

ASPECTOS BÁSICOS DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Prof. Eng. Dennys Lopes Alves

Versão 0.5 – Abril/2021.

Sobre o Autor

- Eletricista Industrial pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do RN - Senai/RN;
- Eletricista de Automação e Instrumentação Industrial pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do RN - Senai/RN;
- Técnico em Eletrotécnica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN - IFRN;
- Técnico em Telecomunicações pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do RN - Senai/RN;
- Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN;
- Engenheiro de Segurança do Trabalho pela Universidade Potiguar - UNP;
- Mestre em Engenharia de Petróleo e Gás com Ênfase em Automação Industrial pela Universidade Potiguar - UNP.

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006). Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho (*Lato Sensu*) pela Universidade Potiguar (2013) e Mestrado Profissional em Engenharia de Petróleo e Gás (*Stricto Sensu*) com ênfase em Automação Industrial pela Universidade Potiguar (2014).

Desde 2014 é professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), estando atualmente (2021) vinculado ao campus João Câmara. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Instalações Elétricas de Baixa Tensão e Instalações Elétricas Industriais.

Link Currículo Lattes:

<http://lattes.cnpq.br/1862473549371846>

Índice de Ilustrações

Figura 1: Energia total, disponível em: http://servicos.coelba.com.br/comercial-industrial/Pages/energia-reativa.aspx , acesso em 12/11/2016.	8
Figura 2: Energia ativa e reativa em motores e transformadores, disponível em: http://www.reativaenergia.com.br/faq.html , acesso em 12/11/2016.	8
Figura 3: Princípio de funcionamento do motor elétrico, disponível em: http://www.feiradeciencias.com.br/sala22/motor_teorial.asp , acesso em 13/11/2016.	8
Figura 4: Analogia para energia ativa, reativa e total, disponível em: http://www.elektro.com.br/seu-negocio/energia-ativa-e-reativa , acesso em 12/11/2016.	9
Figura 5: Comprimento e área da secção transversal do condutor, disponível em: http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/leis-de-ohm-resistencia-eletrica-resistividade-e-leis-de-ohm.htm , acesso em 28/11/2016.	10
Figura 6: Comparativo entre equipamentos de potências elétricas diferentes, disponível em: http://pt.slideshare.net/alinedoohan/eletricidade-e-mecnica-aula-6 , acesso em 28/11/2016.	11
Figura 7: Triângulo de potências, disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Pot%C3%Aancia_el%C3%A9trica , acesso em 28/11/2016.	12
Figura 8: Analogia para baixo F.P. e alto F.P., disponível em: http://www.empalux.com.br/?a1=n&id=27 , acesso em 12/11/2016.	16
Figura 9: Triângulo de potências, disponível em: http://www.abb-conversations.com/br/2015/10/correcao-de-fator-de-potencia-e-harmonicadas-em-instalacoes-eletricas/ , acesso em 12/11/2016.	17
Figura 10: Triângulo de potências, disponível em: https://fasorenergia.wordpress.com/fattor-de-potencia/ , acesso em 12/11/2016.	17
Figura 11: Triângulo de potências e respectivas unidades, disponível em: http://eletricidade-eletronica-telecom.blogspot.com.br/2011/11/o-que-voce-precisa-saber-sobre-fator-de.html , acesso em 12/11/2016.	18
Figura 12: relação gráfica entre o angulo do F.P. e a magnitude da potência reativa, disponível em: http://angolapowerservices.blogspot.com.br/2012/11/o-factor-de-potencia-suas-causas-e.html , acesso em 21/11/2016.	19
Figura 13: Representação gráfica das potências reativa indutiva e reativa capacitiva, disponível em: http://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P_19/Tema_4/UMH_03.htm , acesso em 21/11/2016.	19
Figura 14: Medidor de F.P. (cosfímetro) analógico, disponível em: http://www.jng.com.br/produtos-detalhes.asp?idprod=75 , acesso em 12/11/2016.	21
Figura 15: Medidor de F.P. (cosfímetro) digital, disponível em: http://sferemeter.com.br/1-4-digital-power-factor-meter-pt/123774 , acesso em 12/11/2016.	21
Figura 16: Alicete wattímetro, disponível em: http://itest.com.br/Eletronica/Alicate-Wattimetro/alicate-wattimetro-digital-trifasico-cat-iii-c-medicao-harmonica-25-h-minipa-et-4080-.phtml , acesso em 12/11/2016.	22
Figura 17: Analisador de qualidade de energia, disponível em: http://homis.com.br/eletrica/analizadores-de-energia/analizador-de-qualidade-de-energia-trifasico-hae-303 , acesso em 12/11/2016.	22
Figura 18: Exemplo de circuito puramente resistivo, disponível em: http://comandoseletricosii.blogspot.com.br/2013/11/aula-18-correcao-do-fator-de-potencia.html , acesso em 21/11/2016.	23

Figura 19: Comportamento resistivo, indutivo e capacitivo, disponível em: http://www.portaleletricista.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/ , acesso em 13/11/2016.	24
Figura 20: comparativo entre as potências reativas indutivas e capacitivas, disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgFDEAG/fator-potencia , acesso em 21/11/2016.	25
Figura 21: Princípio da correção do F.P. da rede elétrica, disponível em: http://www.cobrapi.com.br/edu/eletricidade/correcao-do-fator-de-potencia-e-a-compensacao-reativa.html , acesso em 21/11/2016.	27
Figura 22: Princípio da correção do F.P. em circuitos com motores e transformadores, disponível em: http://www.ceripa.com.br/Manual%20Reativo.pdf , acesso em 21/11/2016.	27
Figura 23: Triângulo de potências antes e após a correção, disponível em: http://www.abb-conversations.com/br/2015/10/correcao-de-fator-de-potencia-e-harmonicadas-em-instalacoes-eletricas/ , acesso em 13/11/2016.	28
Figura 24: Painel elétrico com células capacitivas e com aberturas de ventilação, disponível em: http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/pmi-tecnologia/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/instalacao-de-banco-de-capaci , acesso em 21/11/2016.	30
Figura 25: Exaustor integrado a tampa do quadro elétrico, disponível em: http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/pmi-tecnologia/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/instalacao-de-banco-de-capa , acesso em 21/11/2016.	31
Figura 26: Banco de capacitores instalado em subestação de distribuição, disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAA5QcAG/banco-capacitores , acesso em 13/11/2016.	33
Figura 27: Banco de capacitores para sistemas de distribuição de energia elétrica, disponível em: http://www.inepar.com.br/not_capacitores_eletropaulo.htm , acesso em 13/11/2016.	33
Figura 28: Exemplo de sistema supervisorio para gerenciamento do F.P. e do consumo reativo, disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfMaIAE/gerenciamento-energia-coca-cola , acesso em 21/11/2016.	34
Figura 29: Células capacitivas instaladas em painel, disponível em: http://www.inducap.com.br/bancos-de-capacitores , acesso em 13/11/2016.	34
Figura 30: Exemplo de banco de capacitores instalados em um painel elétrico, disponível em: http://www.mabitec.com.br/banco-capacitores-preco , acesso em 13/11/2016.	35
Figura 31: Painel com controlador automático de fator de potência e indicação visual do conjunto de células ativas, disponível em: http://stelc.net/thw_inustrial/correcao-de-fator-potencia/ , acesso em 13/11/2016.	35
Figura 32: Controlador de fator de potência WEG, disponível em: http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Capacitores-e-Correcao-do-Fator-de-Potencia/Controladores-automaticos-do-Fator-de-Potencia , acesso em 13/11/2016.	35
Figura 33: Controlador de fator de potência trifásico, disponível em: http://www.samrello.com.br/?pg=21&id=217 , acesso em 13/11/2016.	36
Figura 34: Exemplo de bancos capacitivos, disponível em: http://www.portaleletricista.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/ , acesso em 13/11/2016.	36
Figura 35: Unidade capacitiva monofásica do fabricante WEG, disponível em: http://www.hpeletricidade.com.br/site/produto_dest.php?cod=15 , acesso em 21/11/2016.	37

Versão 0.5	Aspectos Básicos da Correção do F.P.	Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.
Figura 36:	Exemplo de módulo capacitivo trifásico, disponível em: http://www.engeletrica.com.br/download/arquivos/capacitorCorrecaoG[1].jpg , acesso em 21/11/2016.	37
Figura 37:	Exemplo de contator para acionamento de banco de capacitores, disponível em: http://www.jsqeloja.com/ypy5putai-contator-para-manobra-de-capacitores-mod-cwmc32-1na-40a-bobina-127v-ou-220v , acesso em 21/11/2016. ...	38
Figura 38:	Conjunto de segurança Diazed, disponível em: http://www.portaleletricista.com.br/tipos-de-fusiveis/ , acesso em 22/11/2016.	39
Figura 39:	Elementos do conjunto de segurança Diazed, disponível em: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAf34QAJ/eletricidade-industrial-tudo-sore-motores-introdu?part=4 , acesso em 22/11/2016.	39
Figura 40:	Princípio de funcionamento do disjuntor termomagnético, disponível em: http://fisicaevestibular.com.br/Universidades2014/unesp014.htm , acesso em 22/11/2016.	40
Figura 41:	Exemplo de disjuntores termomagnéticos, disponível em: https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funcionam-os-disjuntores/ , acesso em 22/11/2016.	41
Figura 42:	Classificação dos disjuntores quanto ao número de polos, disponível em: http://www.portaleletricista.com.br/disjuntor-termomagnetico/ , acesso em 22/11/2016.	41
Figura 43:	Exemplo de chave seletora de 3 posições, disponível em: http://www.eletricajmt.com.br/product.php?id_product=186 , acesso em 22/11/2016.	42
Figura 44:	Exemplo de barramentos de cobre com termo contrátil, disponível em: http://www.grupobtm.com.br/produtos.cfm?c=6&i=21 , acesso em 22/11/2016.	43
Figura 45:	Barramentos protegidos com placa de acrílico, disponível em: http://ce.olx.com.br/fortaleza-e-regiao/servicos/protecao-de-acrilico-para-quadros-eletricos-e-botoes-123697694 , acesso em 22/11/2016.	43
Figura 46:	Placa de proteção de acrílico instalada no quadro elétrico, disponível em: http://www.diariodoeletricista.com.br/2016/04/05/e-requisito-utilizar-acrilico-policarbonato-na-norma-5410/ , acesso em 22/11/2016.	44
Figura 47:	Exemplos de F.P. de referência, disponível em: http://blog.wgr.com.br/2011/06/energia-reativa-o-que-o-consumidor-paga.html , acesso em 13/11/2016.	44
Figura 48:	F.P nos períodos indutivo e capacitivo, disponível em: ROTONDO JUNIOR, salvador. Correção do fator de potência i: conceitos básicos e informações gerais sobre a correção do fator de potência.	46

