro de Controle de Motores

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Conceitos básicos.....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. Fator de potência .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1. Energia Ativa, Reativa e Aparente.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2. Energia reativa .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3. Deformação do sinal senoidal e Origem das harmônicas.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.1. Deformação de um sinal senoidal .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3.2. Origem das harmônicas.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. Fornecimento de energia reativa - regulamentação .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1. Princípios da regulamentação.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.2. Cálculo para faturamento mensal .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.3. Avaliação horária.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.4. Faturamento do excedente .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5. Cuidados a serem observados.....</b>	<b>23</b>
<b>2.6. Causas para o baixo fator de potência. ....</b>	<b>23</b>
<b>2.6.1. Nível de tensão acima do nominal .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.2. Motores operando em vazio ou superdimensionados .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.3. Transformadores em vazio ou com pequenas cargas .....</b>	<b>27</b>
<b>2.6.4. Queda de tensão .....</b>	<b>28</b>
<b>2.6.5. Perdas na instalação .....</b>	<b>29</b>
<b>2.6.6. Subutilização da capacidade instalada .....</b>	<b>30</b>

2.6.7. Outras consequências de um baixo fator de potência .....	30
2.7. Benefícios com a correção do fator de potência .....	31
2.7.1. Liberação da capacidade do sistema .....	32
2.7.2. Melhoria da tensão.....	33
2.7.3. Redução das perdas .....	34
3. METODOLOGIA .....	34
3.1. Correção do fator de potência.....	35
3.1.1. Alteração da rotina operacional .....	35
3.1.2. Instalação de motores síncronos .....	35
3.2. Correção a partir de banco de capacitores.....	36
3.2.1. Normas para banco de capacitores. ....	36
3.2.2. Conceitos básicos de um capacitor .....	36
3.2.3. Capacitância .....	37
3.2.4. Energia armazenada.....	38
3.2.5. Corrente de carga .....	38
3.2.6. Características construtivas.....	40
3.2.7. Líquido de descarga.....	40
3.2.8. Resistor de descarga .....	40
3.2.9. Ligação das unidades capacitivas em bancos .....	41
3.2.10. Ligação série .....	41
3.2.11. Ligação paralela .....	42
3.3. Características elétricas .....	43
3.3.1. Potência nominal.....	43
3.3.2. Frequência nominal .....	43
3.3.3. Tensão nominal .....	43
3.4. Banco de capacitores fixos .....	44
3.5. Correção com capacitores individuais .....	44

<b>3.6. Banco de capacitores automáticos .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7. Correção por um sistema de combinação de capacitores .....</b>	<b>45</b>
<b>3.8. Proteção contra corrente de surto .....</b>	<b>45</b>
<b>3.9. Dimensionamento do banco de capacitores .....</b>	<b>46</b>
<b>3.9.1. Método prático .....</b>	<b>46</b>
<b>3.9.2. Manobra e proteção de capacitores .....</b>	<b>47</b>
<b>3.9.3. Condutores de alimentação .....</b>	<b>48</b>
<b>3.9.4. Proteção do banco de capacitores.....</b>	<b>48</b>
<b>3.9.5. Vantagens da correção do fator de potência para a indústria.....</b>	<b>49</b>
<b>3.9.6. Vantagens da correção do fator de potência para a concessionária .....</b>	<b>49</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>50</b>
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, devido aos problemas e condições que o país e o mundo vêm enfrentando, a palavra economia vem sendo discutida diariamente na indústria e pela população. Este trabalho visa estudar o tema “correção do fator de potência”, com o propósito de evidenciar as vantagens para a indústria e para a distribuidora, gerando uma qualidade melhor de energia ao consumidor, tendo em vista que, no país há uma grande demora na construção de novas fontes geradoras de energia devido a burocracia e a questão ambiental.

Assim cada vez mais a preocupação com o aumento de produtividade do sistema elétrico, atentando-se não apenas em economizar energia, mas em consumir com eficiência, ou seja, minimizar ou compensar o consumo de energia reativa em uma instalação elétrica.

Existem fatores importantes na compensação da energia reativa numa instalação, produzindo grandes vantagens, entre elas:

- Redução das perdas de energia em cabos e transformadores, pela redução da corrente de alimentação;
- Diminuição dos custos de energia elétrica, não só pela eliminação do ajuste na tarifa imposto pela concessionária, como pela redução das perdas;
- Liberação da capacidade do sistema, permitindo a ligação de cargas adicionais, ou seja, aumento na capacidade de condução dos cabos e da capacidade disponível em transformadores;
- Elevação dos níveis de tensão, melhorando o funcionamento dos equipamentos da instalação.

E partindo das normas e estudos técnicos, será realizado um estudo de caso no qual será levado em consideração a conta de energia elétrica de uma empresa qualquer e assim será corrigido o fator de potência.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

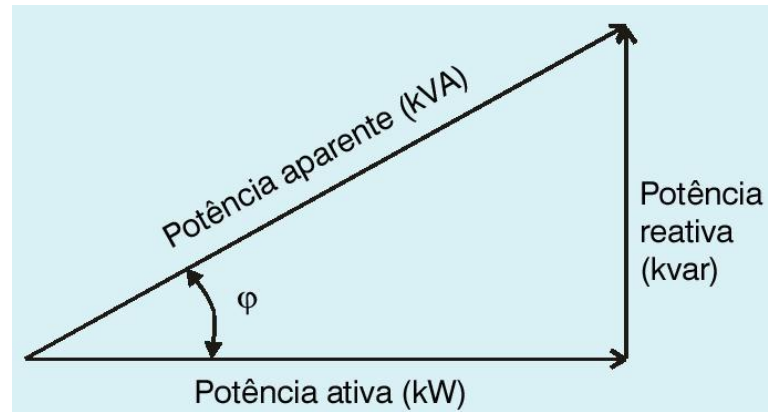
### 2.1. Conceitos básicos

O fator de potência indica o quanto de potência fornecida (kVA) está sendo realmente utilizada como potência ativa (kW). Assim, o fator de potência mostra o grau de eficiência do uso do sistema elétrico. Altos valores de fator de potência (próximos de 1,0) indicam o melhor uso da energia elétrica, enquanto baixos valores indicam má utilização, além de representar sobrecarga em todo o sistema, tanto do consumidor como da concessionária.

A maioria das cargas das unidades consumidoras consomem energia reativa indutiva, tais como: motores, transformadores, reatores para lâmpadas de descarga, fornos de indução, etc. As cargas indutivas necessitam de campo eletromagnético para seu funcionamento, assim sua operação requer dois tipos de potência.

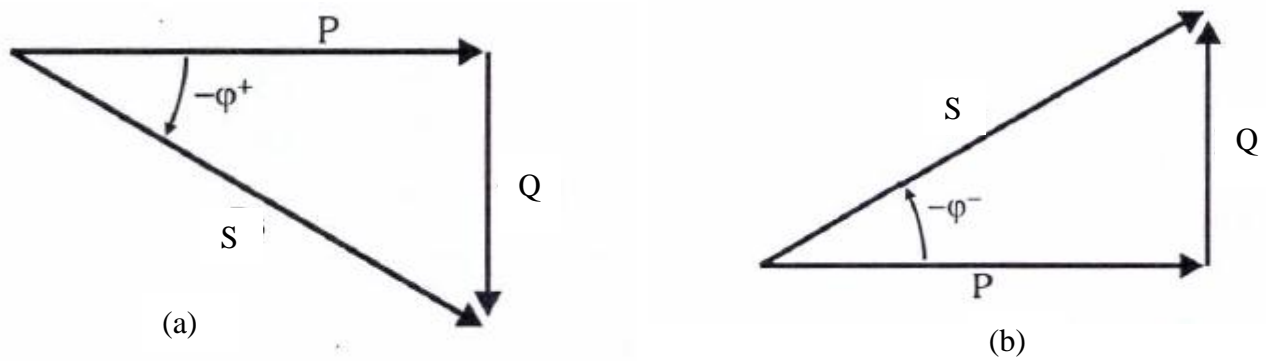
- **Potência Ativa** – Realiza o trabalho útil e é o valor médio da potência instantânea sobre um número integral de períodos, sua unidade de medida é o (kW), sendo a potência que realmente executa trabalho, fazendo os motores e os transformadores funcionarem.
- **Potência Reativa** – Percorre entre a carga e a fonte de alimentação sem realizar trabalho útil tendo como principal finalidade a criação do campo magnético nas bobinas dos equipamentos. Os campos magnéticos aumentam e diminuem, acompanhando a frequência, variando duas vezes por período entre fonte de corrente e condutores, e o campo elétrico provocado pelos capacitores no qual aumentam com as distâncias de seus dielétricos. É medida em (kVAr), e não realiza trabalho útil para o funcionamento de motores, transformadores e geradores.
- **Potência Aparente** – É o produto dos valores eficazes de tensão e corrente. A potência aparente é na maioria das vezes um valor calculado, mas pode ser obtido instantaneamente, pois neste produto não se leva em consideração a defasagem entre a tensão e a corrente do circuito. Ela também pode ser obtida através da adição geométrica das potências Ativa e Reativa.





**Figura 1** – Triângulo das Potências

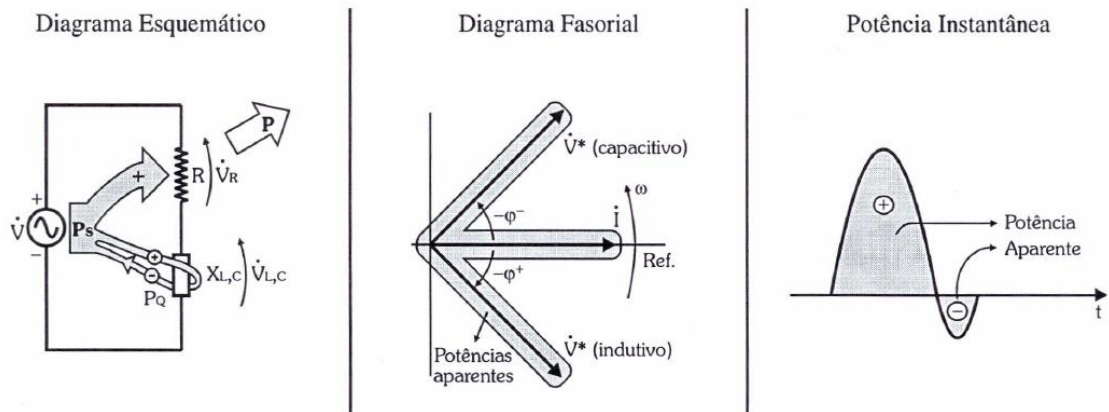
**Fonte:** adaptado de [www.eletrica.info/](http://www.eletrica.info/)



**Figura 2** – Triângulo das Potências (a) Impedância Indutiva; (b) Impedância Capacitiva

**Fonte:** adaptado de [wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3\\_aru\\_tem\\_eba.](http://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3_aru_tem_eba.)

Pdf



**Figura 3** – Diagrama das Potências

**Fonte:** adaptado de [wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3\\_aru\\_tem\\_eba](http://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3_aru_tem_eba).

Pdf

## 2.2. Fator de potência

Para melhorar o uso da energia elétrica gerada no Brasil, o extinto DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), hoje com a denominação de ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através da resolução N° 479 de 20 de Março de 1992, estabelece que o fator de potência mínimo deva ser 0,92, sendo válida, atualmente, a resolução N° 456/ANEEL, de 29 de Novembro de 2000.

Pode-se definir que o fator de potência é a divisão da potência Ativa (kW) pela potência Aparente (kVA) e pode ser representada pela fórmula básica.

$$FP = \frac{kW}{kVA}$$

**Equação 1** - Equação Básica do Fator de Potência

Ela também pode ser definida pela relação entre potência Ativa e a potência Reativa.

$$FP = \frac{kWh}{\sqrt{(kWh)^2 + (kVArh)^2}}$$

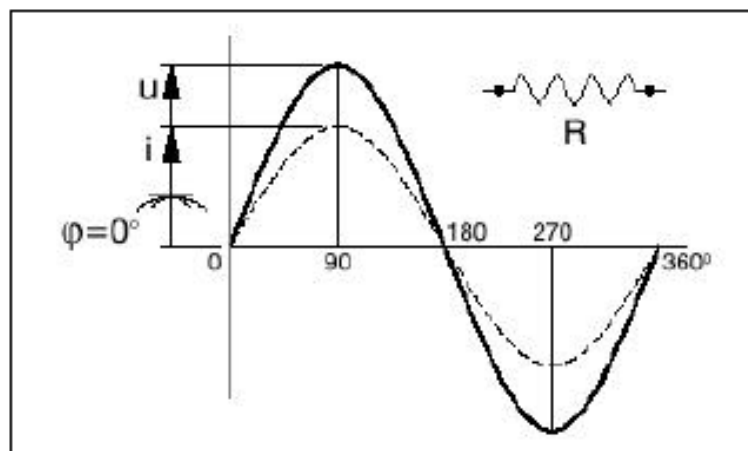
$$FP = \cos(\text{Arctg}\left(\frac{kVArh}{kWh}\right))$$

**Equação 2** – Relação entre Potência Ativa e Potência Reativa.

O fator de potência de um modo simples é o  $\cos \varphi$ , no qual  $\varphi$  é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. De forma que quando a onda da corrente está atrasada em relação à onda de tensão, o fator de potência se torna do tipo indutivo. Caso haja uma inversão na defasagem o fator de potência se assume como capacitivo.

Este é motivo pelo qual o ângulo  $\varphi$  é frequentemente mencionado como ângulo de FP (fator de potência).

Para cargas puramente resistivas, a tensão e corrente estão em fase, logo o FP é unitário, conforme visto na figura 2, onde  $\varphi = 0^\circ \Rightarrow FP = \cos \varphi = 1$ .



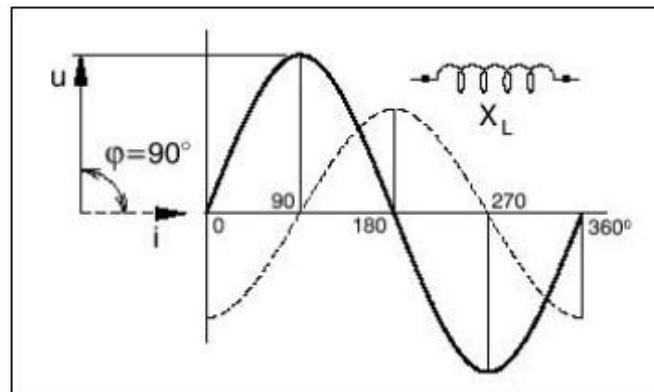
**Figura 4** – Comportamento da senóide com tensão e corrente em fase

**Fonte:** adaptado FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

Fator de Potência unitário pode ser obtido para cargas que contenham ao mesmo tempo indutância e capacitância, se os valores dos elementos e a frequência de operação forem selecionados de maneira a prover uma impedância de entrada que tenha ângulo

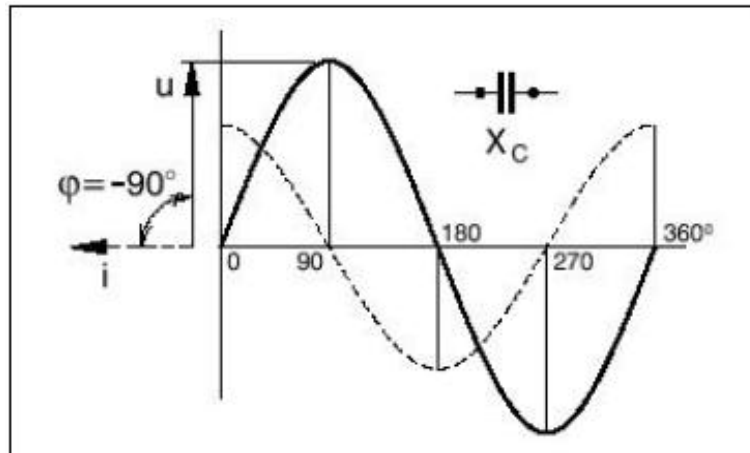
nulo. Isso se dá para uma ressonância em série, que é a condição na qual as reatâncias capacitivas e indutivas de um circuito RLC são iguais. Quando isso acontece, as reatâncias se cancelam entre elas e a impedância do circuito se torna igual à resistência, sendo um valor muito pequeno. Isso acontece entre o transformador de força e os capacitores ou banco de capacitores ligados num mesmo barramento. A ressonância série é a responsável por sobrecorrentes que danificam os capacitores e os demais componentes do circuito.

Uma carga puramente reativa, tendo a característica de não conter resistência alguma, gera uma diferença de fase entre a tensão e a corrente de  $90^\circ$ , e a corrente estará atrasada ou adiantada em relação à tensão, conforme visto nas figuras 3 e 4, com isso o FP será nulo.



**Figura 5** – Comportamento da senóide em uma carga puramente indutiva, com a tensão adiantada em relação a corrente

**Fonte:** adaptado FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí



**Figura 6** – Comportamento da senóide em uma carga puramente capacitiva, com a tensão atrasada em relação a corrente

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

Vetorialmente, a potência reativa, sempre está defasada (adiantada ou atrasada) de  $90^\circ$  em relação à potência ativa. Se a carga consome energia reativa, ela está  $90^\circ$  atrasada em relação à energia ativa. No sentido anti-horário a curva da potência ativa atinge pontos de máximos e mínimos  $90^\circ$  na frente da potência reativa, ou seja, a curva da potência reativa está  $90^\circ$  atrasada em relação à curva da potência ativa.

Por convenção, as cargas que consomem energia reativa são denominadas cargas indutivas. As cargas que fornecem energia reativa são denominadas cargas capacitivas e as cargas que não consomem e nem fornecem energia reativa são chamadas de cargas resistivas.

Mas também o fator de potência pode ser representada pela corrente elétrica total que circula numa carga qualquer, sendo a resultante da soma vetorial de duas componentes de corrente elétrica. Uma componente que é denominada de *corrente ativa* e a outra que é denominada *corrente reativa*. A soma vetorial da corrente ativa e da corrente reativa é denominada de *corrente aparente*.

O resultado da multiplicação da corrente pela tensão é denominado de potência, assim: O produto da corrente ativa numa carga pela tensão a que está submetida esta carga resulta na *potência ativa* da carga e, a soma vetorial da potência reativa de uma carga resulta na *potência aparente* da carga, como apresentado anteriormente.

Cargas que *consomem* energia reativa:

- Transformadores;
- Motores de indução;
- Reatores.

Cargas que *fornecem* energia reativa:

- Capacitores;
- Motores síncronos;
- Condensadores síncronos.

O fator de potência é sempre um número entre 0 e 1 positivo.

### 2.2.1. Energia Ativa, Reativa e Aparente

Quando uma resistência tem uma tensão senoidal aplicada a ela, a corrente é senoidal e em fase com a tensão. Neste caso a potência dissipada é igual ao produto dos valores eficazes de tensão e corrente. No caso de um elemento reativo puro, a corrente e a tensão estão defasadas em exatamente  $90^\circ$ , e o produto dos valores eficazes de tensão e corrente é igual à potência reativa que alternadamente é armazenada e devolvida. O que acontece é que, se um circuito possui tanto resistências como reatâncias, têm-se potência reativa e potência dissipada.

Considerando um circuito genérico monofásico com uma tensão  $V = V_m \text{sen}(\omega t + \varphi)$  aplicada. O resultado é uma corrente  $i = I_m \text{sen}(\omega t - \varphi)$  atrasada para um circuito capacitivo,  $\varphi$  positivo, e adiantada para caso de um circuito indutivo, isto é,  $\varphi$  negativo. A potência instantânea é:

$$p = vi = V_m I_m \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Usando identidades trigonométricas:

$$\operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

na expressão de potência:

$$p = \frac{V_m I_m}{2} [\cos(\omega t - \omega t - \varphi) - \cos(\omega t + \omega t + \varphi)] = \frac{V_m I_m}{\sqrt{2}} [\cos(-\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)]$$

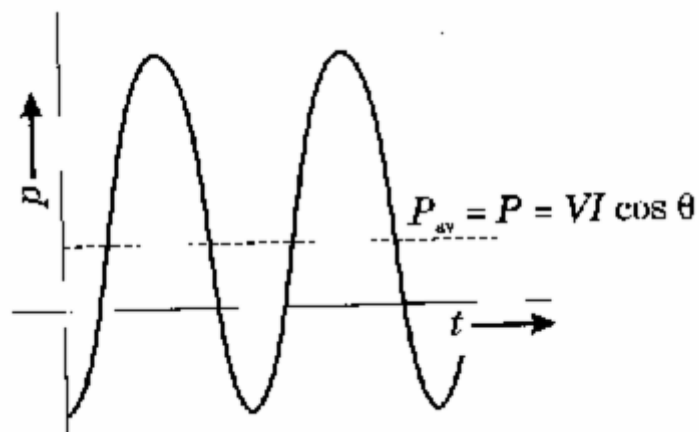
Assim:

$$V = V_m / \sqrt{2}, I = I_m / \sqrt{2}, e \cos \varphi = \cos(-\varphi)$$

$$p = V I \cos \varphi - V I \cos(2\omega t + \varphi)$$

### **Equação 3** – Equação da potência instantânea

O segundo termo da eq. 3 representa-se uma onda cossenoidal negativa com o dobro da frequência da tensão aplicada, já que o valor médio de uma onda cossenoidal é zero, esse termo não contribui na potência média. Assim, o primeiro termo é de particular importância porque os termos  $V$ ,  $I$ , e  $\cos \varphi$  são todos constantes e não se alteram ao longo do tempo. De fato, pode-se perceber no gráfico da Equação 3,



**Figura 7 – Potência média**

**Fonte:** FRANCESCHINI, Mauricio Dallacqua. POTENCIAL DE ECONOMIA COM CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DENTRO DE UMA EMPRESA. 2004. 70

f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco

que o termo constante  $V I \cos \varphi$  é o valor médio da potência instantânea. Assim, o valor médio da potência,  $P$ , é dada por:

$$P = VI \cos \varphi$$

**Equação 4** – Valor médio da potência.

Onde:

$V$  e  $I$  são os valores eficazes de tensão e corrente e  $\varphi$  é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente. Sendo que o ângulo de defasagem para um circuito está sempre entre  $\pm 90^\circ$ , então  $\cos \varphi \geq 0$  e  $P \geq 0$ .

Em casos especiais de somente resistências ou somente reatância, a Eq. 4, se reduz a  $P = V I$  e  $P = 0$ .

O termo  $\cos \varphi$  é chamado de fator de potência do circuito, e o ângulo é em muitas das vezes conhecido como ângulo do fator de potência. Em um circuito indutivo, onde a corrente está atrasada da tensão, o fator de potência é descrito como um fator de potência atrasado. Em um circuito capacitivo, onde a corrente está adiantada da tensão, o fator de potência é adiantado.

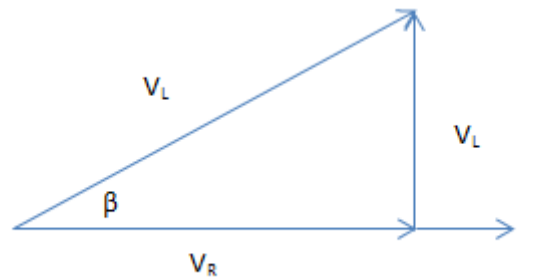
Com o produto  $VI$  na Eq. 4 não representa qualquer potência média em watts ou potência reativa em VAR's, ele é definido por um termo novo, potência aparente. O produto  $VI$ , chamado potência aparente, tem como unidade volt-ampère (VA) e é indicado pela letra-símbolo  $S$ . Assim:

$$P = S \cos \varphi$$

**Equação 5** - Potência



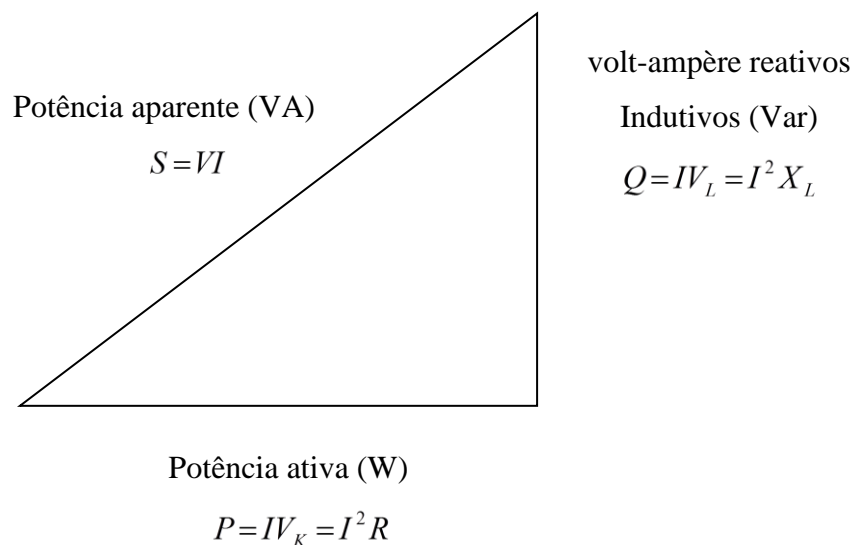
A Eq. 5 indica uma relação de Pitágoras entre a potência ativa e a potência aparente. Lembrando que o circuito RL série possui um diagrama fasorial de tensão que forma um triângulo retângulo, como mostra a figura 8:



**Figura 8** – Diagrama Fasorial de tensão do circuito RL

**Fonte:** THOMAZINI, Daniel Berti, Autor.

Aplicando a multiplicação em cada lado pelo módulo de uma corrente  $I$ , encontra-se um triângulo similar, no qual a potência ativa está ao longo do eixo horizontal, a potência reativa ao longo do eixo vertical e a potência aparente é a hipotenusa. Um triângulo como este mostrado na figura 9:



**Figura 9** – Triângulos das Potências e suas fórmulas

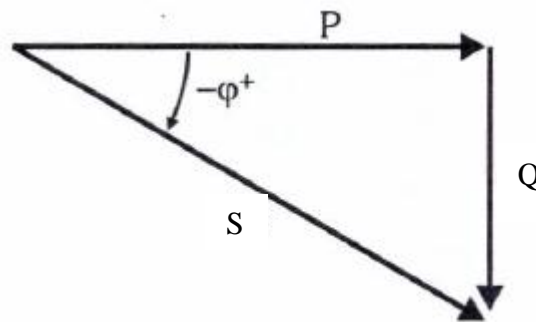
**Fonte:** THOMAZINI, Daniel Berti, autor.