Índice de Equações

Equação 1: 1ª Lei de Ohm.	9
Equação 2: 2ª Lei de Ohm.	10
Equação 3: Potência elétrica em função da energia e do tempo.	11
Equação 4: Potência elétrica ativa em circuitos monofásicos.	12
Equação 5: Potência elétrica reativa em circuitos monofásicos.	13
Equação 6: Potência elétrica aparente (total) em circuitos monofásicos.	13
Equação 7: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos monofásicos.	13
Equação 8: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos monofásicos, expressa em termos de suas respectivas unidades.	14
Equação 9: Potência elétrica ativa em circuitos trifásicos.	14
Equação 10: Potência elétrica reativa em circuitos trifásicos.	14
Equação 11: Potência elétrica aparente (total) em circuitos trifásicos.	14
Equação 12: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos trifásicos.	15
Equação 13: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos trifásicos, expressa em termos de suas respectivas unidades.	15
Equação 14: Fator de potência.	16
Equação 15: Fator de potência em termos do cosseno do ângulo entre P e S. ...	17
Equação 16: Fator de potência em termos da tangente do ângulo entre S e P. ..	17
Equação 17: Fator de potência medido.	20
Equação 18: Perdas ôhmicas totais.	26
Equação 19: Potência reativa a ser fornecida pelos capacitores.	28
Equação 20: Custo da energia reativa excedente.	45
Equação 21: Multa por baixo F.P. em função do valor da fatura.	45

Índice de Tabelas

Tabela 1: Código de cores para base de fusíveis Diazed.	39
Tabela 2: F.P. medido x Acréscimo percentual da conta de energia.	45

Sumário

Sobre o Autor	1
Índice de Ilustrações	2
Índice de Equações	5
Índice de Tabelas.....	5
Apresentação.....	7
1. Energias Ativa e Reativa.....	7
2. Potência Elétrica CA.....	11
3. Fator de Potência.....	15
3.1. F.P. Indutivo × F.P. Capacitivo.....	22
3.2. Baixo F.P.: Causas e Efeitos.....	25
4. Correção do Fator de Potência.....	26
5. Banco de Capacitores.....	29
5.1. Unidades capacitivas.....	36
5.2. Dispositivos de manobra.....	38
5.3. Sistema de proteção.....	39
6. Legislação e Faturamento.....	44
6.1. Período indutivo x período capacitivo.....	46
Referências	47

Apresentação

Este texto tem como objetivo básico abordar os principais aspectos teóricos e práticos correlacionados as técnicas de correção do fator de potência de equipamentos e instalações elétricas.

Optou-se por uma linguagem simples, direta e objetiva como forma de abordar esta temática do modo mais usual e transparente possível.

Estão descritas neste material as principais etapas inerentes ao dimensionamento e montagem de um banco de capacitores destinado a correção do fator de potência e redução do consumo de energia reativa, por conseguinte, o mesmo pode ser utilizado como fonte adicional de consulta aos interessados nesta temática.

Como pré-requisitos desejáveis, porém não obrigatórios, cita-se a análise de circuitos em corrente alternada, o princípio operativo de dispositivos elétricos tais quais resistores, indutores e capacitores, além de dispositivos de manobra e proteção utilizados em quadros de comando, como por exemplo: disjuntores, fusíveis e contactores.

Receberemos com entusiasmo eventuais críticas ou sugestões de melhorias acerca deste material. Autorizamos previamente a reprodução e impressão deste material, por quaisquer meios ou processos, desde que sejam dados os devidos créditos ao autor.

1. Energias Ativa e Reativa

O correto funcionamento dos equipamentos elétricos constituídos por bobinas (espiras, indutores, enrolamentos, etc.), como, por exemplo, os motores e os transformadores, depende da alimentação destes equipamentos a partir de duas modalidades distintas de energia, qual sejam: energia ativa e energia reativa. A soma das energias ativa e reativa fornecerá a energia total. A Figura 1 ilustra a energia total como sendo constituída a partir das energias ativa e reativa. Na Figura 2 exprime-se o fluxo das energias ativa e reativa no funcionamento de transformadores e de motores.



Figura 1: Energia total, disponível em: <http://servicos.coelba.com.br/comercial-industrial/Pages/energia-reativa.aspx>, acesso em 12/11/2016.

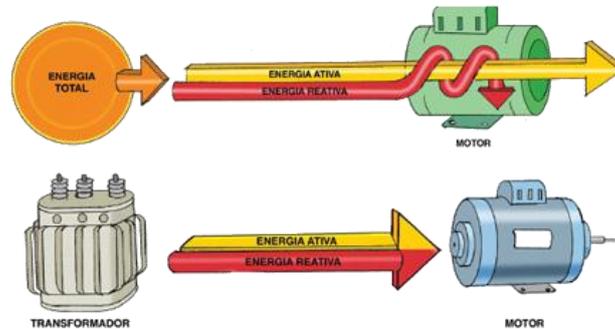


Figura 2: Energia ativa e reativa em motores e transformadores, disponível em: <http://www.reativaenergia.com.br/faq.html>, acesso em 12/11/2016.

O princípio operativo básico de um motor elétrico vai depender do fluxo magnético intrínseco as suas bobinas, sendo este fluxo, em parte, produzido a partir da energia reativa que alimenta as bobinas do motor, ou seja, a energia reativa produzirá o fluxo magnético sobre as bobinas do motor fazendo com que o eixo dele possa girar. Na Figura 3 ilustra-se de forma didática a interação entre os campos magnéticos das bobinas que constituem um motor elétrico. Tais campos estão intrinsecamente relacionadas a energia reativa.

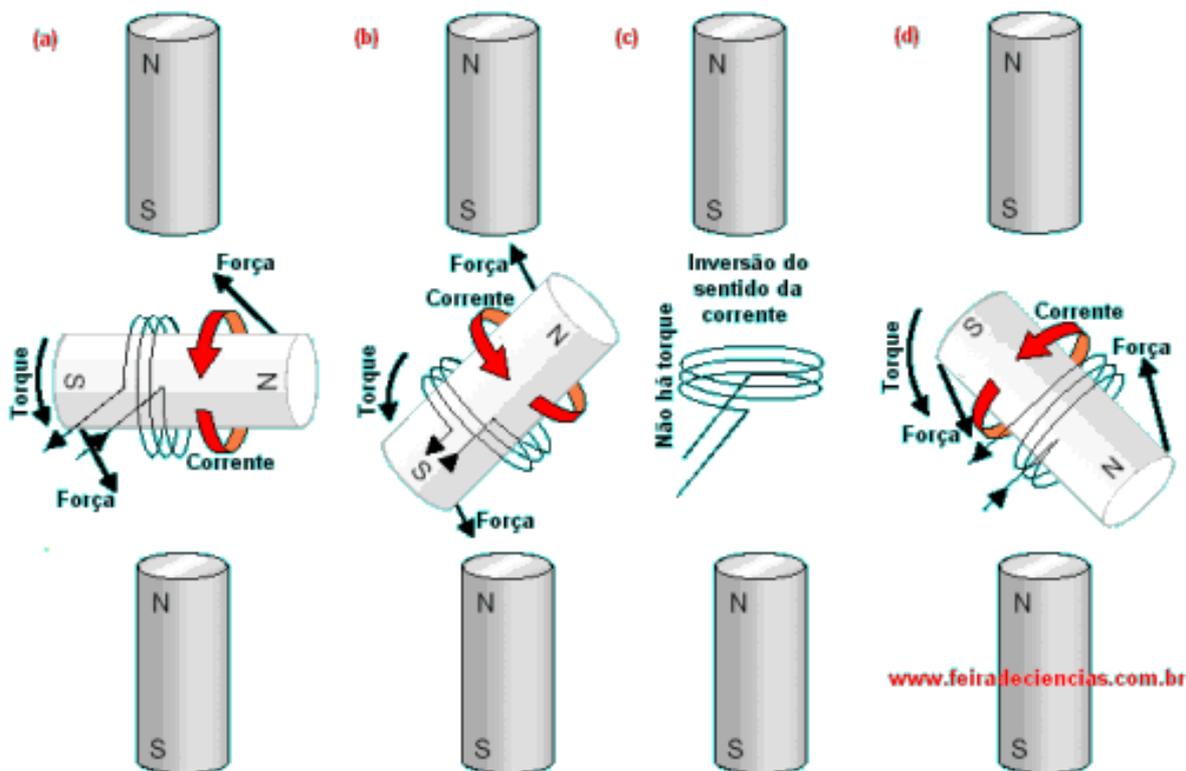


Figura 3: Princípio de funcionamento do motor elétrico, disponível em: http://www.feiradeciencias.com.br/sala22/motor_teorial.asp, acesso em 13/11/2016.

No que se refere a energia ativa a mesma está associada a produção de trabalho útil como, por exemplo, produção de luz, calor ou movimento. A energia ativa é medida em kWh.

No caso do motor elétrico já citado, para o seu correto funcionamento requisita-se de energia ativa e reativa, caracterizando a necessidade de utilização de ambas as modalidades energéticas.

A energia reativa está vinculada a formação de campos elétricos e magnéticos, portanto não realizará trabalho útil.

A energia reativa vai estar associada as perdas elétricas do sistema, por conseguinte, para garantir a melhor eficiência do mesmo deve-se manter a energia reativa nos menores valores possíveis, minimizando as perdas e maximizando a eficiência do sistema elétrico. A energia reativa é medida em kVarh.

A Figura 4 busca, através de uma analogia com o quantitativo de espuma presente em um copo com Chopp, ilustrar os conceitos de energia ativa, reativa e total.

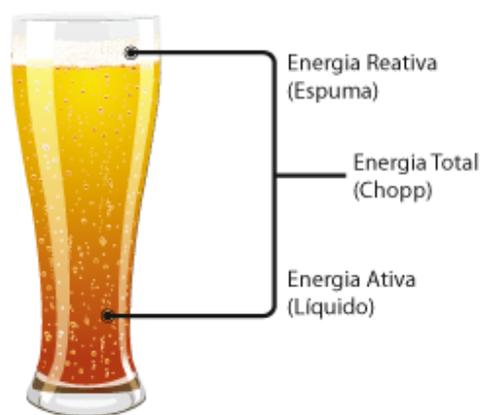


Figura 4: Analogia para energia ativa, reativa e total, disponível em: <http://www.elektro.com.br/seu-negocio/energia-ativa-e-reativa>, acesso em 12/11/2016.

Sistemas com energia reativa em excesso vão demandar condutores com bitola (secção transversal) de maior diâmetro, em consonância com a primeira e a segunda lei de Ohm, sendo estas últimas indicadas nas Equações 1 e 2 a seguir. A Figura 5 ilustra as variáveis **A** e **L** utilizadas no equacionamento da segunda lei de Ohm.

$$V = R \times I \Leftrightarrow I = \frac{V}{R}$$

Equação 1: 1ª Lei de Ohm.

V: Tensão elétrica;

R: Resistência elétrica;

I: Corrente elétrica.

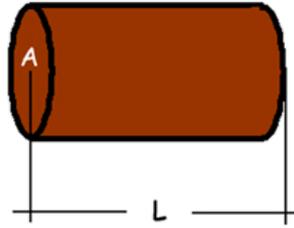


Figura 5: Comprimento e área da secção transversal do condutor, disponível em: <http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/leis-de-ohm-resistencia-eletrica-resistividade-e-leis-de-ohm.htm>, acesso em 28/11/2016.

$$R = \rho \times \frac{L}{A}$$

Equação 2: 2ª Lei de Ohm.

R: Resistência elétrica;

ρ : Resistividade do material (depende da temperatura);

L: Comprimento do material;

A: Área da secção transversal do material.

A análise das Equações 1 e 2 anteriores nos permite verificar que a resistência elétrica é inversamente proporcional a área da secção transversal do material, bem como o fato de que resistência e corrente elétrica são inversamente proporcionais.

Para atender a maiores requisitos de corrente são necessários condutores de maior bitola, como forma de minimizar os efeitos da resistência elétrica. Reduzindo o consumo de potência reativa, o consumo de corrente elétrica reduzirá e, por conseguinte pode-se especificar condutores de menor secção transversal, desonerando os gastos com infraestrutura elétrica.

Excesso de energia reativa pode ocasionar múltiplos defeitos nas instalações elétricas tais quais: quedas de tensão e aquecimento excessivo dos condutores (perdas por efeito Joule), além de exigirem transformadores de alimentação com maior capacidade de potência nominal.

O consumo de energia reativa deve ser reduzido ao máximo como forma de racionalizar e otimizar o consumo de energia elétrica.

2. Potência Elétrica CA

A potência elétrica, de modo simplificado, pode ser definida como sendo a capacidade de produzir trabalho em uma determinada unidade de tempo. A potência elétrica pode ser considerada em circuitos de corrente contínua (CC) e em circuito de corrente alternada (CA). A Equação 3 expressa em termos matemáticos a relação entre as grandezas potência elétrica, energia elétrica e intervalo de tempo.

$$P = \frac{E}{\Delta_t}$$

Equação 3: Potência elétrica em função da energia e do tempo.

P: Potência elétrica;

E: Energia elétrica;

Δ_t : Intervalo de tempo.

Quando submetidos a um mesmo nível de tensão elétrica, equipamentos de maior potência nominal vão produzir maior quantidade de trabalho útil. A Figura 6 ilustra tal conceito considerando que o equipamento trata-se de uma lâmpada incandescente.

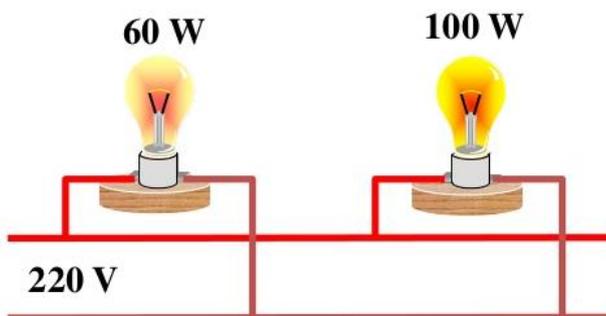


Figura 6: Comparativo entre equipamentos de potências elétricas diferentes, disponível em: <http://pt.slideshare.net/alinedoohan/electricidade-e-mecnica-aula-6>, acesso em 28/11/2016.

Apesar de diretamente relacionados as grandezas potência elétrica e energia elétrica correspondem a conceitos distintos. Enquanto a potência se refere a capacidade de produzir trabalho, a energia guarda relação com a quantidade de potência consumida em um determinado intervalo de tempo.

A potência ativa, por exemplo, é a capacidade de produzir trabalho útil, enquanto a energia ativa se refere a utilização da potência ativa num determinado intervalo de tempo.

Nos circuitos elétricos alimentados em corrente alternada, a potência elétrica pode ser classificada em três modalidades, quais sejam:

- a) **Potência Ativa (W)**: parcela da potência destinada a produzir trabalho útil. É representada pela letra **P**;
- b) **Potência Reativa (Var)**: potência associada a formação de campos eletromagnéticos, não sendo capaz de produzir trabalho útil. É necessária ao funcionamento de equipamentos indutivos, tais quais motores, transformadores, reatores, dentre inúmeros outros. Este tipo de potência vai circular¹ entre a carga e sua respectiva fonte de alimentação, sem produzir trabalho útil, apenas "ocupando espaço", que deveria ser ocupado pela potência ativa. É representada pela letra **Q**;
- c) **Potência Aparente (VA)**: Trata-se da potência total absorvida (drenada) por um equipamento ou por uma instalação elétrica. Matematicamente, vai corresponder a **soma vetorial** das potências ativas e reativas. É representada pela letra **S**.

Graficamente as três modalidades de potência elétrica em corrente alternada podem ser inter-relacionadas através do triângulo de potências, conforme Figura 7.

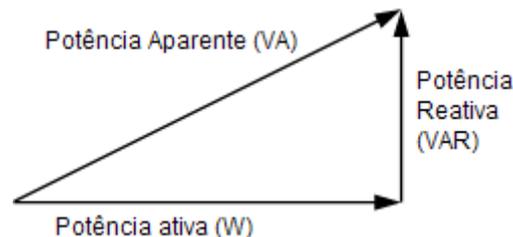


Figura 7: Triângulo de potências, disponível em:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Pot%C3%Aancia_el%C3%A9trica , acesso em 28/11/2016.

O correspondente equacionamento, supondo redes elétricas monofásicas (1ϕ), está apresentado nas Equações 4, 5 e 6 a seguir.

$$P_{1\phi} = V_{1\phi} \times I_{1\phi} \times \cos \varphi$$

Equação 4: Potência elétrica ativa em circuitos monofásicos.

$P_{1\phi}$: Potência ativa monofásica;

¹ Esta potência estará associada a formação de campos elétricos nos capacitores e de campos magnéticos nos indutores. O fluxo de potência reativa estará relacionado ao carregamento e descarregamento de indutores e capacitores, em cada semiciclo da rede elétrica alternada.

$V_{1\phi}$: Tensão elétrica monofásica;

$I_{1\phi}$: Corrente elétrica monofásica;

φ : Ângulo entre a tensão e a corrente elétrica.

$$Q_{1\phi} = V_{1\phi} \times I_{1\phi} \times \sin \varphi$$

Equação 5: Potência elétrica reativa em circuitos monofásicos.

$Q_{1\phi}$: Potência reativa monofásica;

$V_{1\phi}$: Tensão elétrica monofásica;

$I_{1\phi}$: Corrente elétrica monofásica;

φ : Ângulo entre a tensão e a corrente elétrica.

$$S_{1\phi} = V_{1\phi} \times I_{1\phi}$$

Equação 6: Potência elétrica aparente (total) em circuitos monofásicos.

$S_{1\phi}$: Potência aparente monofásica;

$V_{1\phi}$: Tensão elétrica monofásica;

$I_{1\phi}$: Corrente elétrica monofásica.

Fazendo-se uso do teorema de Pitágoras², sabendo-se previamente que o triângulo de potências é do tipo retângulo³, chega-se as Equações 7 e 8 apresentadas na sequência. As potências ativa e reativa formam os catetos e a potência aparente corresponde a hipotenusa do triângulo supracitado.

$$S_{1\phi}^2 = P_{1\phi}^2 + Q_{1\phi}^2 \Leftrightarrow$$

$$S_{1\phi} = \sqrt{P_{1\phi}^2 + Q_{1\phi}^2}$$

Equação 7: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos monofásicos.

$S_{1\phi}$: Potência aparente monofásica;

² Num triângulo retângulo, a soma dos quadrados dos catetos é igual ao quadrado da hipotenusa.

³ Figura geométrica constituída por três lados e 3 ângulos internos, sendo que estes últimos atendem aos requisitos: um ângulo reto (igual a 90°) dois ângulos agudos (menores que 90°).

$P_{1\phi}$: Potência ativa monofásica;

$Q_{1\phi}$: Potência reativa monofásica.

$$kVA_{1\phi}^2 = kW_{1\phi}^2 + kVar_{1\phi}^2 \Leftrightarrow$$

$$kVA_{1\phi} = \sqrt{kW_{1\phi}^2 + kVar_{1\phi}^2}$$

Equação 8: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos monofásicos, expressa em termos de suas respectivas unidades.

$kVA_{1\phi}$: Potência aparente monofásica;

$kW_{1\phi}$: Potência ativa monofásica;

$kVar_{1\phi}$: Potência reativa monofásica.

Raciocínio análogo pode ser aplicado as redes elétricas trifásicas (3ϕ), resultando nas Equações 9, 10 e 11 apresentadas na sequência.

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{3\phi} \times I_{3\phi} \times \cos \varphi$$

Equação 9: Potência elétrica ativa em circuitos trifásicos.

$P_{3\phi}$: Potência ativa trifásica;

$V_{3\phi}$: Tensão elétrica trifásica;

$I_{3\phi}$: Corrente elétrica trifásica;

φ : Ângulo entre a tensão e a corrente elétrica.

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{3\phi} \times I_{3\phi} \times \sin \varphi$$

Equação 10: Potência elétrica reativa em circuitos trifásicos.

$Q_{3\phi}$: Potência reativa trifásica;

$V_{3\phi}$: Tensão elétrica trifásica;

$I_{3\phi}$: Corrente elétrica trifásica;

φ : Ângulo entre a tensão e a corrente elétrica.

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} \times V_{3\phi} \times I_{3\phi}$$

Equação 11: Potência elétrica aparente (total) em circuitos trifásicos.

$S_{3\phi}$: Potência aparente trifásica;

$V_{3\phi}$: Tensão elétrica trifásica;

$I_{3\phi}$: Corrente elétrica trifásica.

Novamente aplicando o teorema de Pitágoras, ao triângulo retângulo cujos catetos correspondem as potências ativa e reativa e a hipotenusa corresponde a potência aparente ou total, as Equações 12 e 13 podem ser aplicadas no cálculo das referidas grandezas, quando consideradas redes elétricas trifásicas.

$$S_{3\phi}^2 = P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2 \Leftrightarrow$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2}$$

Equação 12: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos trifásicos.

$S_{3\phi}$: Potência aparente trifásica;

$P_{3\phi}$: Potência ativa trifásica;

$Q_{3\phi}$: Potência reativa trifásica.

$$kVA_{3\phi}^2 = kW_{3\phi}^2 + kVar_{3\phi}^2 \Leftrightarrow$$

$$kVA_{3\phi} = \sqrt{kW_{3\phi}^2 + kVar_{3\phi}^2}$$

Equação 13: Potência elétrica aparente (total) em função das potências ativa e reativa em circuitos trifásicos, expressa em termos de suas respectivas unidades.