Sendo assim chamado de triângulo das Potências, com citado anteriormente:

$$Q = S \operatorname{sen} \varphi \quad \text{e} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

**Equação 6** – Equação do triângulo das potências

Observa-se que o triângulo de potência é semelhante ao triângulo das impedâncias para uma impedância RL série; o triângulo é formado abaixo do eixo horizontal. Caso venha à existir ainda um circuito paralelo RL e formar um triângulo de potência parecido ao triângulo de admitância, o qual se situa abaixo do eixo horizontal, teremos o triângulo de potência da figura 10:

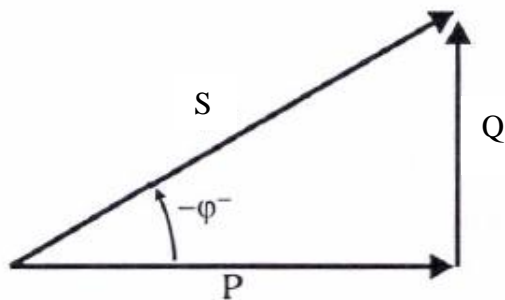


**Figura 10** – Triângulo das Potências, Impedância Indutiva

**Fonte:** adaptado de [wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3\\_aru\\_tem\\_eba.pdf](http://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3_aru_tem_eba.pdf)

. Ambos os triângulos estão corretos, embora será adotado um tipo para ser utilizado para ambos circuitos RL série e paralelo, e o outro seja usado para ambos circuitos RC série e paralelo.

Tendo a afirmação que o circuito indutivo gera um atraso no fator de potência. O capacitivo, adianta o fator de potência de acordo com a figura 11.



**Figura 11** – Triângulo das Potências Impedância Capacitivo

**Fonte:** adaptado de [wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3\\_aru\\_tem\\_eba.Pdf](http://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/85/Tri3_aru_tem_eba.Pdf).

Se um circuito possui tanto indutâncias quanto capacitâncias, a potência reativa total  $Q_t$ , é a diferença entre a potência reativa capacitiva e a potência reativa indutiva. Neste caso a capacitância devolve energia do circuito enquanto a indutância simultaneamente toma energia para o circuito. Certa parte da potência reativa é trocada ou retornada e assim por diante entre a capacitância e a indutância.

Obviamente, quando duas ou mais resistências estão em um circuito CA, a potência média total,  $P_t$ , é igual à soma das potências individuais.

### 2.2.2. Energia reativa

A maioria das cargas de instalações elétricas são indutivas, ou seja, são consumidoras de energia reativa.

Estas cargas consomem energia reativa porque precisam de um campo eletromagnético para funcionar, ou seja, elas são responsáveis pela magnetização dos enrolamentos dos motores, transformadores, reatores, entre outros que são equipamentos que necessitam de “energia magnetizante” para transformar parte da

energia recebida em trabalho útil, em energia mecânica. Esta energia trocada entre o gerador e o receptor, que não é propriamente consumida como energia, é a energia reativa.

Como visto anteriormente, esta energia reativa impõe um atraso ou adiantamento de corrente em relação à tensão. Esta é a principal razão de corrigir o fator de potência.

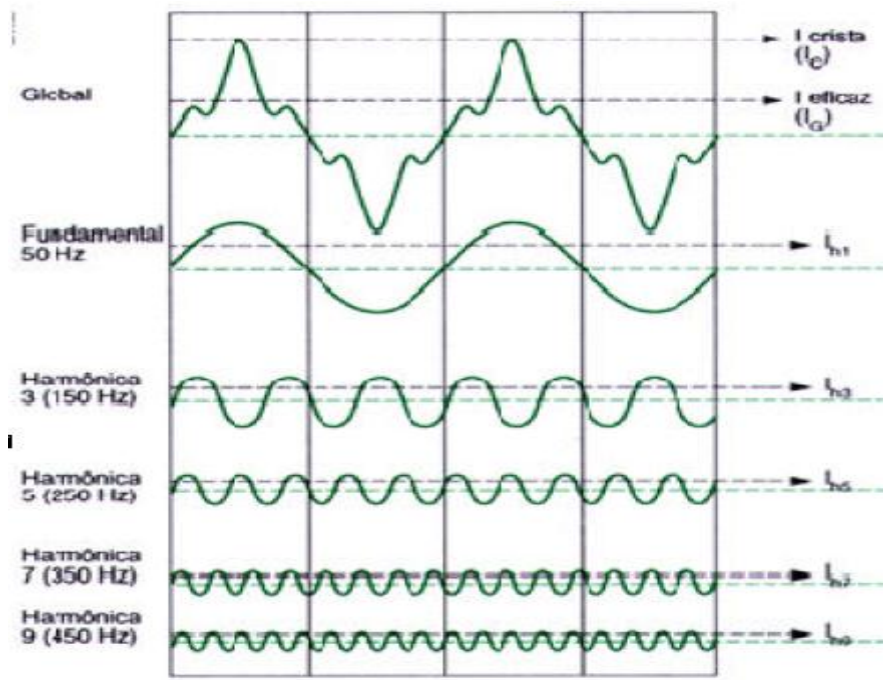
A correção do fator de potência através, principalmente, da instalação de capacitores tem sido alvo de muita atenção das áreas de projeto, manutenção e finanças de empresas interessadas em racionalizar o consumo de seus equipamentos elétricos como será visto ao longo do trabalho.

## **2.3. DEFORMAÇÃO DO SINAL SENOIDAL E ORIGEM DAS HARMÔNICAS**

### **2.3.1. Deformação de um sinal senoidal**

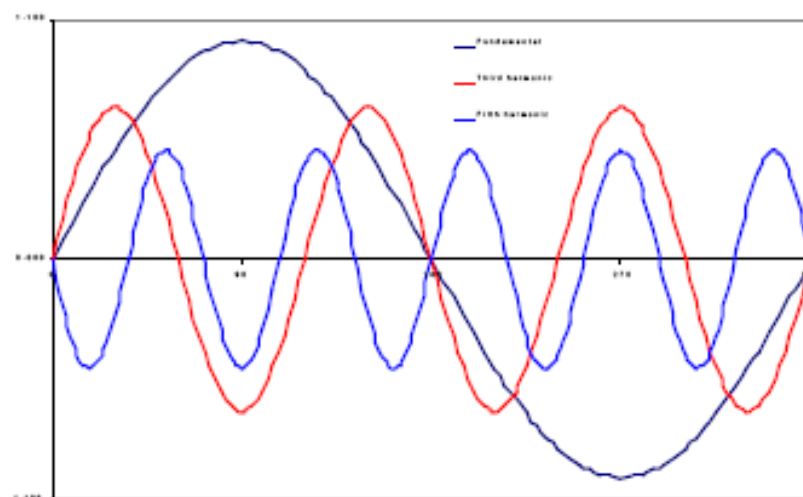
O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta:

- de uma expressão senoidal em frequência fundamental,
- expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas),
- uma eventual componente contínua.



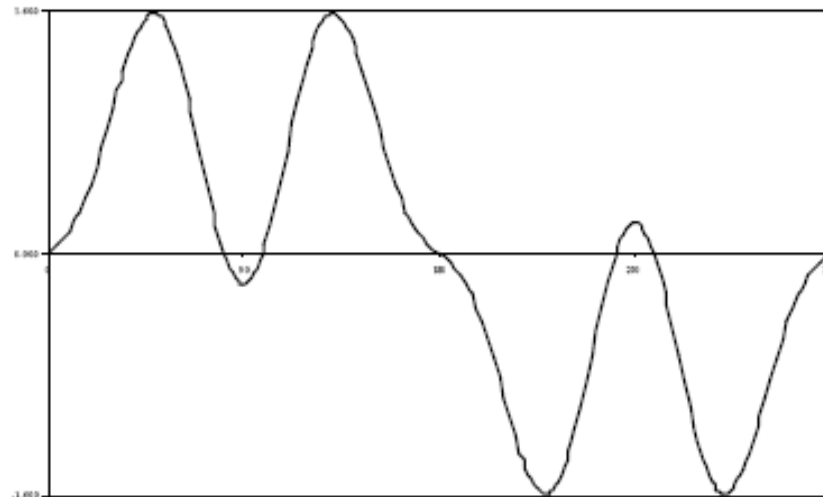
**Figura 12** - Exemplo de correntes comportando harmônicas, e decomposição da corrente global em seus componentes harmônicos de ordem 1(fundamental), 3,5,7 e 9

**Fonte:** FRANCESCHINI, Mauricio Dallacqua. POTENCIAL DE ECONOMIA COM CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DENTRO DE UMA EMPRESA. 2004. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco



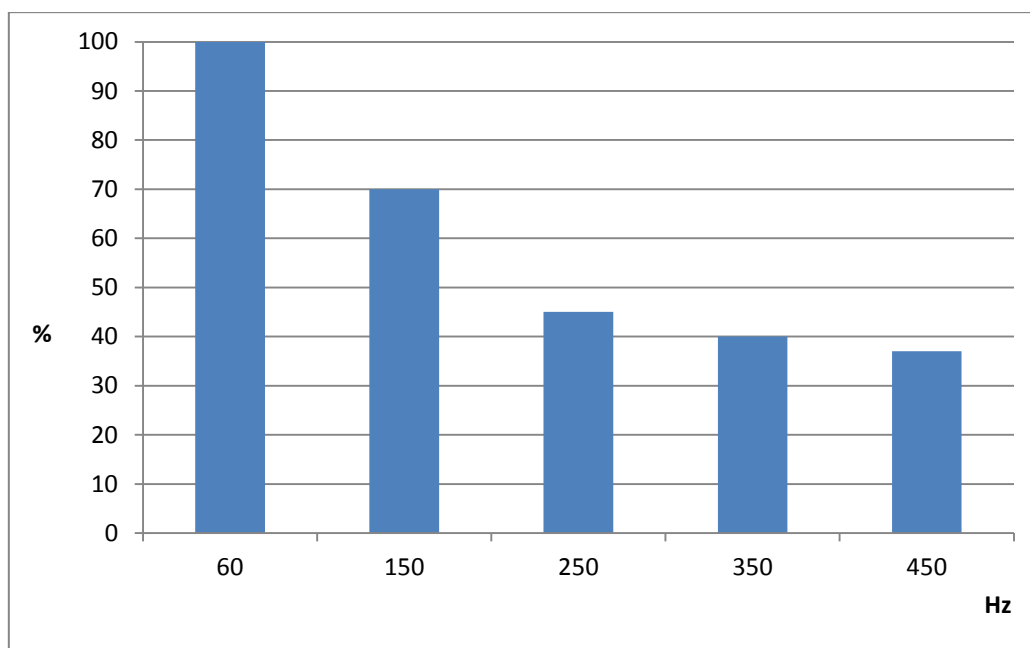
**Figura 13** - Fundamental com presença da terceira e quinta harmônica

**Fonte:** FRANCESCHINI, Mauricio Dallacqua. POTENCIAL DE ECONOMIA COM CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DENTRO DE UMA EMPRESA. 2004. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco



**Figura 14** – Composição da forma de onda

**Fonte:** FRANCESCHINI, Mauricio Dallacqua. POTENCIAL DE ECONOMIA COM CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DENTRO DE UMA EMPRESA. 2004. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco.



**Figura 15** - Espectro de um sinal de componente fundamental 50 Hz, e comportando harmônicas de ordens 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) e 9 (450Hz).

**Fonte:** FRANCESCHINI, Mauricio Dallacqua. POTENCIAL DE ECONOMIA COM CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DENTRO DE UMA EMPRESA. 2004. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco

### 2.3.2. Origem das harmônicas

As correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas a rede. A circulação das correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede e então surge uma deformação da tensão de alimentação.

Antigamente predominavam cargas lineares com valores de impedância fixo (iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade).

Atualmente surgiram cargas não-lineares que geram harmônicas na rede.

Os dispositivos geradores de harmônicos são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. Os harmônicos são resultados de cargas não-lineares (Uma carga é dita não-linear quando a corrente que ela absorve não tem a mesma forma da tensão que a alimenta).

Elas são cada vez mais numerosas e sua contribuição no consumo de energia cresce sem cessar. Como exemplo, podemos citar:

- os equipamentos industriais (máquinas de solda,...) retificadores.
- os inversores de frequência para motores assíncronos ou motores em corrente contínua,
- os equipamentos de escritório (computadores, máquinas copadoras, fax,...),
- os aparelhos domésticos (TV, forno microondas, iluminação néon,...),
- os no-break's.

E a utilização destes equipamentos podem afetar a integridade do fator de potência.

## **2.4.FORNECIMENTO DE ENERGIA REATIVA - REGULAMENTAÇÃO**

### **2.4.1. Princípios da regulamentação**

Segundo Portaria Nº 1.569 de 23/12/93 do DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (atualmente incorporada na Resolução Nº 456 da ANEEL) introduziu profundas alterações na regulamentação sobre fator de potência nos fornecimentos aos consumidores.

O fator de potência de referência estabelecido como limite para cobrança de energia reativa excedente, por parte da concessionária passou de 0,85 para 0,92, independente do sistema tarifário, a partir dos faturamentos correspondentes às leituras efetuadas no mês de abril de 1994.

A energia reativa capacitiva passou, a critério da concessionária, a ser medida e faturada. Pela legislação regulamentadora anterior (Portaria DNAEE nº 222), apenas a energia reativa indutiva era passível de verificação e faturamento.

A energia reativa indutiva deve ser medida ao longo das 24 horas do dia. Se a concessionária decidir medir também a energia reativa capacitiva, deverá fazê-lo de 00:00 a 06:00 horas ficando, nesse caso, a medição da energia reativa indutiva limitada ao período de 06:00 a 24:00 horas.

Os novos critérios para faturamento regulamentam a cobrança de excedentes de energia reativa, abandonando, assim, a figura tradicional do “ajuste por baixo fator de potência” que sempre foi associado à idéia de multa. O excedente reativo indutivo ou capacitivo, que ocorre quando o fator de potência indutivo ou capacitivo é inferior ao valor de referência de 0,92, é cobrado com tarifa de energia ativa e de demanda ativa (R\$/kWh e R\$/kW) e introduz o conceito de energia ativa reprimida ou seja, a cobrança pelo “espaço” ocupado com a circulação de excedente reativo no sistema elétrico.

A revisão da regulamentação foi elaborada com base em alguns princípios que revisaram a sistemática de avaliação da energia reativa circulante no sistema elétrico, conforme caracterizado a seguir:



- a energia reativa indutiva sobrecarrega o sistema elétrico, principalmente nos períodos do dia em que é mais solicitada (cargas média e pesada);
- a energia reativa capacitiva é prejudicial nos períodos de carga leve, provocando elevação da tensão, e a conseqüente necessidade de instalação de equipamentos corretivos e a realização de manobras no sistema;
- a necessidade de liberação de capacidade do sistema elétrico;
- a promoção do uso racional da energia elétrica;
- a criação de condições para que os custos de expansão do sistema elétrico sejam distribuídos de forma mais justa;
- a legislação do fator de potência não visa aumento de receita da concessionária.

O cálculo do fator de potência poderá ser feito de duas formas distintas:

- por avaliação mensal: através de valores de energia ativa e reativa medidos durante o ciclo de faturamento - como era feito anteriormente - somando-se, em módulo, os valores das energias reativas indutiva e capacitiva medidas nos períodos respectivos;
- por avaliação horária: através de valores de energia ativa e reativa medidos de hora em hora, seguindo-se os períodos anteriormente mencionados, para verificação de energia reativa indutiva e capacitiva, que só pôde ser aplicada a partir do faturamento correspondente às leituras efetuadas no mês de abril de 1996.
- Sendo mais viável a utilização do cálculo por avaliação horária, devido a sua maior precisão no estudo.

#### **2.4.2. Cálculo para faturamento mensal**

$$\text{UFDR} = \text{DM} \times \frac{0,92}{\text{fm}} - \text{DF}$$

**Equação 7** – Cálculo para faturamento mensal

Onde:

- DM - demanda máxima ativa registrada no ciclo de faturamento, através de integralização de 15 minutos;
- DF - demanda faturável no ciclo de faturamento (maior valor da demanda, dentre a medida ou a contratada); e
- fm - fator de potência médio mensal.

$$UFER = CA \times \left( \frac{0,92}{fm} - 1 \right)$$

**Equação 8** – Faturamento correspondente ao consumo de energia reativa excedente

Onde:

- CA - consumo ativo no ciclo de faturamento;

Com base nos dados de kWh e de kVarh obtidos pelos equipamentos de medição, o sistema de faturamento determina os valores de fm, UFDR e UFER e efetua ainda os faturamentos FDR e FER.

### 2.4.3. Avaliação horária

$$UFDR = DMCR - DF$$

**Equação 9** – Equação para avaliação horária

Onde:

- DF: demanda faturável no ciclo de faturamento (maior valor da demanda, dentre a medida ou a contratada); e
- DMCR: maior valor de demanda ativa corrigida =  $\max_{i=1}^n \left( DA_i \times \frac{0,92}{fi} \right)$ ,

sendo:

- DA<sub>i</sub> - demanda ativa registrada, integralização horária, e
- fi - fator de potência médio horário.

$$UFER = \sum_{i=1}^n \left[ \left( CA_i \times \left( \frac{0,92}{f_i} - 1 \right) \right) \right]$$

**Equação 10** – Somatória do Faturamento correspondente ao consumo de energia reativa excedente

Onde:

— CA<sub>i</sub> - consumo ativo registrado de hora em hora.

O registrador digital determina a cada hora o valor de  $f_i$  em função dos montantes de kWh e de kVArh. Se esse valor for menor que o valor de referência (0,92) o registrador acumula o valor correspondente de UFER, calculando ainda o valor de DMCR. No final do ciclo de faturamento o registrador fornece um total acumulado de UFER e o valor máximo de DMCR. Com base nesses valores, o sistema de faturamento calcula o valor de UFDR e os faturamentos FDR e FER.

#### 2.4.4. Faturamento do excedente

O faturamento do excedente de reativo terá as seguintes componentes para os grupos e sistemas tarifários existentes:

⇒ **GRUPO A:**

— Tarifa Convencional:

- uma componente FDR correspondente ao excedente de demanda de potência reativa, e
- uma componente FER correspondente ao excedente de consumo de energia reativa;

— Tarifa Horo-Sazonal Verde:

- uma componente FDR correspondente ao excedente de demanda de potência reativa, e

- duas componentes FERp e FERfp correspondentes ao excedente de consumo de energia reativa nos segmentos de ponta e fora de ponta.

— Tarifa Horo-Sazonal Azul:

- duas componentes FDRp e FDRfp correspondentes ao excedente de demanda de potência reativa nos segmentos de ponta e fora de ponta, e
- duas componentes FERp e FERfp correspondentes ao excedente de consumo de energia reativa nos segmentos de ponta e fora de ponta;

⇒ **GRUPO B** - uma componente FER correspondente ao excedente de consumo de reativo; e

Cabe registrar que a Portaria N° 456, prevê que para as unidades consumidoras do Grupo B (baixa tensão), o faturamento da energia reativa será feito segundo a expressão:

$$FER = CA \times \left( \frac{0,92}{fm} - 1 \right) \times TCA$$

**Equação 11** – Equação para faturamento de energia grupo B

Onde:

- FER - faturamento de energia reativa;
- fm - fator de potência medido, durante um período mínimo de 7 (sete) dias consecutivos;
- TCA - Tarifa de consumo ativo.

Nesta expressão o fator de potência da unidade consumidora será calculado com base em dados verificados através de medição transitória, abrangendo um período mínimo de 7 (sete) dias consecutivos. O faturamento de energia reativa excedente correspondente, ficará condicionado à prévia notificação ao consumidor e será efetuado até que o mesmo comunique ao concessionário ter corrigido o fator de potência de suas instalações.

Alternativamente a concessionária poderá implantar medição permanente em seus consumidores do Grupo B.

## **2.5.CUIDADOS A SEREM OBSERVADOS**

- A concessionária não mede o FP, mas sim o consumo, onde dimensiona sua demanda, através da demanda de energia ativa e reativa,
- O sistema de medição da concessionária é realizado a cada período “t”, ou seja, a cada momento o FP muda, aumentando e diminuindo constantemente;
- Devemos ter especial atenção para equipamentos eletrônicos nos quais utilizam tiristores (soft starter’s inversores de frequência, conversores AC/DC) que produzem ondas não senoidais, outros equipamentos como lâmpadas de descarga, fornos de fusão de metais pro arco voltaico, são grandes fontes de distorções harmônicas de tensão, pois causam danos aos capacitores.

## **2.6.CAUSAS PARA O BAIXO FATOR DE POTÊNCIA.**

Segundo Fabio Lamothe Cardoso (2007), antes de realizar investimentos para corrigir o fator de potência de uma instalação, deve-se procurar identificar as causas da sua origem, uma vez que a solução das mesmas pode resultar na correção, ao menos parcial, do fator de potência.

### 2.6.1. NÍVEL DE TENSÃO ACIMA DO NOMINAL

O nível de tensão tem influência negativa sobre o fator de potência das instalações, pois como se sabe a potência reativa (kVAr) é, aproximadamente, proporcional ao quadrado da tensão. Assim, no caso dos motores, que são responsáveis por mais de 50% do consumo de energia elétrica na indústria, a potência ativa só depende da carga dele solicitada, e quanto maior for a tensão aplicada nos seus terminais, maior será a quantidade de reativos absorvida e, conseqüentemente, menor o fator de potência da instalação.

A tabela 1, apresenta a variação percentual do fator de potência em função da carga e da tensão aplicada em motores.

Neste caso devem ser conduzidos estudos específicos para melhorar os níveis de tensão, através da utilização de uma relação mais adequada de taps dos transformadores ou da tensão nominal dos equipamentos.

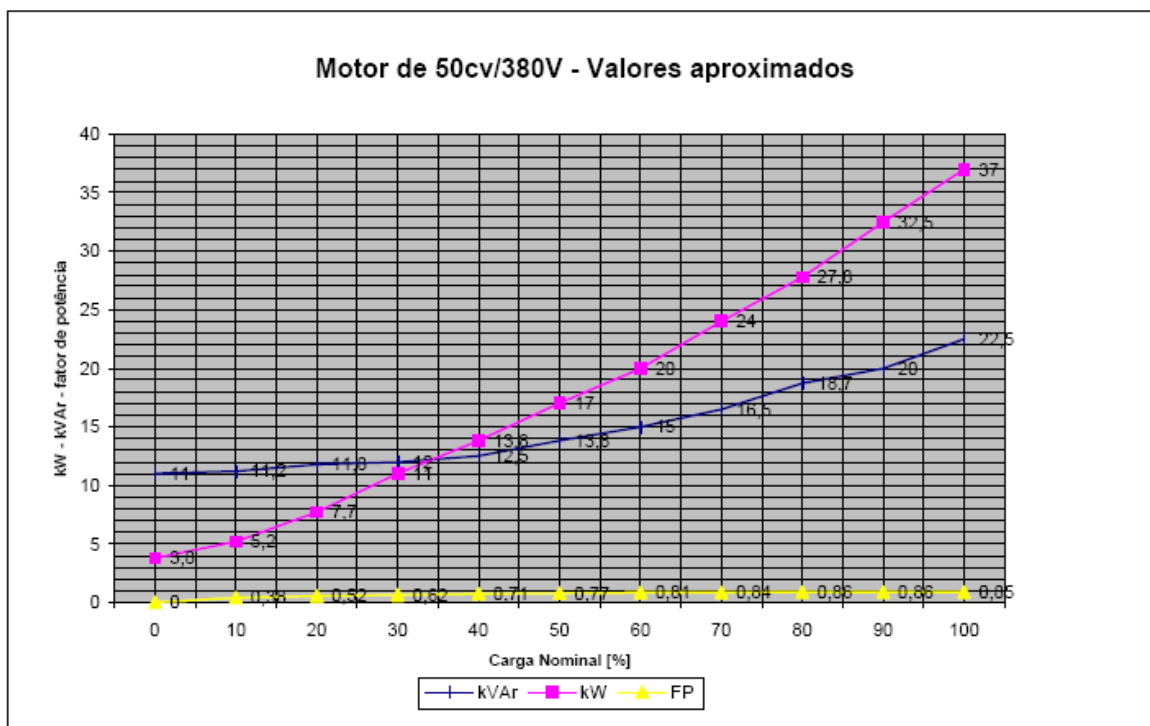
**Tabela 1** – Influência da variação da tensão no fator de potência.