$kVA_{3\phi}$: Potência aparente trifásica;

$kW_{3\phi}$: Potência ativa trifásica;

$kVar_{3\phi}$: Potência reativa trifásica.

3. Fator de Potência

Trata-se de um índice destinado a mensurar a eficiência de uma instalação, equipamento ou conjunto de equipamentos elétricos, no que tange ao consumo de energia reativa. Permite relacionar as energias ativa e reativa absorvidas por um sistema elétrico. Através deste indicador pode-se avaliar, por exemplo, se o gasto energético do consumidor está adequado ou não.

A partir deste índice pode-se estabelecer uma relação matemática que correlaciona as potências ativa, reativa e aparente de um circuito elétrico.

Fator de potência unitário implica em uma eficiência energética de 100%, ou seja, toda energia consumida da rede (gerador) foi transformada em trabalho útil, não havendo, portanto, perdas (praticamente não vai existir energia reativa ou a parcela correspondente a mesma é desprezível).

Um valor de fator de potência igual a 1 é encontrado em equipamentos puramente resistivos. Ex.: lâmpadas incandescentes, resistência de chuveiro elétrico, resistência de aquecedor elétricos e assemelhados.

Em termos de potência elétrica em corrente alternada, o fator de potência vai estabelecer uma relação matemática entre as potências ativa e aparente, conforme expressa a Equação 14:

$$\text{F.P.} = \frac{P}{S}$$

Equação 14: Fator de potência.

F.P.: Fator de potência;

P: Potência ativa;

S: Potência aparente.

Novamente fazendo uso da analogia com um copo com Chopp, a Figura 8 apresenta visualmente a diferença entre sistemas com fator de potência distintos.

Na Figura 9 aparece indicado o ângulo compreendido entre as potências ativa e aparente, sendo tal ângulo designado de ângulo do fator de potência.



Figura 8: Analogia para baixo F.P. e alto F.P., disponível em: <http://www.empalux.com.br/?al=n&id=27>, acesso em 12/11/2016.

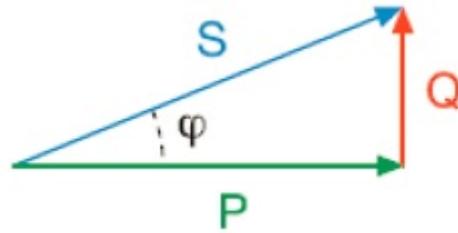


Figura 9: Triângulo de potências, disponível em: <http://www.abb-conversations.com/br/2015/10/correcao-de-fator-de-potencia-e-harmonic-as-em-instalacoes-eletricas/>, acesso em 12/11/2016.

Baseados na teoria de circuitos elétricos em corrente alternada, bem como na análise do triângulo de potências, pode-se afirmar que o fator de potência vai corresponder ao cosseno do ângulo formado entre as potências ativa e aparente, tal qual explicitado na Equação 15 e na Figura 10.

$$\text{F.P.} = \cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Equação 15: Fator de potência em termos do cosseno do ângulo entre P e S.

F.P.: Fator de potência;

P: Potência ativa;

S: Potência aparente;

φ: Ângulo formado entre as potências ativa e aparente.

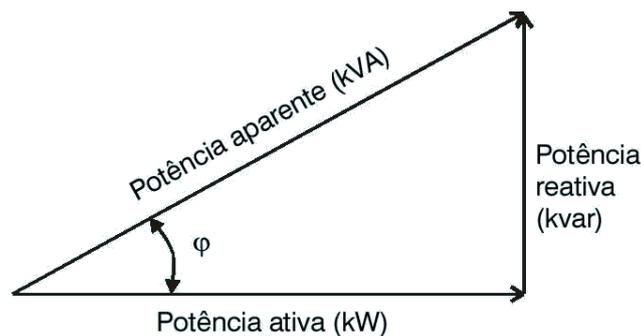


Figura 10: Triângulo de potências, disponível em: <https://fasorenergia.wordpress.com/fator-de-potencia/>, acesso em 12/11/2016.

A análise trigonométrica do triângulo de potências apresentado na Figura 10 nos permite estabelecer a relação matemática expressa na Equação 16.

$$\text{F.P.} = \frac{\text{kW}}{\text{kVA}} = \cos \varphi = \cos \left(\tan^{-1} \frac{\text{kVar}}{\text{kW}} \right)$$

Equação 16: Fator de potência em termos da tangente do ângulo entre S e P.

F.P: Fator de potência;

kW: Potência ativa;

kVar: Potência reativa;

kVA: Potência aparente.

A Figura 11 apresenta um triângulo de potência representado num formato alternativo, além da indicação da unidade correspondente as respectivas grandezas. Sendo o fator de potência uma grandeza que pode ser expressa em termos percentuais o mesmo deve ter valor máximo igual a 1, aspecto também enfatizado na Figura 11.

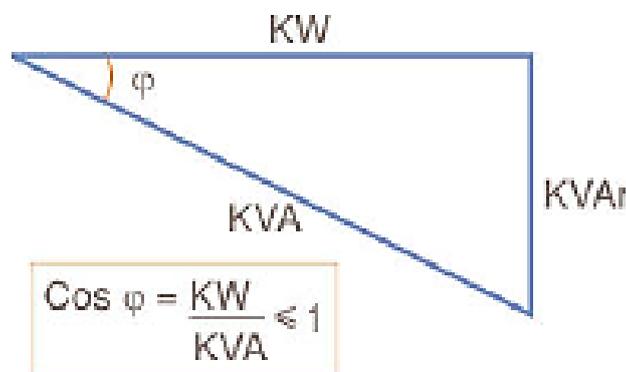


Figura 11: Triângulo de potências e respectivas unidades, disponível em: <http://eletricidade-eletronica-telecom.blogspot.com.br/2011/11/o-que-voce-precisa-saber-sobre-fator-de.html>, acesso em 12/11/2016.

Diferentes valores de potência reativa implicam que os respectivos segmentos de reta que os representam no triângulo de potências terão comprimentos distintos, aspecto que tornará a potência aparente (total) menor ou maior, conforme cada caso sem, no entanto, alterar a potência ativa (potência real) que em todos os casos permanecerá constante.

A alteração na potência aparente também provoca variações no ângulo do fator de potência, por conseguinte alterando a disposição dos segmentos de reta do triângulo de potência, exceto naquele correspondente a potência ativa.

A Figura 12 permite visualizar os aspectos descritos nos parágrafos anteriores.

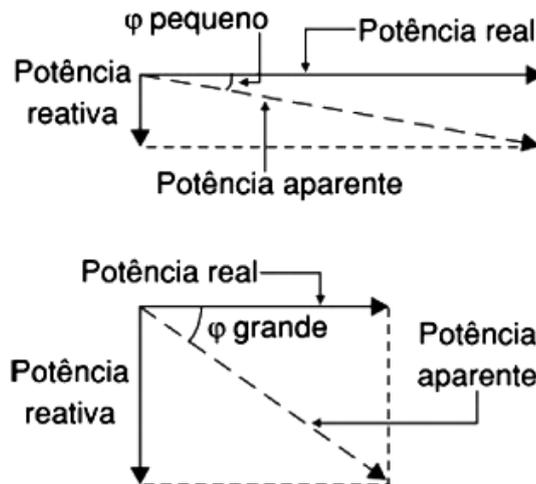


Figura 12: relação gráfica entre o ângulo do F.P. e a magnitude da potência reativa, disponível em: <http://angolapowerservices.blogspot.com.br/2012/11/o-factor-de-potencia-suas-causas-e.html>, acesso em 21//11/2016.

A depender das características do circuito, principalmente da natureza das cargas existentes no mesmo, pode-se ter um comportamento indutivo ou capacitivo. Convenciona-se que na primeira situação a potência reativa será indutiva e terá valor positivo ($Q > 0$), na segunda situação passa-se a ter uma potência reativa do tipo capacitiva de valor negativo ($Q < 0$). Portanto o comportamento reativo de um circuito pode ser resumido em:

- $Q > 0$: Comportamento indutivo. Vetor Q apontando para cima;
- $Q < 0$: Comportamento capacitivo. Vetor Q apontando para baixo;
- $Q = 0$: Comportamento resistivo. Vetor Q nulo.

Em suas respectivas representações gráficas, os vetores correspondentes as potências reativas indutiva e reativa capacitiva terão mesma direção, porém com sentidos opostos.

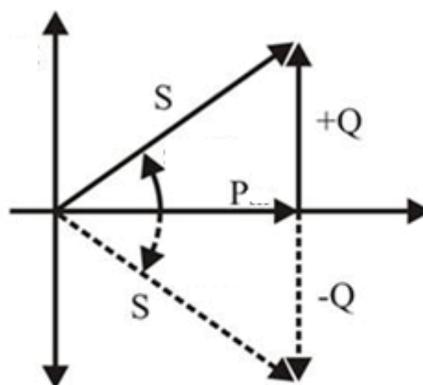


Figura 13: Representação gráfica das potências reativa indutiva e reativa capacitiva, disponível em: http://repositorio.innovacionumh.es/Proyectos/P_19/Tema_4/UMH_03.htm, acesso em 21//11/2016.

Segundo as diretrizes impostas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL o fator de potência de referência é 0,92 seja ele indutivo ou capacitivo. Consumidores que mantiverem suas instalações com F.P. inferior a este valor de referência serão multados conforme tarifas e encargos de cada distribuidora local.

O valor do F.P. medido pode ser obtido a partir da Equação 17 a seguir.

$$F.P._{Medido} = \frac{kWh_{Medido}}{\sqrt{kWh_{Medido}^2 + kVarh_{Medido}^2}}$$

Equação 17: Fator de potência medido.

F.P._{Medido}: Fator de potência medido no período de faturamento (fator de potência médio);

kWh_{Medido}: Energia ativa consumida no ciclo de medição;

kVarh_{Medido}: Energia reativa consumida no ciclo de medição.

Para medir o fator de potência associado a uma determinada instalação ou equipamento pode-se utilizar instrumentos específicos como por exemplo:

- a) Cosfímetro (analógico ou digital);
- b) Alicates wattímetro;
- c) Analisador de qualidade de energia.

As Figuras 14 e 15 ilustram medidores de fator de potência do tipo cosfímetro de natureza analógica (eletromecânico) e digital (microprocessado), respectivamente.

Nas Figuras 16 (alicates wattímetro) e 17 (analisador de qualidade de energia) pode-se observar o aspecto visual de outros dois instrumentos que, embora não dedicados exclusivamente a medição do fator de potência, são bastante utilizados para esta finalidade.



Figura 14: Medidor de F.P. (cosímetro) analógico, disponível em: <http://www.jng.com.br/produtos-detalhes.asp?idprod=75>, acesso em 12/11/2016.



Figura 15: Medidor de F.P. (cosímetro) digital, disponível em: <http://sferemeter.com.br/1-4-digital-power-factor-meter-pt/123774>, acesso em 12/11/2016.



Figura 16: Alicates wattímetro, disponível em: <http://itest.com.br/Eletronica/Alicates-Wattimetro/alicates-wattimetro-digital-trifasico-cat-iii-c-medicao-harmonica-25-h-minipa-et-4080-.phtml>, acesso em 12/11/2016.



Figura 17: Analisador de qualidade de energia, disponível em: <http://homis.com.br/eletrica/analísadores-de-energia/analísador-de-qualidade-de-energia-trifasico-hae-303>, acesso em 12/11/2016.

3.1. F.P. Indutivo × F.P. Capacitivo

Ainda em consonância com a teoria de circuitos elétricos em corrente alternada, sabe-se que os circuitos podem ser resistivos, indutivos ou capacitivos, como consequência da parcela da indutância e/ou da capacitância das cargas ligadas no referido circuito.

A predominância da indutância ou da capacitância (comportamento indutivo⁴ ou capacitivo⁵) vai gerar como consequência direta a existência de um fator de potência indutivo ou capacitivo.

Na Figura 18 estão representados dois exemplos de cargas puramente resistivas, quais sejam: um aquecedor e uma lâmpada incandescente.

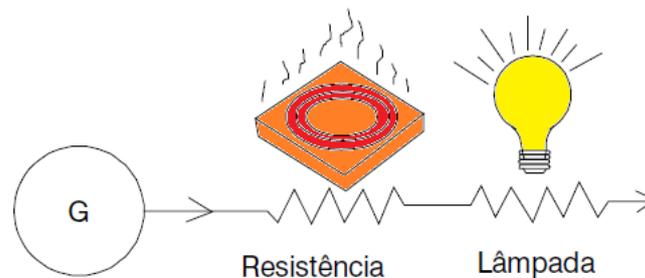


Figura 18: Exemplo de circuito puramente resistivo, disponível em: <http://comandoseletricosii.blogspot.com.br/2013/11/aula-18-correcao-do-fator-de-potencia.html>, acesso em 21/11/2016.

A depender da natureza e do comportamento do circuito (valores instantâneos da tensão e da corrente elétrica), as senóides representativas da tensão e da corrente podem estar em fase (valores máximos e mínimos coincidentes no mesmo instante de tempo) ou defasadas (valores máximos e mínimos não ocorrem num mesmo instante de tempo).

Quando defasadas pode-se ter a corrente elétrica adiantada ou atrasada em relação a tensão elétrica, tomando-se esta última como referência. Caso a corrente elétrica seja adotada como referência pode-se ter a tensão elétrica adiantada ou atrasada em relação a mesma.

Num circuito que manifesta comportamento puramente resistivo a tensão e a corrente estão em fase (Figura 19a).

O comportamento indutivo será caracterizado pelo atraso da corrente em relação a tensão (Figura 19b) enquanto em circuitos de natureza capacitiva a corrente está adiantada em relação a tensão (Figura 19c).

Em todas as situações a tensão elétrica foi considerada a grandeza de referência.

⁴ Corrente atrasada em relação a tensão.

⁵ Corrente adiantada em relação a tensão.

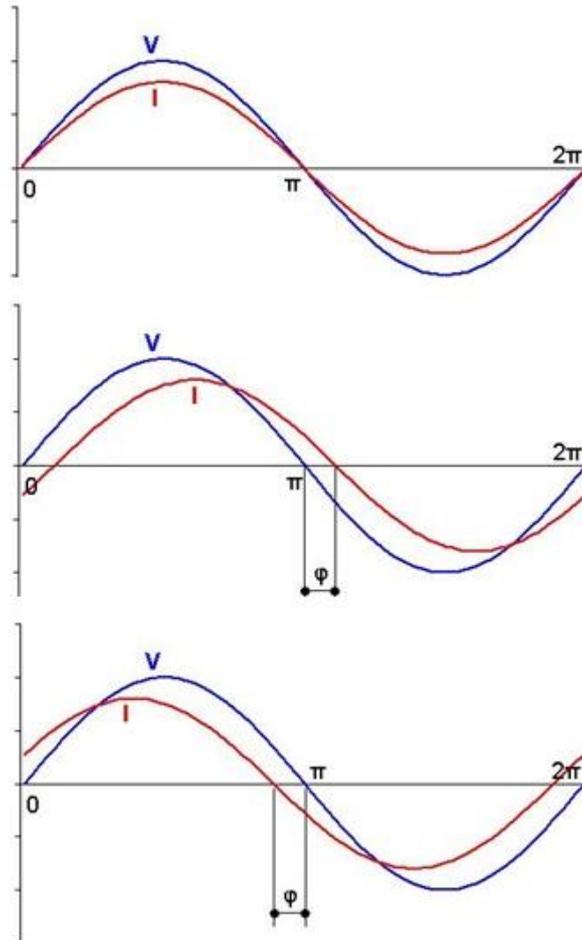


Figura 19: Comportamento resistivo, indutivo e capacitivo, disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>, acesso em 13/11/2016.

O F.P. será indutivo quando a instalação elétrica estiver absorvendo potência reativa ($Q > 0$). Neste caso haverá uma predominância da indutância em detrimento da capacitância. Como vários equipamentos elétricos são caracterizados por possuir bobinas, o F.P. indutivo ocorre com maior frequência que o capacitivo.

Em contrapartida, o F.P. será capacitivo quando a instalação elétrica estiver fornecendo energia reativa ($Q < 0$). O comportamento capacitivo vai se sobrepor ao indutivo. Normalmente o F.P. capacitivo é ocasionado quando as cargas indutivas são desligadas e mantêm-se os capacitores⁶ ligados ou quando os capacitores são superdimensionados.

A Figura 20 permite estabelecer um comparativo entre o triângulo de potência de um circuito indutivo e o de um circuito capacitivo.

⁶ Banco de capacitores instalados para corrigir o fator de potência. Fornecem a energia reativa destinada a contrabalançar a influência dos indutores.

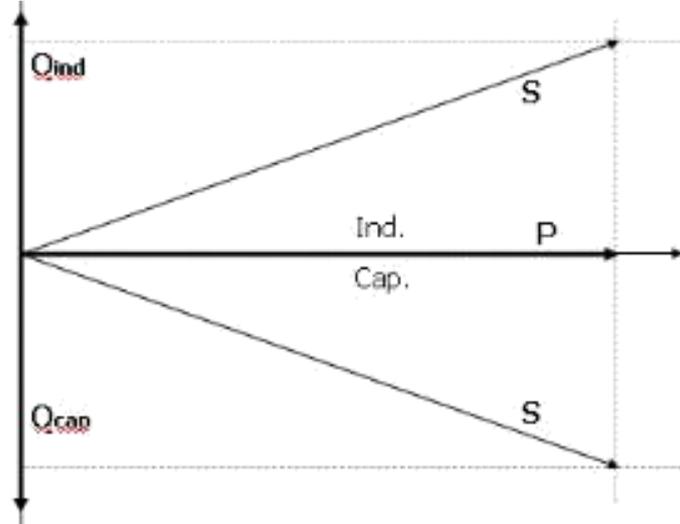


Figura 20: comparativo entre as potências reativas indutivas e capacitivas, disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgFDEAG/fator-potencia>, acesso em 21//11/2016.

3.2. Baixo F.P.: Causas e Efeitos

Equipamentos que demandam energia reativa para o seu funcionamento são diretamente responsáveis pelo baixo fator de potência das instalações elétricas. Neste contexto apresenta-se a seguir algumas das fontes potenciais para um baixo fator de potência seja ele indutivo ou capacitivo:

- Motores superdimensionados ou trabalhando em vazio por elevados intervalos de tempo;
- Motores operando com baixo carregamento;
- Elevado número de motores operando simultaneamente;
- Transformadores superdimensionados ou trabalhando em vazio por elevados intervalos de tempos;
- Elevado número de lâmpadas de descarga (vapor de mercúrio, vapor de sódio, fluorescente convencional etc.) operando com reatores que não possuem a correção individual do fator de potência;
- Banco de capacitores que permanecem ligados nas unidades consumidoras horazonais durante o período capacitivo (período da madrugada);
- Cargas (equipamentos) não lineares, como por exemplo fornos de indução.

Quanto aos efeitos do baixo fator de potência, além da perda de eficiência energética da instalação já citada anteriormente, pode-se ter ainda outras adversidades, dentre as quais destacam-se:

- a) Oscilações (flutuações) de tensão, uma vez que a energia reativa excedente provoca um aumento da corrente total do circuito, aspecto que provocará quedas de tensão no circuito⁷;
- b) Aquecimento excessivo dos condutores (perdas por efeito Joule);
- c) Limitação da capacidade de fornecimento de energia ativa através de transformadores, inviabilizando a sua plena utilização;
- d) Multas e encargos financeiros em razão do baixo fator de potência;
- e) Preenchimento inadequado do "espaço" destinado ao transporte de potência ativa;
- f) Aumento dos custos inerentes a aquisição, instalação e manutenção dos sistemas de controle, seccionamento, manobra e proteção das instalações elétricas, como consequência direta do aumento da corrente total associada ao excesso de potência reativa circulante.

4. Correção do Fator de Potência

A correção do fator de potência corresponde a equalizar o consumo de energia reativa, tornando o fator de potência o mais próximo possível da unidade.

Nos momentos nos quais o fator de potência estiver indutivo, energia reativa capacitiva deve ser fornecida por células capacitivas. Nos momentos em que o fator de potência estiver capacitivo as células capacitivas devem ser desligadas.

A perda associada a energia reativa ocorre principalmente na forma de calor, como consequência do aumento da corrente elétrica associada ao excesso de potência reativa do circuito. O aumento de energia reativa provoca um aumento da corrente total do circuito gerando como consequência um aquecimento desnecessário dos condutores e dos equipamentos. As perdas (perdas ôhmicas) podem ser calculadas através da expressão associada a Equação 18.

$$P_{\text{Ohmicas}} = Z_T \times I_T^2$$

Equação 18: Perdas ôhmicas totais.

P_{Ohmicas} : Perdas ôhmicas (efeito Joule) totais;

Z_T : Impedância total do circuito ou equipamento;

⁷Em situações extremas as quedas de tensão associadas ao baixo F.P. podem provocar interrupções do fluxo de energia ou sobrecarga dos equipamentos.

I_T : Corrente total do circuito ou equipamento.

As Figuras 21 e 22 apresentam o fluxo de energia reativa fornecida pelas células capacitivas, no primeiro caso com o intuito de corrigir o F.P. da rede de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica (Figura 21) e no segundo caso com a finalidade de corrigir o fator de potência das cargas, neste caso um motor elétrico (Figura 22).