Tensão Aplicada (% de Vnom do Motor)	Carga nos Motores (Em relação à Nominal)		
	50%	75%	100%
120%	Decresce de 15% a 40%	Decresce de 10% a 30%	Decresce de 5% a 15%
115%	Decresce de 8% a 20%	Decresce de 6% a 15%	Decresce de 4% a 9%
110%	Decresce de 5% a 6%	Decresce de 4%	Decresce de 3%
100%	-	-	-
90%	Cresce de 4% a 5%	Cresce de 2% a 3%	Cresce de 1%

### 2.6.2. Motores operando em vazio ou superdimensionados

Os motores elétricos de indução consomem praticamente a mesma quantidade de energia reativa quando operando em vazio ou a plena carga. A potência reativa consumida pelos motores classe B, são aproximadamente iguais às potências dos capacitores indicadas nas Tabelas 1 e 2 a seguir.

Na prática observa-se que para motores operando com cargas abaixo de 50% de sua potência nominal o fator de potência cai bruscamente. Nestes casos deve-se verificar a possibilidade, por exemplo, de se substituir os motores por outros de menor potência, com torque de partida mais elevado e mais eficiente.



**Figura 16** – Exemplo do comportamento de um motor com a variação da carga

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência.** 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiá

Utilização de um grande número de motores de pequena potência provoca, muitas vezes, um baixo fator de potência, posto que o correto dimensionamento de tais motores em função das máquinas a eles acoplados podem apresentar dificuldades.

Tabela 2 – Capacitores para motores de baixa tensão.

POTÊNCIA DO MOTOR (hp)	VELOCIDADE SÍNCRONA (rpm) / NÚMERO DE PÓLOS DO MOTOR											
	3600 2		1800 4		1200 6		900 8		720 10		600 12	
	kVAr <sup>(1)</sup>	%I <sup>(2)</sup>	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I
3	1,5	14	1,5	15	1,5	20	2	27	2,5	35	3,5	41
5	2	12	2	13	2	17	3	25	4	32	4,5	37
7,5	2,5	11	2,5	12	3	15	4	22	5,5	30	6	34
10	3	10	3	11	3,5	14	5	21	6,5	27	7,5	31
15	4	9	4	10	5	13	6,5	18	8	23	9,5	27
20	5	9	5	10	6,5	12	7,5	16	9	21	12	25
25	6	9	6	10	7,5	11	9	15	11	20	14	23
30	7	8	7	9	9	11	10	14	12	18	16	22
40	9	8	9	9	11	10	12	13	15	16	20	20
50	12	8	11	9	13	10	15	12	19	15	24	19
60	14	8	14	8	15	10	18	11	22	15	27	19
75	17	8	16	8	18	10	21	10	26	14	32,5	18
100	22	8	21	8	25	9	27	10	32,5	13	40	17
125	27	8	26	8	30	9	32,5	10	40	13	47,5	16
150	32,5	8	30	8	35	9	37,5	10	47,5	12	52,5	15
200	40	8	37,5	8	42,5	9	47,5	10	60	12	65	14
250	50	8	45	7	52,5	8	57,5	9	70	11	77,5	13
300	57,5	8	52,5	7	60	8	65	9	80	11	87,5	12
350	65	8	60	7	67,5	8	75	9	87,5	10	95	11
400	70	8	65	6	75	8	85	9	95	10	105	11
450	75	8	67,5	6	80	8	92,5	9	100	9	110	11
500	77,5	8	72,5	6	82,5	8	97,5	9	107,5	9	115	10

<sup>(1)</sup> Máxima potência capacitiva recomendada.<sup>(2)</sup> Redução percentual de corrente da linha, após a instalação dos capacitores recomendados.



**Tabela 3** – Capacitores para motores de média tensão.

POTÊNCIA DO MOTOR	VELOCIDADE SÍNCRONA (rpm) / NÚMERO DE PÓLOS DO MOTOR											
	3600		1800		1200		900		720		600	
	2		4		6		8		10		12	
(hp)	kVAr <sup>(1)</sup>	%I <sup>(2)</sup>	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I	kVAr	%I
100	20	7	25	10	25	11	25	11	30	12	45	17
125	30	7	30	9	30	10	30	10	30	11	45	15
150	30	7	30	8	30	8	30	9	30	11	60	15
200	30	7	30	6	45	8	60	9	60	10	75	14
250	45	7	45	5	60	8	60	9	75	10	90	14
300	45	7	45	5	75	8	75	9	75	9	90	12
350	45	6	45	5	75	8	75	9	75	9	90	11
400	60	5	60	5	60	6	90	9	90	9	90	10
450	75	5	60	5	75	6	90	8	90	8	90	8
500	75	5	75	5	90	6	120	8	120	8	120	8
600	75	5	90	5	90	5	120	7	120	8	135	8
700	90	5	90	5	90	5	135	7	150	8	150	8
800	90	5	120	5	120	5	150	7	150	8	150	8

### 2.6.3. Transformadores em vazio ou com pequenas cargas

É comum nos momentos de baixa carga se encontrar transformadores operando em vazio ou alimentando poucas cargas. Nestas condições, ou quando superdimensionados, poderão consumir uma elevada quantidade de reativos.

O consumo de energia reativa por parte dos transformadores pode ser obtido através de medidores (analisadores de energia) ou determinados por cálculos necessitando-se neste caso, obter dos fabricantes os valores da potência reativa média de transformadores a vazio.

Na falta deste valor, pode-se obter através da Tabela 3 e 4 a seguir, a potência reativa média a vazio de transformadores até 1000kVA.

<sup>(1)</sup> Máxima potência capacitiva recomendada.

<sup>(2)</sup> Redução percentual de corrente da linha, após a instalação dos capacitores recomendados.

Desta maneira, a energia reativa absorvida por um transformador operando em vazio ou com baixa carga pode ser obtida multiplicando-se o valor indicado na Tabela 1 e 4, da carga reativa, pelo número de horas do período em que se configura esta operação em vazio.

Para se eliminar ou reduzir este efeito, deve-se verificar na prática, a possibilidade de se desenergizar os transformadores, ou a utilização de um transformador específico (de menor potência) para alimentação das cargas nos períodos de baixo consumo.

**Tabela 4** – Solicitação de reativos de transformadores em vazio.

<b>POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR (kVA)</b>	<b>CARGA REATIVA MÉDIA EM VAZIO DO TRANSFORMADOR (kVAr)</b>
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	12,0
750	17,0
1.000	19,5

#### **2.6.4. Queda de tensão**

A queda de tensão em um circuito é diretamente proporcional a corrente elétrica consumida. O aumento da corrente devido ao excesso de energia reativa leva a quedas de tensão acentuadas, ocasionando a interrupção do fornecimento de energia elétrica e a sobrecarga em alguns elementos da rede. Esse risco, sobretudo é acentuado durante os períodos nos quais a rede é fortemente solicitada. As quedas de tensão podem provocar ainda, a diminuição da intensidade luminosa das lâmpadas e o aumento da corrente nos motores.

### 2.6.5. Perdas na instalação

As perdas de potência em watts num sistema de distribuição são causadas pelo quadrado da corrente multiplicado pela resistência ( $I^2 * R$ ) do circuito. Esta perda é provocada principalmente pelo excesso de Efeito Joule nos condutores. As perdas são registradas nos medidores de energia da concessionária, sendo que o consumidor paga por esse desperdício.

A equação abaixo segundo João Mamede Filho (2007) permite determinar a energia economizada em um dado período anual.

$$E_e = \frac{R_{CIR} \times P_C \times (2 \times P_d \times SEN \psi_1 - P_C) \times 8760}{1000 \times V_{cir}^2}$$

**Equação 12** – Equação de energia economizada em um dado período anual

Onde:

Ee- Energia anual economizada, em kWh;

Pd - Demanda do circuito;

Rcir - Resistência do circuito para qual estão sendo calculadas as perdas, em Ohms;

Pc - Potência dos capacitores utilizados, em kVAr;

Vcir - Tensão composta do circuito, em kV.

Também para reforçar o conceito, segundo a empresa Engeletrica (<http://www.engeletrica.com.br/correcao-fator-de-potencia-fator-de-potencia.htm> acesso em 26/04/2011), as perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total. Como essa corrente cresce com o excesso de energia reativa, estabelece-se uma relação entre o incremento das perdas e o baixo fator de potência, provocando o aumento do aquecimento de condutores e equipamentos

### **2.6.6. Subutilização da capacidade instalada**

A energia reativa, ao sobrecarregar uma instalação elétrica, inviabiliza sua plena utilização, condicionando assim, a instalação de novas cargas. O "espaço" ocupado pela energia reativa poderia ser então utilizado para o atendimento de novas cargas. Os investimentos em ampliação das instalações estão relacionados principalmente aos transformadores e condutores necessários. O transformador a ser instalado deve atender à potência total dos equipamentos utilizados, mas devido à presença de potência reativa, a sua capacidade deve ser calculada com base na potência aparente das instalações.

O custo dos sistemas de comando, proteção e controle dos equipamentos crescem com o aumento da energia reativa. Da mesma forma, para transportar a mesma potência ativa sem o aumento de perdas, a seção dos condutores deve aumentar na medida em que o fator de potência diminui.

A correção do fator de potência em relação a aspectos operacionais internos na instalação, da unidade consumidora, por si só já libera capacidade para instalação de novos equipamentos, sem a necessidade de investimentos em transformador ou substituição de condutores para esse fim específico.

### **2.6.7. Outras consequências de um baixo fator de potência**

- Acréscimo na conta de energia elétrica;
- Limitação da capacidade dos transformadores de alimentação;
- Quedas e flutuações de tensão nos circuitos de distribuição;
- Necessidade de aumento do diâmetro dos condutores;
- Necessidade de aumento da capacidade dos equipamentos de manobra e de proteção.
- Utilização de reatores com baixo fator de potência nos sistemas de iluminação;

As lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescente, etc.), para funcionarem, necessitam do auxílio de um reator. Os reatores, como os motores e

os transformadores, possuem bobinas que consomem energias reativas, contribuindo para a redução do fator de potência.

- Forno de indução ou a arco;
- Máquinas de tratamento térmico;
- Máquinas de solda;

Esses 3 tipos de equipamentos citados acima são comuns no ambiente industrial, e apresentam um grande consumo de energia reativa, assim contribuindo para a diminuição do fator de potência.

- Capacitores ligados nas instalações das unidades consumidoras horossazonais fora do período de ponta;
- Transformadores operando a vazios ou sobrecarregados durante um longo período.

## **2.7.BENEFÍCIOS COM A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA**

Pode-se citar como vantagens da correção do fator de potência:

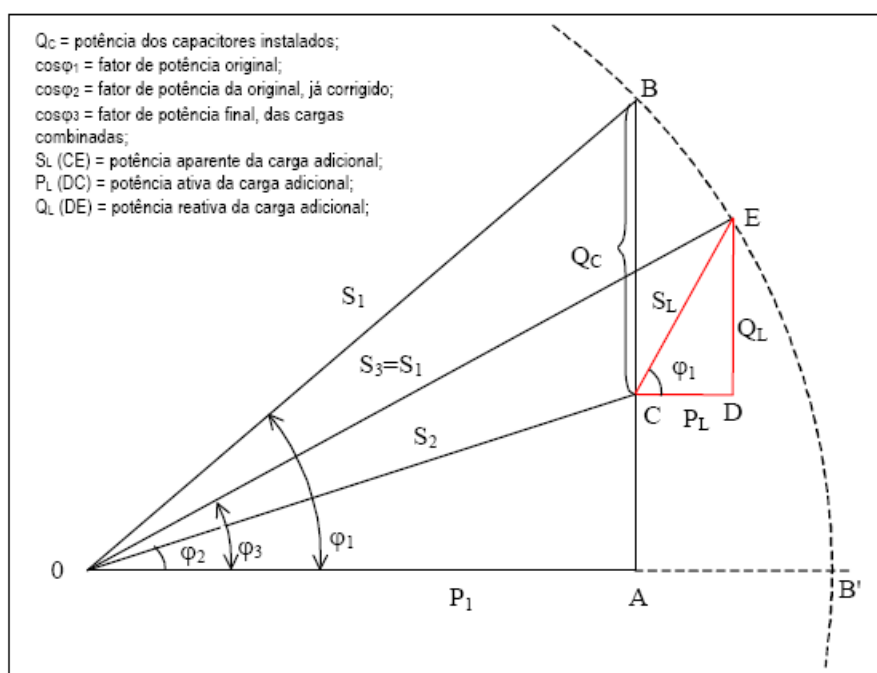
- Liberação da capacidade do sistema, permitindo a ligação de cargas adicionais;
- Elevação dos níveis de tensão, melhorando o funcionamento dos equipamentos e a utilização da instalação;
- Redução das perdas de energia, pela redução da corrente de alimentação;
- Redução dos custos de energia elétrica, não só pela eliminação do ajuste imposto pela concessionária, mas também pela redução das perdas.
- Entre outros.

### 2.7.1. Liberação da capacidade do sistema

Novas cargas podem ser ligadas a circuitos já em sua plena carga, isso é possível melhorando o fator de potência das cargas já instaladas no circuito. Com essa melhoria, se tem um aumento da capacidade instalada. Essa liberação de capacidade será descrita pelo símbolo  $S_L$ .

Para se determinar qual será a capacidade liberada no sistema, a partir do valor da correção do fator de potência, é necessário aproximar o valor do fator de potência da nova carga ser igual ao da carga original.

A próxima figura mostra a capacidade total liberada com o aumento do fator de potência de  $\cos\varphi_1$  para  $\cos\varphi_2$ .



**Figura 17** – Representação gráfica da liberação da capacidade de um sistema

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

Considerando uma instalação com uma potência aparente  $S_L$  e um fator de potência  $\cos\varphi_1$ , a sua potência ativa  $P_1$  será dada pela seguinte expressão:

$$P_1 = S_1 \times \cos\varphi_1$$

**Equação 13** - Cálculo de potência ativa

O triângulo OAB da figura 16 representa as condições iniciais da carga. Com a colocação de uma carga capacitiva adicional, em paralelo, e de potência reativa  $Q_C$ , o fator de potência da instalação será corrigido para  $\cos\varphi_2$ , e assim sendo mantida a mesma potência ativa  $P_1$  e a nova potência aparente será  $S_2$ , conforme é demonstrado na expressão abaixo.

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos\varphi_2} = \frac{P_1}{\cos\varphi_2}$$

**Equação 14** - Equação para cálculo de potência aparente

A potência aparente total deverá permanecer igual à inicial, isto é, OB, e então o limite é estabelecido pela circunferência BB'.

### 2.7.2. Melhoria da tensão

Ao se corrigir o fator de potência de uma instalação se tem automaticamente a melhoria dos níveis de tensões no circuito elétrico. Isto deve ser considerado como um benefício adicional dos capacitores instalados. Em indústrias com sistemas de distribuição modernos, as elevações de tensão podem chegar à ordem de 4 a 5%, proveniente da instalação de capacitores.

$$C = \frac{Q}{V}$$

**Equação 15** – Equação de capacitores

### **2.7.3. Redução das perdas**

A redução das perdas em um sistema elétrico decorrente da correção do fator de potência resulta em lucro financeiro anual da ordem de 15% do valor do investimento feito com a instalação dos capacitores (HF Indústria e Comércio Ltda).

As perdas são proporcionais ao quadrado da corrente e como a corrente é reduzida na razão direta com a melhoria do fator de potência, as perdas são inversamente proporcionais ao quadrado do fator de potência.

Em sistemas de distribuição de energia elétrica de estabelecimentos industriais, as perdas de energia (perdas Joule) variam de 2,5 a 7,5% dos kWh da carga, dependendo das horas de trabalho a plena carga, seção nominal dos condutores e comprimento dos alimentadores e circuitos de distribuição.

## **3. METODOLOGIA**

O que se busca com a correção do fator de potência é manter a taxa de requisição de energia reativa da instalação elétrica à fonte de energia elétrica (concessionária), dentro do FP determinado pela ANEEL (0,92), isso implica que 92% da energia requisitada para concessionária, deverá ser utilizada para realizar trabalho.

A alternativa mais simples é a instalação de banco de capacitores junto a um controlador e TC (Transformador de Corrente), de modo que estes bancos forneçam energia reativa necessária à operação da carga indutiva da instalação elétrica. Como estes bancos são instalados após medição da concessionária, somente a diferença entre a energia reativa e a indutiva necessária a carga e a energia reativa capacitiva liberada pelo banco de capacitores instalado é que será fornecido pela fonte de energia elétrica e que será, portanto capitada pelo sistema de medição da concessionária.



### **3.1. Correção do fator de potência**

Conforme visto anteriormente é muito importante adequar o fator de potência da Instalação Elétrica de acordo com a legislação vigente.

Para se obter uma melhora no Fator de Potência pode-se indicar algumas soluções que devem ser adotadas, dependendo das condições particulares de cada instalação, a seguir segue as mais utilizadas nos dias atuais.

#### **3.1.1. Alteração da rotina operacional**

Este tipo de alteração visa um maior rendimento dos equipamentos instalados, ou seja, utilizando estes equipamentos em plena carga, assim, evitando a sua sub utilização.

Também se deve evitar, sempre que possível, uma grande quantidade de motores de pequena potência em operação durante um longo período e a utilização durante um mesmo período de cargas com elevado consumo de reativo.

#### **3.1.2. Instalação de motores síncronos**

A utilização de motores síncronos pode ser exclusivamente para a correção do Fator de Potência, e também podem estar acoplados a uma carga já existente na instalação, assim, substituindo, por exemplo, um motor de indução.

- Motor subexcitado - corresponde à condição de baixa corrente de excitação na qual o valor da força eletromotriz induzida nos pólos do estator (circuito estatórico) é pequena, o que acarreta a absorção de potência reativa necessária à formação de seu campo magnético. Assim, a corrente estatórica mantém-se atrasada em relação à tensão.
- Motor excitado para a condição de fator de potência unitário – Partindo da condição anterior e aumentando-se a corrente de excitação, obtém-se uma elevação da força eletromotriz no campo estatórico cuja corrente ficará em fase com a tensão de alimentação. Desta forma, o fator de potência assume o valor

unitário e o motor não necessita de potência reativa para a formação de seu campo magnético.

- Motor sobre excitado – Qualquer elevação de corrente de excitação a partir de então proporciona o adiantamento da corrente estatórica em relação à tensão aplicada, fazendo com que o motor funcione com o fator de potência capacitivo, fornecendo potência reativa a rede.

## 3.2. CORREÇÃO A PARTIR DE BANCO DE CAPACITORES.

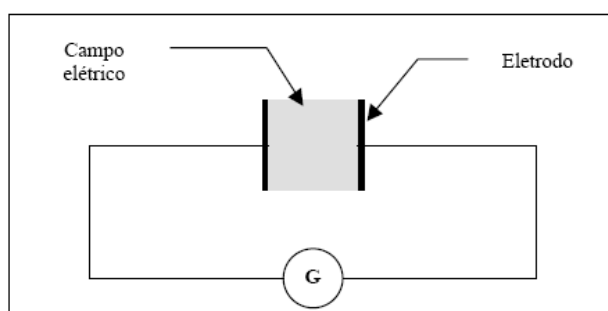
### 3.2.1. Normas para banco de capacitores.

ID – 2.022 – Otimização de Bancos de Capacitores;

PD – 4.001 – Redes de Distribuição Aérea Urbana 15 kV (Rev.2000)

### 3.2.2. Conceitos básicos de um capacitor

Os capacitores são equipamentos capazes de acumular energia, e são constituídos basicamente de duas placas condutoras, postas frontalmente e separadas por um meio qualquer, sendo esse um isolante que pode ser o ar, papel, plástico, etc. Nas faces externas destas placas é ligada uma fonte de tensão que gera um campo eletrostático, no espaço compreendido entre as duas placas, conforme figura 18.



**Figura 18** – Campo elétrico entre placas de um capacitor

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência.** 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

O gerador G pode ser uma bateria ou um gerador qualquer de corrente contínua ou alternada. As placas paralelas são denominadas de eletrodos e o material isolante colocado entre as placas é denominado de dielétrico. A energia eletrostática fica acumulada entre as placas e em menor intensidade, na sua vizinhança.

### 3.2.3. Capacitância

Todo capacitor é avaliado pela quantidade de carga elétrica que é capaz de armazenar no seu campo e é dada pela seguinte expressão:

$$Q = C \times U$$

**Equação 16** – Equação para avaliar a quantidade de carga elétrica que um capacitor pode armazenar

Onde:

Q	- Carga elétrica [C];
C	- Capacitância [F];
U	- Tensão aplicada [V].

A unidade de medida de um capacitor é o farad [F] onde esse é a capacitância C de um determinado capacitor, com isso é correto afirmar que 1 farad é a capacidade de carga elétrica de um capacitor.

### 3.2.4. Energia armazenada

Quando os eletrodos de um capacitor estão submetidos a uma determinada tensão, passa a circular uma corrente de carga em seu interior, e com isso, certa quantidade de energia é acumulada em seu campo elétrico. Essa energia média armazenada no período de  $\frac{1}{4}$  de ciclo pode ser demonstrada pela expressão abaixo. De acordo com a expressão abaixo, pode-se observar que a energia armazenada é diretamente proporcional à variação da capacitância e da tensão aplicada no capacitor, de forma a comparar a quantidade de carga elétrica que um capacitor pode armazenar com a probabilidade de variação da capacitância.

$$E = \frac{1}{2} * C * U^2m$$

**Equação 17** – Equação para comparar quantidade de carga elétrica pela proporcionalidade da variação da capacitância

Onde:

- E                - Energia média armazenada [J];
- C                - Capacitância [F];
- U<sub>m</sub>            - Tensão aplicada [V], valor de pico.

### 3.2.5. Corrente de carga

A corrente de carga de um capacitor depende diretamente da tensão aplicada em seus terminais. Ao se elevar à tensão, eleva-se também a carga acumulada no capacitor. Para se obter uma corrente I, correspondente a carga média do capacitor e que circula durante um determinado período de tempo ( $\Delta t$ ) e para uma variação de tensão ( $\Delta U$ ) em seus terminais, utiliza-se a seguinte expressão:

$$I = C \times \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

**Equação 18** – Equação para calcular a corrente carga média do capacitor

Onde:

- C - Capacitância [F];  
 $\Delta U$  - Variação de tensão [V];  
 $\Delta t$  - Período de tempo durante o qual variou a tensão [s];

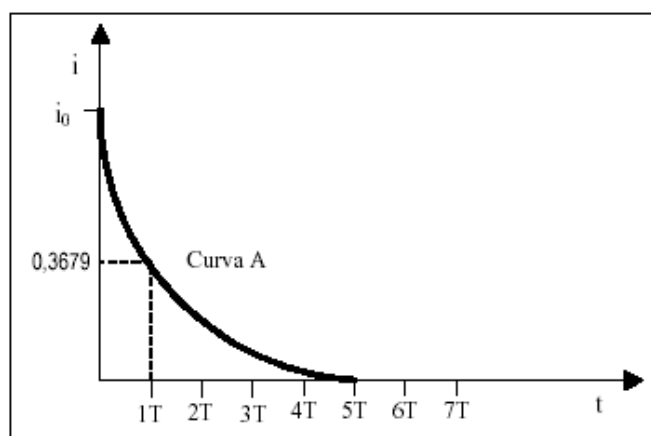
Quando um capacitor é energizado através de uma fonte de corrente contínua, esse estando inicialmente descarregado, a corrente de energização é muito alta e o capacitor se comporta praticamente como se estivesse em curto-circuito, estando sua corrente limitada apenas pela impedância do circuito de alimentação, e após um determinado tempo, a sua corrente chega à zero, conforme pode ser demonstrado pela expressão abaixo e pela figura 19, onde é demonstrado a energização instantânea de um capacitor.

$$i = i_0 \times e^{-t/T}$$

**Equação 19** – Equação para calcular a corrente do capacitor no instante t

Onde:

- i - Corrente do capacitor no instante t;  
 $i_0$  - Corrente inicial de carga no instante  $t = 0s$ ;  
t - Constante de tempo [s];  
T - Tempo em qualquer instante [s].



**Figura 19** – Curva de energização corrente x tempo de um capacitor.

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

### **3.2.6. Características construtivas**

As partes componentes de um capacitor de potência são:

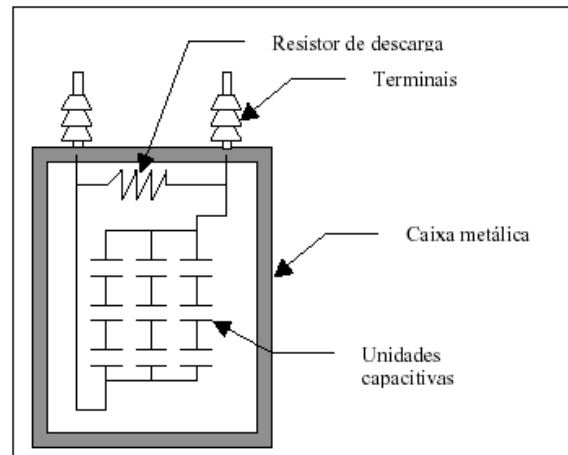
- Caixa;
- Armadura;
- Dielétrico;
- Líquido de impregnação;
- Resistor de descarga.

### **3.2.7. Líquido de descarga**

Hoje em dia, os fabricantes utilizam como líquido molecular impregnante uma substância biodegradável de estrutura constituída de carbono e hidrogênio (ecóleo 200-hidrocarboneto aromático sintético). Além de não agredir o meio ambiente, este impregnante apresenta características elétricas até superiores de seus antecessores.

### **3.2.8. Resistor de descarga**

Quando a tensão é retirada dos terminais de um capacitor, a carga elétrica armazenada necessita ser drenada, para que a tensão resultante seja eliminada, evitando situações perigosas de contato com os referidos terminais. Para que isto seja possível, insere-se entre os terminais do capacitor um resistor com a finalidade de transformar em perdas joule a energia armazenada no dielétrico. Este dispositivo de descarga pode ser instalado internamente ou externamente à unidade capacitiva, sendo mais comum à primeira solução, conforme demonstra a figura 20.