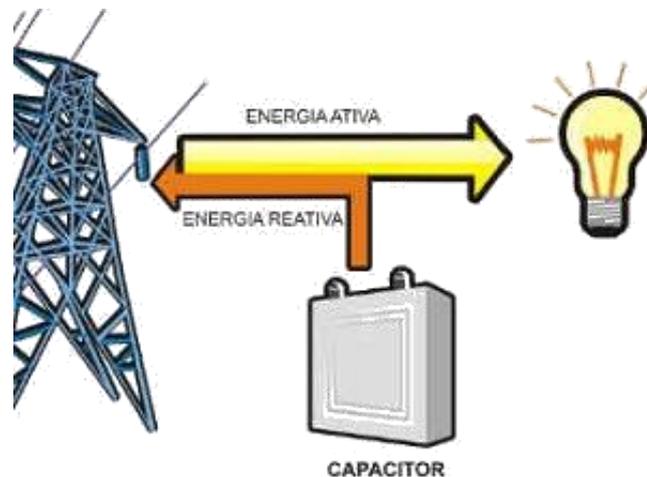


Figura 21: Princípio da correção do F.P. da rede elétrica, disponível em: <http://www.cobrapi.com.br/edu/eletricidade/correcao-do-fator-de-potencia-e-a-compensacao-reativa.html>, acesso em 21/11/2016.



Figura 22: Princípio da correção do F.P. em circuitos com motores e transformadores, disponível em: <http://www.ceripa.com.br/Manual%20Reativo.pdf>, acesso em 21/11/2016.

Diferentes valores para a potência reativa provocam diferentes ângulos entre a potência ativa e a potência aparente, portanto diferentes valores de fator de potência. Partindo desta premissa, a correção do fator de potência atua reduzindo a potência reativa e, por conseguinte aumentando o fator de potência.

A Figura 23 ilustra graficamente o princípio da correção do fator de potência, onde na mesma percebe-se que a potência reativa fornecida pelo banco de capacitores (Q_C) se opõe e reduz a potência indutiva da instalação ($Q_1 + Q_2$), fazendo com a potência total seja reduzida de S_1 para S_2 , com a correspondente redução do ângulo do fator de potência de φ_1 para φ_2 .

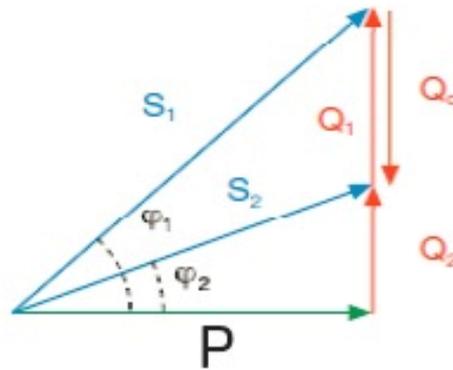


Figura 23: Triângulo de potências antes e após a correção, disponível em: <http://www.abb-conversations.com/br/2015/10/correcao-de-fator-de-potencia-e-harmoniccas-em-instalacoes-eletricas/>, acesso em 13/11/2016.

A partir da análise da Figura 23, correspondente ao triângulo de potências antes e após a correção do F.P., bem como através da aplicação de algumas identidades trigonométricas, obtêm-se a expressão correspondente ao cálculo da potência reativa a ser fornecida pelos capacitores.

Do estudo da trigonometria sabe-se que:

$$\tan \varphi = \frac{\text{Cateto Oposto}}{\text{Cateto Adjacente}}$$

Aplicando esta relação aos ângulos φ_1 e φ_2 obtêm-se:

$$\tan \varphi_1 = \frac{Q_1}{P} \Rightarrow Q_1 = P \times \tan \varphi_1$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{Q_2}{P} \Rightarrow Q_2 = P \times \tan \varphi_2$$

A potência reativa Q_1 será reduzida para um valor Q_2 , esta redução será possível graças ao fornecimento da potência reativa proveniente dos capacitores (Q_C). Graficamente verifica-se que:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 \Rightarrow$$

$$Q_C = P \times \tan \varphi_1 - P \times \tan \varphi_2 \Rightarrow$$

$$Q_C = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

Equação 19: Potência reativa a ser fornecida pelos capacitores.

Q_C : Potência reativa dos capacitores;

P: Potência ativa;

φ_1 : Ângulo do F.P. antes da correção;

φ_2 : Ângulo do F.P. após a correção;

A correção do fator de potência pode ser precedida de algumas ações, tais quais:

- a) Correto dimensionamento dos motores e equipamentos;
- b) Operação correta dos equipamentos;
- c) No caso da iluminação através de lâmpadas de descarga, sempre optar pelo uso de reatores com elevado fator de potência;
- d) Maximizar o consumo da energia ativa da instalação, reduzindo potenciais fontes de consumo de energia reativa;
- e) Instalar motores elétricos síncronos em paralelo com cargas, uma vez que esta modalidade de motor pode ser utilizada na correção do F.P.

A correção do fator de potência traz consigo múltiplos benefícios dentre os quais destacam-se:

- a) Redução parcial ou total das oscilações de tensão;
- b) Mitigação das perdas por efeito Joule;
- c) Melhor aproveitamento da potência a ser fornecida pelos transformadores;
- d) Aumento da vida útil dos condutores, dispositivos de manobra e proteção e principalmente das cargas elétricas;
- e) Utilização mais eficiente e racional da energia elétrica consumida, mediante a redução do consumo de energia reativa;
- f) Redução da ocorrência de acidentes elétricos associados ao aquecimento inadequado dos condutores da instalação;
- g) Disponibiliza "espaço" para instalação de novas cargas, sem demandar novos recursos financeiros para aquisição de nova infraestrutura elétrica como, por exemplo, aquisição de novos transformadores ou aumento da secção transversal dos condutores.

5. Banco de Capacitores

O banco de capacitores terá como principal finalidade armazenar e distribuir energia elétrica reativa a circuitos ou instalações que demandarem a mesma. Preferencialmente, o banco de capacitores deve ser instalado próximo ao circuito ou instalação indutiva.

Nos locais onde os capacitores forem instalados ocorrerá um aumento da tensão elétrica da rede ao qual os mesmos estão interligados, acompanhada da correspondente redução da corrente total circundante. Este aspecto pode ser considerado um benefício adicional intrínseco ao uso de banco de capacitores⁸.

Alguns exemplos de locais onde pode-se instalar bancos de capacitores são: nas proximidades de grandes motores, grandes agrupamentos de cargas indutivas, na entrada de energia da edificação, no quadro geral de baixa tensão (QGBT) ou em quadros terminais (QT's).

No caso da instalação do banco de capacitores, um dos aspectos mais relevantes é o monitoramento da temperatura das células capacitivas, dentro deste contexto recomenda-se a instalação dos capacitores em locais de boa ventilação, minimizando a possibilidade de aquecimentos indevidos.

A Figura 24 ilustra, a título de exemplo, um quadro elétrico dentro do qual encontra-se instalado um banco de células capacitivas e seus respectivos dispositivos de comando e proteção.



Figura 24: Painel elétrico com células capacitivas e com aberturas de ventilação, disponível em: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/pmi-tecnologia/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/instalacao-de-banco-de-capaci>, acesso em 21/11/2016.

Quando a ventilação natural não puder ser utilizada ou não for suficiente, deve-se optar por sistemas de exaustão forçada implementados na forma de ventiladores e exaustores integrados a estrutura dos painéis elétricos onde os

⁸ Sob o prisma da economicidade é desaconselhável o uso de capacitores unicamente para aumentar o nível de tensão da rede, ou seja, o capacitor deve ser utilizado para corrigir o F.P. em detrimento de seu uso como elevador de tensão.

Versão 0.5 Aspectos Básicos da Correção do F.P. Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.
capacitores estão acondicionados. A Figura 25 ilustra quadros equipados com tais dispositivos.



Figura 25: Exaustor integrado a tampa do quadro elétrico, disponível em: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/eletricidade-e-eletronica/pmi-tecnologia/produtos/instalacoes-e-equipamentos-industriais/instalacao-de-banco-de-capacitores>, acesso em 21/11/2016.

Aspectos adicionais devem ser contemplados como, por exemplo, facilidade de inspeção e substituição das células capacitivas (acessibilidade⁹), proteção contra intempéries e outros agentes agressivos, tais quais salinidade, poeira, particulados, umidade e água.

As atividades de manutenção do banco de capacitores podem ser dificultadas em razão da escolha inadequada do local da instalação do mesmo. Painéis ou locais que dificultem o acesso aos capacitores, controlador de F.P. ou programadores cíclicos, tornam a manutenção destes equipamentos mais lenta e trabalhosa, aspectos que devem ser evitados uma vez que o funcionamento inadequado de um banco de capacitores pode ocasionar multas e outras tarifas, devendo, portanto, a manutenção do banco de capacitores ser realizada o mais breve quanto possível.

No que tange a correção do fator de potência, os bancos de capacitores podem ser classificados em:

- a) Bancos fixos;
- b) Bancos programáveis;
- c) Bancos automáticos.

⁹ Sempre que possível deve-se garantir o acesso frontal, lateral e superior.

A instalação do banco de capacitores deve ser precedida de uma análise da instalação quanto a possibilidade de substituição ou desligamento de cargas indutivas ociosas ou superdimensionadas. Deve-se ainda realizar o correto dimensionamento da potência reativa a ser fornecida pelo banco, sob pena de gerar potência reativa excedente, aspecto que tornará o F.P. capacitivo.

Quando corretamente dimensionado, a instalação do banco de capacitores otimiza as condições operacionais do sistema, uma vez que libera transformadores e condutores para suprir outras cargas com mais energia ativa.

Vários dos conceitos e prerrogativas associadas a correção do fator de potência de instalações elétricas prediais e industriais também se aplicam a correção do fator de potência dos sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica.

A correção do F.P. em um sistema de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica objetiva minimizar o fluxo de energia reativa nas linhas de transmissão, sub-transmissão e distribuição das concessionárias de serviços elétricos. Outras vantagens da correção do F.P. nas redes de transmissão, sub-transmissão e distribuição são:

- a) Redução do fluxo de potência reativa que circula no sistema de transmissão e distribuição;
- b) Redução das perdas decorrentes do efeito Joule, evitando aquecimentos desnecessários das linhas elétricas e respectivos dispositivos de proteção e manobra a ela associados;
- c) Aumento da capacidade de transmissão e distribuição de potência ativa;
- d) Possibilidade de aumentar a capacidade de geração suprindo assim um maior número de consumidores;
- e) Redução dos custos de geração, operação e manutenção das redes elétricas.

Nas Figuras 26 e 27 pode-se visualizar a estrutura de um banco de capacitores destinados a correção do fator de potência de redes de distribuição de energia elétrica, localizadas em pátios de subestações a céu aberto. Pode-se visualizar que os capacitores são agrupados em conjuntos de células que podem ser interligadas mutuamente em configurações diversas.