**Figura 20** – Resistor de descarga instalado internamente em uma unidade capacitiva.

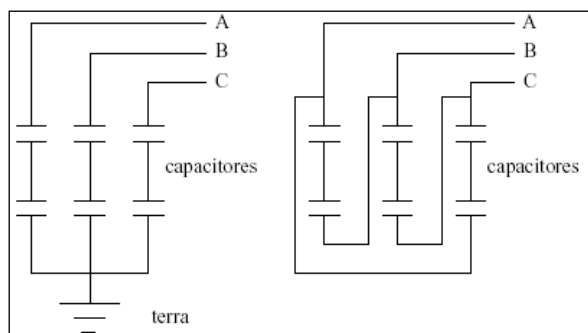
**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

### 3.2.9. Ligação das unidades capacitivas em bancos

Os capacitores podem ser ligados em diversas configurações, formando bancos, sendo que o número de unidades é limitado em função de alguns critérios.

### 3.2.10. Ligação série

Neste tipo de arranjo, pode-se ligar às unidades capacitivas tanto em estrela como em triângulo, conforme figura 21.



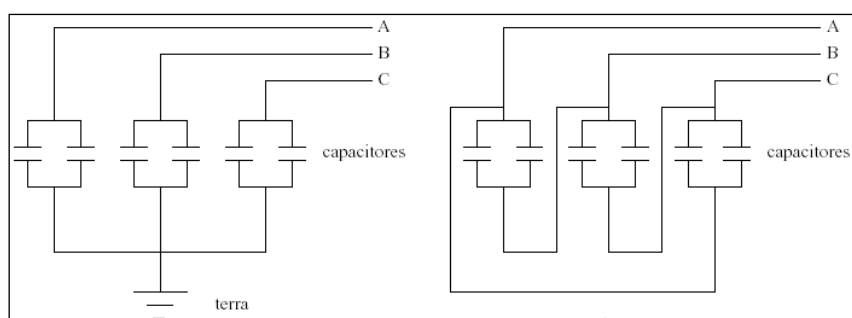
**Figura 21** – Ligação em série de um banco de capacitores.

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência.** 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

Neste tipo de ligação deve ser somente empregado em sistemas cujo neutro esteja efetivamente aterrado, o que normalmente ocorre nas instalações industriais. Desta forma, este sistema oferece uma baixa impedância para terra às correntes harmônicas, reduzindo substancialmente os níveis de sobretensão devido aos harmônicos referidos.

### 3.2.11. Ligação paralela

Já neste caso, os capacitores podem ser ligados também nas configurações estrela ou triângulo, respectivamente, conforme demonstra a figura 21.



**Figura 22** – Ligação paralela em um banco de capacitores.

**Fonte:** FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência.** 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí



Em instalações industriais de baixa tensão, normalmente os bancos de capacitores são ligados na configuração triângulo, utilizando-se, para isto, unidades trifásicas.

### **3.3. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS**

#### **3.3.1. Potência nominal**

Os capacitores são normalmente designados pela sua potência nominal reativa, contrariamente aos demais equipamentos, cuja característica principal é a potência nominal aparente. A potência nominal de um capacitor, dada em kVAr, é aquela absorvida do sistema quando este será submetido a uma tensão e frequência nominais a uma temperatura ambiente não superior a 20°C (ABNT).

#### **3.3.2. Frequência nominal**

No Brasil os capacitores devem operar normalmente na frequência de 60Hz. Para outras frequências é necessário especificar o seu valor correspondente, já que a sua potência nominal é diretamente proporcional a este parâmetro.

#### **3.3.3. Tensão nominal**

Os capacitores são normalmente fabricados para tensão nominal do sistema entre fases ou entre fase e neutro, respectivamente, tanto para as unidades trifásicas e para as monofásicas.

### **3.4.BANCO DE CAPACITORES FIXOS**

É recomendado para indústrias com poucos equipamentos e deverá ser desligado após utilização dos mesmos. Um banco fixo de capacitores é instalado próximo ao transformador ou próximo aos CCM's.

### **3.5. CORREÇÃO COM CAPACITORES INDIVIDUAIS**

A instalação de capacitores em paralelo com a carga é a solução mais empregada para a correção do fator de potência em instalações industriais, comerciais e de sistemas de distribuição e de potência, a fim de reduzir a potência reativa demandada à rede e que os geradores da concessionária deveriam fornecer na ausência destes capacitores, uma vez que estes fornecem energia reativa ao sistema elétrico onde estão ligados. É o método mais econômico e o que permite maior flexibilidade de aplicação.

Os capacitores usados são chamados de "capacitores de potência" e são caracterizados por sua potência nominal. Podem ser fabricados em unidades monofásicas e trifásicas, para alta e baixa tensão e com valores padronizados de potência, tensão e frequência, sendo ligados internamente em delta e com potências de até 50 kVAr.

Na maior parte das aplicações, os capacitores são utilizados em bancos (trifásicos), montados com unidades trifásicas ou monofásicas (caso de alta tensão), o que permite a obtenção de potências relativamente elevadas, além de possibilitar maior flexibilidade de instalação e de manutenção.

A correção com capacitores individuais é feita ponto a ponto, ou seja, todas as cargas são corrigidas diretamente nos motores elétricos. Essa prática é utilizada em indústrias que possuem motores de grande porte e com funcionamento contínuo a plena potência.

### **3.6. BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICOS**

Recomenda-se dividir em estágios de no máximo 25 kVAr (380/440V) ou 15kVAr (220V) por estágio do controlador, excetuando-se um dos estágios que deve ter a metade da potência em kVAr do maior estágio para facilitar o ajuste fino do fator de potência, pois os controladores modernos fazem leitura por varredura, buscando a melhor combinação de estágios em cada situação.

O valor máximo para os estágios não é aleatório. Está baseada em aspectos práticos de aplicação e permite que mantenha as correntes de surto, provocadas pelo chaveamento de bancos (ou módulos) em paralelo, em níveis aceitáveis para os componentes. Estas correntes podem atingir valores superiores a 100 vezes a corrente nominal dos capacitores, partindo deste dado, todo o tipo de dano que possa ser provocado por altas correntes em um circuito qualquer (atuação de fusível, queima de contatos dos contatores e queima dos resistores de pré-carga).

### **3.7. CORREÇÃO POR UM SISTEMA DE COMBINAÇÃO DE CAPACITORES**

É utilizado em indústrias que conhecem exatamente a necessidade de kVAr para cada carga existente, onde são compensados os motores de maior potência e o restante das cargas são corrigidas por bancos automáticos de capacitores.

### **3.8. PROTEÇÃO CONTRA CORRENTE DE SURTO**

Em bancos automáticos com estágios superiores a 15 kVAr em 220V e 25kVAr em 380/440V, deve-se utilizar sempre em série com os capacitores, proteção contra o surto de corrente que surge no momento em que se energiza os capacitores. Esta proteção pode ser através da associação de contatores convencionais, mais os resistores de pré-carga ou através de contator convencional em série com indutores anti-surto feitos com os próprios cabos de força que alimentam os capacitores.

Este tipo de correção é utilizado em indústrias que querem assegurar a dosagem exata da potência dos capacitores ligada a qualquer momento e eliminando possíveis sobretensões, melhoria do fator de potência geral da instalação eliminando quaisquer tipos de cobrança pelo uso de kVAr.

### **3.9. DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE CAPACITORES**

#### **3.9.1. Método prático**

A determinação exata da potência reativa dos capacitores a instalar para a elevação do fator de potência de uma instalação de baixa tensão depende de uma análise minuciosa das cargas que utilizam energia reativa, de seu regime de funcionamento e da localização pretendida para os capacitores. Trata-se de um problema individual para cada instalação, não tendo soluções padronizadas. Existe, portanto um método prático, sendo este recomendado pelas concessionárias, que possibilita a obtenção da potência reativa aproximada, a partir da demanda ativa média da instalação e dos fatores de potência original e desejado.

O método consiste em analisar as contas de energia elétrica dos últimos doze meses, assim determinando o valor da energia ativa consumida (kWh) e o valor médio do fator de potência, após isto é feito o estudo para definir o número médio de horas de funcionamento no mesmo período. Divide-se o valor médio da energia ativa mensal consumida, pelo número médio de horas de funcionamento mensal, determinando a demanda ativa média (kW). Localiza-se na tabela em ANEXO, a coluna correspondente ao fator de potência médio, e seguindo-se à direita até a coluna do fator de potência desejado, obtém-se um número multiplicador. Multiplica-se a demanda ativa média, pelo número multiplicador, chegando-se, então, à potência reativa (kVAr) necessária para a compensação desejada.

### 3.9.2. Manobra e proteção de capacitores

Antes de se projetar os componentes de manobra e de proteção para um determinado capacitor ou um banco de capacitores, é necessário conhecer seus limites e suas características de fabricação. Atualmente no Brasil, as normas que regem a fabricação, testes e aplicação de capacitores em sistemas de potência são:

- NBR 5060 – Guia para instalação e operação de capacitores de potência;
- NBR 5282 – Capacitores de potência em derivação – Especificação.

As normas acima citadas têm como base a IEC 60831 – 1 (capacitores de potencia auto-regenerativos para sistemas contenção  $\leq 1$  kV) e IEC 60831 – 2 (capacitores de potência auto-regenerativo para sistemas de contenção  $\leq 1$  kV procedimento de testes).

Os seguintes parâmetros dos capacitores de potencia devem ser considerados:

**Tabela 5** – Parâmetros de capacitores de potência

Parâmetros	Tolerância	Norma	Item
Temperatura de operação	+5°C a +45°C (+5/B)	NBR 5282	4.1.3
Altitude máxima	1.000 m	NBR 5282	4.2
Máxima tensão permissível	1,1 x Vnom /12h a cada 24h	NBR 5282	5.2
Máxima corrente permissível	1,30 x Inom (rms)	NBR 5282	5.3
Resistência de isolamento	> 1.000 MΩ		
Tolerância na Capacitância			

**Fonte :** NBR 5060, NBR 5282 e IEC 60831-1

Com base nos valores normatizados os capacitores podem operar continuamente com 30% acima da sua corrente nominal, e sua tolerância de fabricação é de até 10%, todos os equipamentos de manobra e proteção estarão sujeitos em regime contínuo a 1,43 vezes a corrente nominal do capacitor, conforme a NBR 5060.

Então se pode adotar a corrente de projeto para o banco de capacitores a seguinte expressão:

$$I_p \geq 1,43 \times I_{nc}$$

**Equação 20** – Equação para calcular a corrente do projeto

Onde:

- $I_p$  - Corrente de projeto  
 $I_{nc}$  - Corrente nominal do capacitor

### 3.9.3. Condutores de alimentação

Os condutores de ligação do capacitor ou do banco de capacitores devem ser dimensionados de acordo com a corrente de projeto ( $I_p$ ), conforme a equação acima. Também deve-se levar em consideração outros fatores externos para o dimensionamento dos condutores, sendo eles:

- Maneira de instalar;
- Temperatura ambiente;
- Agrupamento dos circuitos.

Todos esses fatores de correção acima mencionados são normatizados e podem ser consultados com maiores detalhes na NBR 5410.

### 3.9.4. Proteção do banco de capacitores

A proteção de um banco de capacitores pode ser efetuada por fusíveis, disjuntores termomagnéticos e relés de proteção.

Conforme a NBR 5060, os disjuntores devem ser dimensionados com 1,43 vezes a corrente nominal do capacitor, já a norma americana IEEE Std 141-1986, os disjuntores de caixa moldada com disparador magnético devem ser dimensionados com 1,35 vezes a corrente nominal, enquanto os demais disjuntores devem utilizar para o cálculo 1,5 vezes a corrente nominal do capacitor.

Ao se dimensionar os disjuntores, deve-se levar em consideração não só a características tempo x corrente dá atuação térmica, mas principalmente a sua capacidade dinâmica.

Os fusíveis devem ser dimensionados entre 1,65 a 2,5 vezes a corrente nominal do capacitor e ao se utilizar fusíveis, optar pelos do tipo retardado.

Na utilização de fusíveis como proteção a sua capacidade dinâmica não é fundamental para a escolha do dispositivo, pois atualmente no mercado existem modelos com uma capacidade mínima de ruptura de 100 kA e a norma IEC 60269-1, define uma capacidade de ruptura de 6kA.

### **3.9.5. Vantagens da correção do fator de potência para a indústria**

Para a empresa Engeletrica (<http://www.engeletrica.com.br/correcao-fator-de-potencia-fator-de-potencia.htm> acesso em 26/04/2011) as vantagens para a indústria são: redução significativa do custo de energia elétrica, aumento da eficiência energética da empresa ( melhoria de Tensão), aumento da capacidade de equipamentos do custo de manobra, aumento da vida útil das instalações e equipamentos, redução do efeito Joule, redução da corrente reativa na rede elétrica.