Figura 26: Banco de capacitores instalado em subestação de distribuição, disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA5QcAG/banco-capacitores>, acesso em 13/11/2016.



Figura 27: Banco de capacitores para sistemas de distribuição de energia elétrica, disponível em: http://www.inepar.com.br/not_capacitores_eletropaulo.htm, acesso em 13/11/2016.

O conjunto básico de correção de F.P. é constituído por: capacitores (células capacitivas), dispositivos de manobra (contator) e dispositivos de proteção (disjuntor ou fusível). Opcionalmente podem ser instalados sinaleiros luminosos, sensores de temperatura e outros dispositivos de automação, como por exemplo, supervisórios SCADA.

A Figura 28 apresenta o aspecto visual de um sistema simples de supervisão e gerenciamento de algumas grandezas elétricas em um painel elétrico, dentre elas o fator de potência.



Figura 28: Exemplo de sistema supervisorio para gerenciamento do F.P. e do consumo reativo, disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFMaIAE/gerenciamento-energia-coca-cola>, acesso em 21/11/2016.

Nas Figuras 29, 30 e 31 pode-se verificar exemplos de quadros elétricos destinados a acondicionar um banco de capacitores, além de acessórios destinados a manobrar, proteger e sinalizar as células que constituem o referido banco.

Desejando-se conferir ao sistema algum nível de automatização pode-se optar pela instalação de módulos eletrônicos de controle, usualmente designados de controladores de fator de potência. As Figuras 32 e 33 exemplificam módulos eletrônicos desta natureza.



Figura 29: Células capacitivas instaladas em painel, disponível em: <http://www.inducap.com.br/bancos-de-capacitores>, acesso em 13/11/2016.



Figura 30: Exemplo de banco de capacitores instalados em um painel elétrico, disponível em: <http://www.mabitec.com.br/banco-capacitores-preco>, acesso em 13/11/2016.



Figura 31: Painel com controlador automático de fator de potência e indicação visual do conjunto de células ativas, disponível em: http://stelc.net/thw_industrial/correcao-de-fator-potencia/, acesso em 13/11/2016.



Figura 32: Controlador de fator de potência WEG, disponível em: <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Capacitores-e-Correcao-do-Fator-de-Potencia/Controladores-automaticos-do-Fator-de-Potencia>, acesso em 13/11/2016.



Figura 33: Controlador de fator de potência trifásico, disponível em: <http://www.samrello.com.br/?pg=21&id=217>, acesso em 13/11/2016.

Internamente o banco de capacitores é constituído por um conjunto de células capacitivas associadas em série, paralelo ou de forma mista, disponibilizando nos terminais de saída valores de capacitância conforme descritos em suas placas de identificação. Alguns modelos já possuem internamente seus respectivos dispositivos de manobra e proteção devendo-se unicamente interligar os condutores do sistema elétrico correspondente. A Figura 34 ilustra tais conceitos.



Figura 34: Exemplo de bancos capacitivos, disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/correcao-do-fator-de-potencia/>, acesso em 13/11/2016.

5.1. Unidades capacitivas

Tratam-se das células e módulos capacitivos. Quando interligadas eletricamente, as células capacitivas formam os módulos capacitivos. Os módulos podem ser monofásicos ou trifásicos. A interconexão de módulos vai formar um

Versão 0.5 Aspectos Básicos da Correção do F.P. Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.
banco capacitivo, que também pode ser monofásico ou trifásico. A Figura 35 apresenta uma unidade capacitiva monofásica, enquanto na Figura 36 pode-se visualizar um módulo capacitivo trifásico.



Figura 35: Unidade capacitiva monofásica do fabricante WEG, disponível em: http://www.hpeletricidade.com.br/site/produto_dest.php?cod=15, acesso em 21/11/2016.



Figura 36: Exemplo de módulo capacitivo trifásico, disponível em: [http://www.engeletrica.com.br/download/arquivos/capacitorCorrecaoG\[1\].jpg](http://www.engeletrica.com.br/download/arquivos/capacitorCorrecaoG[1].jpg), acesso em 21/11/2016.

De um modo geral, os módulos capacitivos trifásicos são ligados em delta. Tanto as unidades monofásicas quanto as trifásicas são equipados com resistores de descarga e bornes de conexão. A depender do fabricante, alguns modelos são imersos em óleo isolante biodegradável.

Em geral são fabricados em corpos metálicos (invólucros de alumínio) e são equipados internamente com um ou mais dispositivos interruptores de segurança.

Versão 0.5 Aspectos Básicos da Correção do F.P. Prof. Eng. Dennys Lopes Alves. Estes últimos são responsáveis por desconectar o elemento capacitivo do circuito de alimentação sempre que houver um aumento anormal da temperatura interna da célula, minimizando o risco de eventuais explosões.

As células capacitivas devem atender, dentre outras, as especificações impostas pelas normas *IEC 831/1-2* e *DIN VDE 560/4*.

5.2. Dispositivos de manobra

No caso do acionamento de bancos de capacitores deve-se optar por contadores da categoria de emprego AC-6B, uma vez que estes são projetados para esta aplicação.

Na maioria das vezes esta modalidade de contator funciona com três estágios de fechamento e possuem indutores de pré-carga, aspectos que o resguardam, aumentando sua vida útil.

Contadores para acionamento de banco de capacitores devem atender aos requisitos impostos pelas normativas *IEC 947-4* e *DIN VDE 0660*, dentre outras.

Em algumas aplicações o capacitor é submetido a uma etapa de pré-carga, mediante o uso de resistores (designados de resistores de pré-carga) destinados a reduzir os picos de corrente inerentes a energização dos capacitores (Correntes de *in-rush*). Transcorrido o tempo de pré-carga, os contatos principais (contatos de força) se fecham, permitindo a passagem da corrente nominal.

Na Figura 73 têm-se um exemplo de um contator destinado a manobra de banco de capacitores.

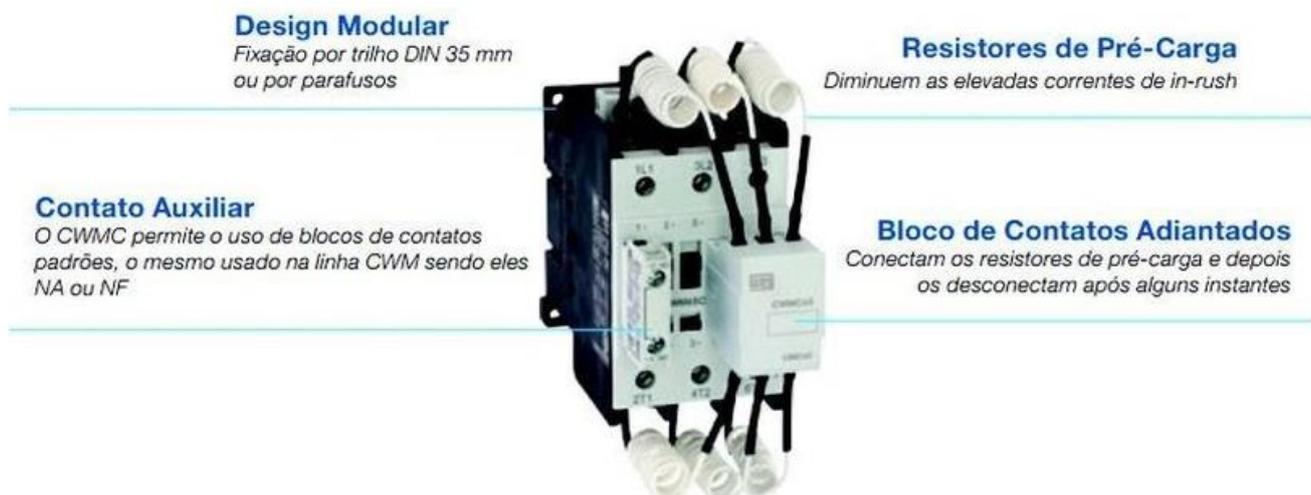


Figura 37: Exemplo de contator para acionamento de banco de capacitores, disponível em: <http://www.jsqeloja.com/ypy5putai-contator-para-manobra-de-capacitores-mod-cwmc32-1na-40a-bobina-127v-ou-220v>, acesso em 21/11/2016.

5.3. Sistema de proteção

Como forma de proteger os capacitores, bem como seus barramentos ou condutores de alimentação (cabos isolados flexíveis), devem ser instalados dispositivos de proteção contra sobrecarga e/ou curto-circuito. Em geral são utilizados disjuntores termomagnéticos do tipo curva lenta ou conjuntos de segurança Diazed (fusível Diazed). Nas Figuras 38 e 39 pode-se observar alguns dos elementos constituintes de um conjunto de segurança do tipo Diazed.

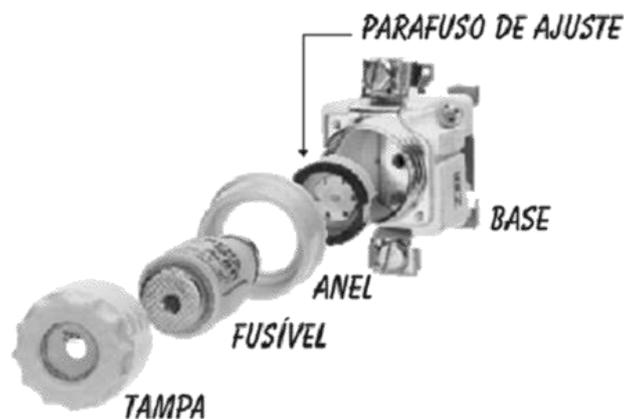


Figura 38: Conjunto de segurança Diazed, disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/tipos-de-fusiveis/>, acesso em 22/11/2016.



Figura 39: Elementos do conjunto de segurança Diazed, disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAf34QAJ/electricidade-industrial-tudo-sore-motores-introdu?part=4>, acesso em 22/11/2016.

As bases destinadas a servir como receptáculo para os fusíveis Diazed são caracterizadas por utilizar cores distintas a depender da corrente nominal do fusível Diazed ao qual destinam-se. A Tabela 1 apresenta tal codificação.

Tabela 1: Código de cores para base de fusíveis Diazed.

Tipo de Base	Corrente Nominal (A)	Código de Cor
Base 25	2	Rosa
	4	Marrom
	6	Verde
	10	Vermelho
	16	Cinza
	20	Azul
	25	Amarelo

Base 63	35	Preto
	50	Branco
	63	Cobre
Base 100	80	Prata
	100	Vermelho

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAf34QAJ/eletricidade-industrial-tudo-sobre-motores-introdu?part=4>, acesso em 22/11/2016.

Além dos fusíveis, podem ser utilizados como dispositivos de manobra e proteção os disjuntores termomagnéticos, cujo número de polos vai depender da natureza do banco ao qual devem proteger.