### **3.9.6. Vantagens da correção do fator de potência para a concessionária**

Segundo a empresa Engeletrica (<http://www.engeletrica.com.br/correcao-fator-de-potencia-fator-de-potencia.htm> acesso em 26/04/2011) o bloco de potência reativa deixa de circular no sistema de transmissão e distribuição, evita as perdas pelo efeito Joule, aumenta a capacidade de geração 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.

#### **4. ESTUDO DE CASO**

Para o estudo de caso foi feito medições nas potências Ativas e Reativas de dez em dez minutos entre os dias 01/10/2011 à 25/10/2011 na Empresa Natura, localizada na Rodovia Anhanguera, e os resultados estão apresentados a seguir:



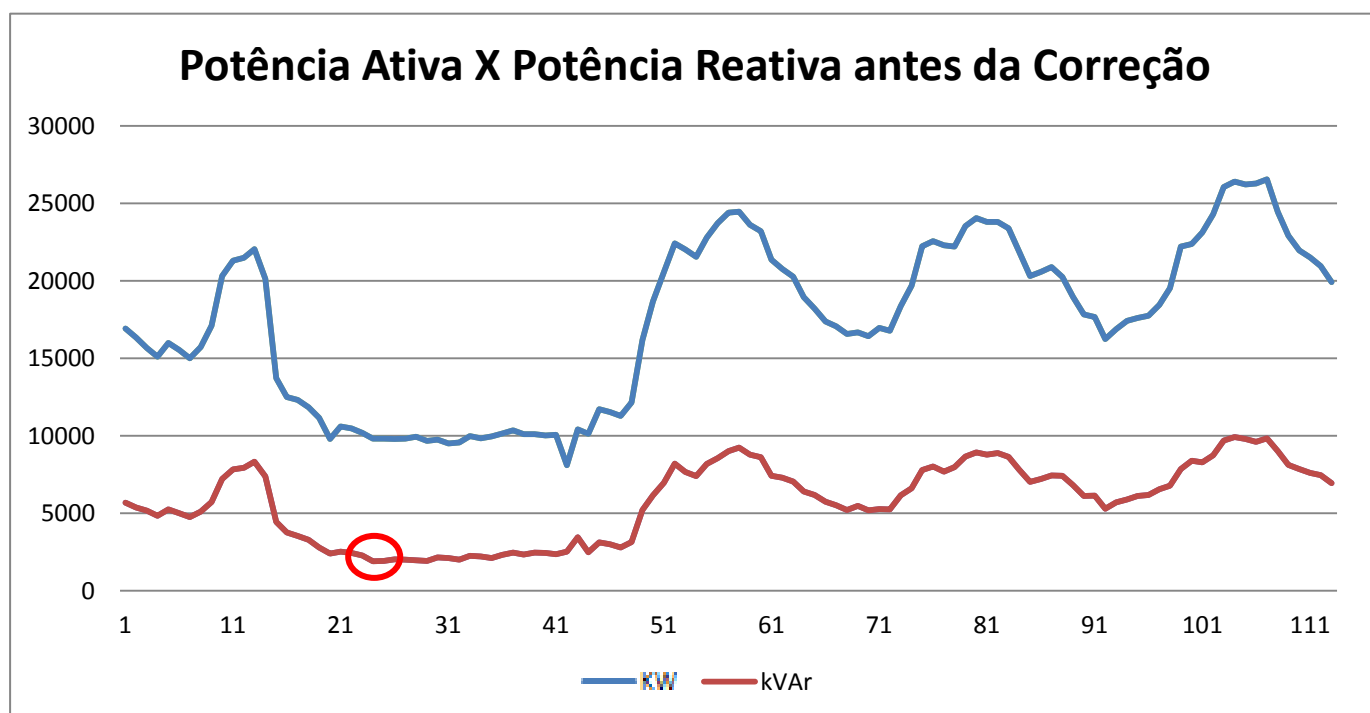
## 5. RESULTADOS

A partir das medições e dos cálculos de fator de potência aplicado, obteve-se o resultado que a Empresa Natura Cosméticos trabalha dentro das normas estabelecidas pelo órgão regulamentador, a ANEEL, apresentando um Fator de Potência  $\geq 0,94$ , enquanto a norma determina que o fator de potência necessário para o não pagamento do excedente na conta de energia é igual a 0,92.

Caso a Empresa queira melhorar ainda mais o seu fator de potência para liberar energia para a rede, a mesma deverá implementar capacitores de  $2,4\mu\text{F}$ , determinado pela equação abaixo, no qual deixará o seu fator de potência em 0,99.

$$C = P \frac{(tg\phi - tg'\phi)}{\omega V^2}$$

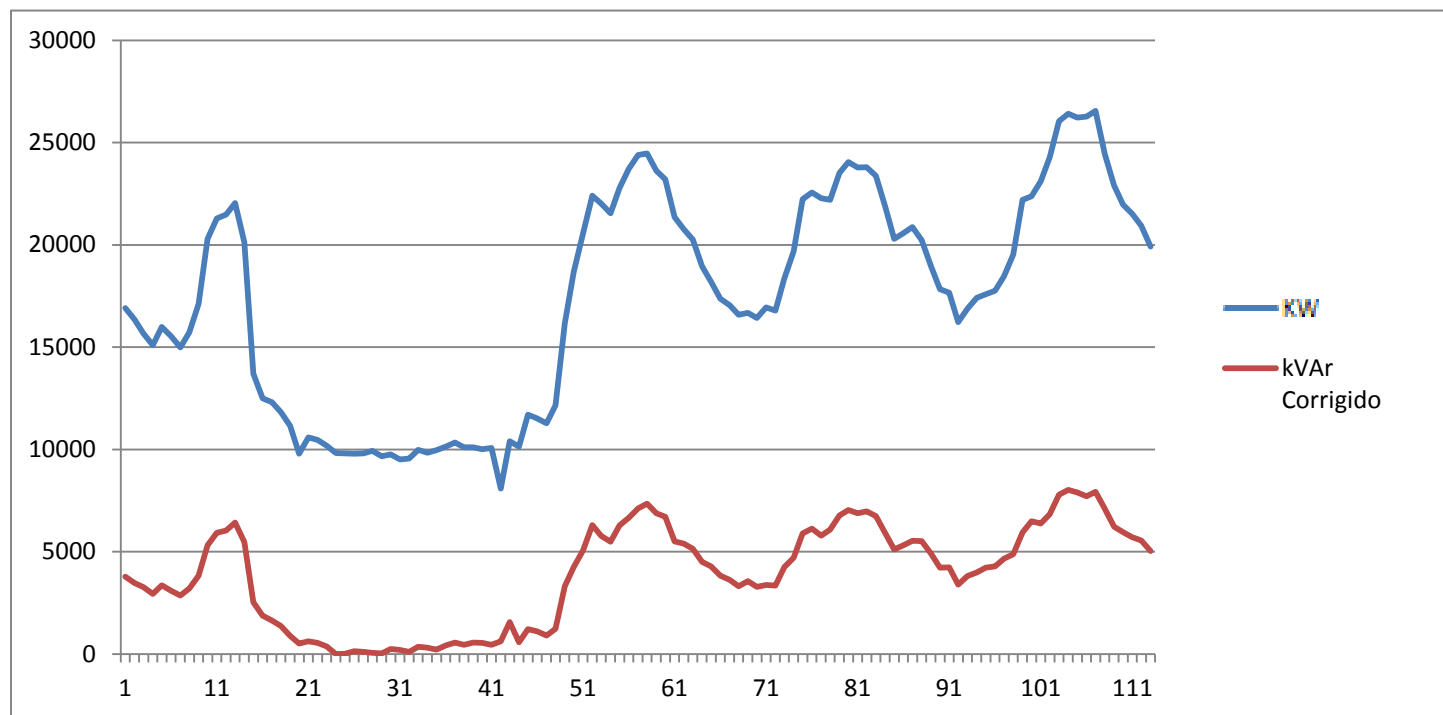
**Equação 21** – Calculo do Capacitor



**Figura 23** - Potência Ativa X Potência Reativa antes da Correção

Fonte: THOMAZINI, Daniel Berti, Autor.

Assim utilizando os capacitores conforme supracitado, visualiza-se no gráfico abaixo que após a correção do fator de potência, a curva da Potência Reativa (kVAr), passou a ficar mais próximo de zero.



**Figura 24 - Potência Ativa X Potência Reativa antes da Correção**

**Fonte: THOMAZINI, Daniel Berti, Autor.**

E aplicando a equação 5 deste trabalho pode-se calcular o valor da Energia (VA) que a concessionária poderá vender para outro consumidor se a Empresa Natura corrigir seu fator de potência para 0,99.

$$P = S * \cos\varphi$$

Portanto:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad \text{onde } \varphi = \text{FP}$$

**Cálculo com fator de potência em 0,95:**

$$S = \frac{3050691,84}{0,95} = 3,2 \text{ MVA}$$

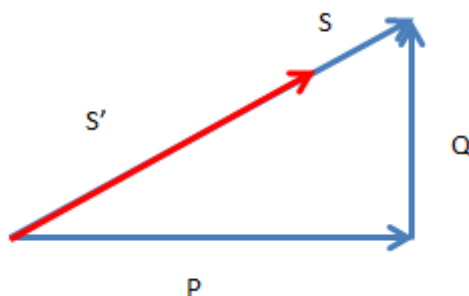
**Cálculo com fator de potência em 0,99**

$$S' = \frac{3050691,84}{0,99} = 3,08 \text{ MVA}$$

$$S_{\text{livre para a concessionária}} = S - S'$$

$$S_{\text{livre para a concessionária}} = 3,2 \text{ MVA} - 3,08 \text{ MVA}$$

$$S_{\text{livre para a concessionária}} = 160,5 \text{ KVA}$$



**Figura 25** – Potência Liberada para a Concessionária

**Fonte:** THOMAZINI, Daniel Berti, Autor.

Evidenciou-se que quanto mais próximo de 1 positivo o fator de potência estiver, melhor as vantagens para a concessionária e para o consumidor, de forma que o consumidor economizará verba devido ao não pagamento do valor determinado pela ANEEL para o excedente na utilização da energia reativa, e para a concessionária neste caso com a possibilidade de liberar e vender a outros consumidores 160,5 kVA.

## 6. CONCLUSÃO

A partir da execução deste trabalho de pesquisa pode-se entender e avaliar as formas de correção de fator de potência, assim como as vantagens e desvantagens que cada uma apresenta. Este assunto é de grande valia para a economia e qualidade de energia elétrica em empresas de pequeno, médio e grande porte, pois deseja-se um melhor aproveitamento da energia, com redução nos gastos.

Foi de grande satisfação poder adquirir conhecimento em tarifação da energia, contas e conceitos utilizados pelas concessionárias de energia para cobrar o excedente de energia reativa dos consumidores.

E por fim todas estas informações sobre fator de potência, puderam mostrar que este assunto influencia diretamente na geração, transmissão e principalmente no consumo de energia elétrica no país, sua correção e a utilização consciente da energia traz benefícios aos consumidores e as concessionárias de forma que se cada empresa fizesse este procedimento, seria possível utilizar a energia existente atualmente sem precisar que as usinas hidrelétricas gerem mais energia ou sejam construídas.

## 7. BIBLIOGRAFIA

MANUAL PARA CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA. São Paulo: WEG, 2002.

MAMEDE Filho, João; **Instalações elétricas industriais**, 3<sup>a</sup>/5<sup>a</sup>/7<sup>a</sup>. Edição, Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 2007/1989/1995.

COTRIM, A. NBR 5410 - **Norma técnica de instalações elétricas de baixa tensão**. São Paulo,1997.

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas**. 2<sup>a</sup>/3<sup>a</sup>. Edição. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

<http://www.engeletrica.com.br/correcao-fator-de-potencia-fator-de-potencia.htm> acesso em 26/04/2011

CARDOSO, F. L. (2007). Correção do Fator de Potência. Eletro-Estudos Engenharia. Recuperado em 28/05/2011. Disponível em [www.eleto-estudo.com.br](http://www.eleto-estudo.com.br)

CREDER, Hélio. *Instalações Elétricas*. 14.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CREDER, Hélio. *Instalações Elétricas*. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1974.

FILHO, João Mamede. *Instalações Elétricas Industriais*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1979.

FILHO, João Mamede. *Instalações Elétricas Industriais*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5060**: Guia para instalação e operação de capacitores de potência. Rio de Janeiro, 1977.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5282**: Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000 V. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.

FUMACHE, Cleberson. LIMA, Arildo Aparecido Teixeira de. MARQUES, William. **Correção do fator de potência**. 2007. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Faculdade Politécnica de Jundiaí

FRANCESCHINI, Mauricio Dallacqua. POTENCIAL DE ECONOMIA COM CONTROLE DO FATOR DE POTÊNCIA DENTRO DE UMA EMPRESA. 2004. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco

ANEXO