Disjuntores desta natureza promovem proteção contra sobrecarga (efeito térmico) e curto-circuito (efeito magnético). Sua constituição interna tem natureza eletromecânica, possuindo dentre outros elementos molas, bobinas, lâminas bimetálicas e contatos elétricos.

Na Figura 40 pode-se vislumbrar, de modo esquematizado, o princípio operativo de um disjuntor termomagnético. Correntes elétricas de elevada intensidade provocam o aquecimento (efeito Joule) de uma lâmina bimetálica, cujo finalidade é curvar-se quando submetida a um aquecimento elevado.

A curvatura da lâmina bimetálica provocará a abertura dos contatos internos do disjuntor (contato C) e conseqüentemente será interrompida a passagem de corrente pelo disjuntor. Este conjunto de fenômenos caracteriza a atuação do dispositivo por ação térmica. Na atuação magnética a bobina de detecção (E) formará uma espécie de eletroímã atraindo os contatos internos do disjuntor quando ocorrer uma elevação acentuada do campo magnético no entorno da bobina supracitada. O aumento do campo magnético estará associado a elevação instantânea da corrente elétrica, aspecto que caracteriza um curto-circuito.

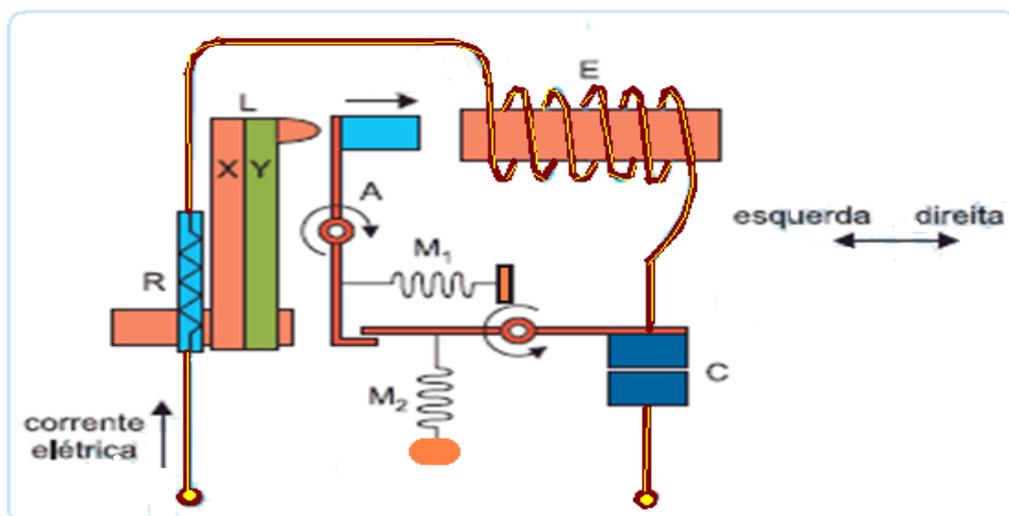


Figura 40: Princípio de funcionamento do disjuntor termomagnético, disponível em: <http://fisicaevestibular.com.br/Universidades2014/unesp014.htm>, acesso em 22/11/2016.

A Figura 41 apresenta o aspecto visual de um conjunto de disjuntores termomagnéticos ao passo que a Figura 42 classifica esta modalidade de disjuntor levando em consideração o número de polos que o constituem.



Figura 41: Exemplo de disjuntores termomagnéticos, disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funcionam-os-disjuntores/>, acesso em 22/11/2016.

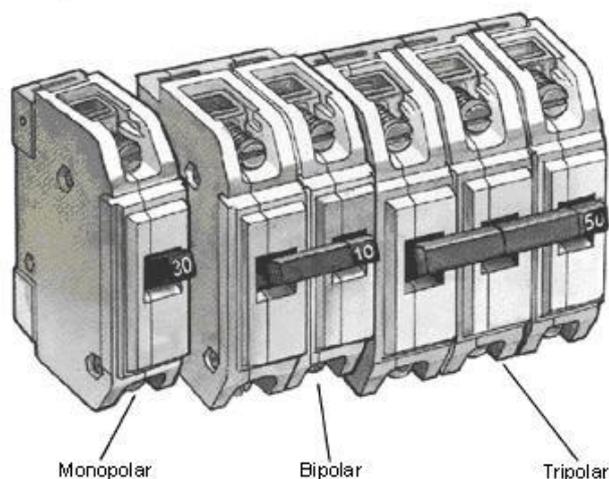


Figura 42: Classificação dos disjuntores quanto ao número de polos, disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/disjuntor-termomagnetico/>, acesso em 22/11/2016.

Os dispositivos de proteção, no caso dos disjuntores, funcionam ainda como dispositivos de manobra (comando ou seccionamento), proporcionando ações de inspeção e manutenção mais seguras em razão da ausência de corrente e tensão elétrica, resguardando os mantenedores contra eventuais choques elétricos.

Ainda no que se refere ao manuseio e manutenção das células, módulos e bancos deve-se testar previamente se os mesmos encontram-se totalmente desenergizados antes de quaisquer intervenções, ainda que os respectivos disjuntores estejam desligados, uma vez que capacitores são dispositivos caracterizados por sua propriedade de armazenar cargas elétricas.

Opcionalmente são instaladas chaves seletoras de três posições do tipo automático/manual/desligado, no caso dos bancos de capacitores de acionamento automático. O emprego destas chaves permite a operação provisória do equipamento

Versão 0.5 **Aspectos Básicos da Correção do F.P.** **Prof. Eng. Dennys Lopes Alves.**
em caso de falhas no sistema de acionamento automático. A Figura 43 apresenta uma chave desta natureza.



Figura 43: Exemplo de chave seletora de 3 posições, disponível em: http://www.eletricajmt.com.br/product.php?id_product=186, acesso em 22/11/2016.

Os estágios ou módulos são individualmente sinalizados para a condição de ligados por meio de sinaleiros, em geral instalados na porção frontal dos painéis de controle dos capacitores.

Melhores capacidades de condução, maior durabilidade e resistência mecânica são obtidas quando se utilizam barramentos de cobre no lugar de cabos elétricos, como formar de alimentar os circuitos principais e de distribuição dos capacitores que constituem o banco.

Por questões de segurança os barramentos de cobre devem ser protegidos quanto a possibilidade de contato direto ou indireto com partes energizadas. A proteção supracitada pode ser implementada da forma de revestimentos termo contráteis isolantes (Figura 44) e placas de policarbonato transparentes ou acrílico (Figuras 45 e 46).



Figura 44: Exemplo de barramentos de cobre com termo contrátil, disponível em: <http://www.grupobtm.com.br/produtos.cfm?c=6&i=21>, acesso em 22/11/2016.



Figura 45: Barramentos protegidos com placa de acrílico, disponível em: <http://ce.olx.com.br/fortaleza-e-regiao/servicos/protecao-de-acrilico-para-quadros-eletricos-e-botoes-123697694>, acesso em 22/11/2016.



Figura 46: Placa de proteção de acrílico instalada no quadro elétrico, disponível em: <http://www.diariodoeletricista.com.br/2016/04/05/e-requisito-utilizar-acrilico-policarbonato-na-norma-5410/>, acesso em 22/11/2016.

6. Legislação e Faturamento

A legislação inerente ao fator de potência remonta ao decreto N° 479 de 20 de março de 1992, onde foi estabelecido como referência para o F.P. o valor de 0.92, indutivo ou capacitivo.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - determina como valor de fator de potência de referência o valor de 0.92 (média horária¹⁰), indutivo ou capacitivo. Este valor de referência pode variar de país para país conforme pode visualizar na Figura 47, por exemplo.

Limites de fator de potência em alguns países

Brasil	0,92
Coréia, França e Portugal	0,93
Bèlgica, Argentina, Alemanha e Suíça	0,95

Figura 47: Exemplos de F.P. de referência, disponível em: <http://blog.wgr.com.br/2011/06/energia-reativa-o-que-o-consumidor-paga.html>, acesso em 13/11/2016.

¹⁰ As tarifas associadas ao consumo de energia reativa e/ou demanda de potência reativa excedentes são calculados a partir de intervalos de tempos de uma hora.

Percebe-se, portanto, que diferentes valores de fator de potência são admissíveis, entretanto quanto mais próximo de 1, mais eficiente será a instalação elétrica.

Valores inferiores a esta referência serão devidamente multados, através da imposição de taxas referentes ao consumo reativo excedente. Será taxada a diferença entre o valor de referência e o valor calculado durante o transcorrer do ciclo de faturamento. O valor correspondente a multa por baixo fator de potência pode ser calculada através da Equação 20 a seguir:

$$\text{Custo Excedente (R\$)} = \text{kWh}_{\text{Medido}} \times \text{Tarifa (R\$/kWh)} \times \frac{(0,92 - 1)}{\text{F.P.}_{\text{Medido}}}$$

Equação 20: Custo da energia reativa excedente.

F.P._{Medido}: Fator de potência medido no período de faturamento (fator de potência médio);

kWh_{Medido}: Energia ativa consumida no ciclo de medição.

O acréscimo percentual (multa) decorrente de um F.P. inferior ao valor de referência pode ser calculado em função do valor da respectiva fatura, para isso utiliza-se a Equação 21.

$$\text{Acréscimo Percentual} = \text{Valor da Fatura} \times \left(\frac{\text{F.P.}_{\text{Referência}}}{\text{F.P.}_{\text{Medido}}} - 1 \right)$$

Equação 21: Multa por baixo F.P. em função do valor da fatura.

F.P._{Referência}: Fator de potência de referência (0,92);

F.P._{Medido}: Fator de potência medido no período de faturamento (fator de potência médio).

A aplicação, na Equação 21, de diferentes valores de fator de potência medidos permite que seja construída uma tabela que associa os valores de fator de potência medidos aos respectivos acréscimos percentuais, conforme visualiza-se na Tabela 2.

Tabela 2: F.P. medido x Acréscimo percentual da conta de energia.

Item	F.P. Medido	Acréscimo percentual
1	0.92	0%
2	0.90	2%
3	0.86	7%
4	0.82	12%
5	0.78	18%
6	0.74	24%

7	0.70	31%
8	0.66	39%
9	0.62	48%
10	0.58	59%
11	0.54	70%
12	0.50	84%

A premissa básica que norteia o faturamento de excedentes reativos é o montante de energia ativa que não foi transportado em função do "espaço ocupado" pela energia reativa excedente. São aplicadas multas sobre a demanda e sobre o consumo, considerando ainda os horários de ponta e fora de ponta no caso da classe tarifária horo-sazonal.

6.1. Período indutivo x período capacitivo

As multas por baixo fator de potência estão associadas ainda ao horário (período) do dia, sendo que para fins de faturamento são considerados dois intervalos, a saber:

- Período indutivo: 06:30h às 00:30h;
- Período capacitivo: 00:30h às 06:30h.

Durante o transcorrer das horas referentes ao período indutivo, apenas o F.P. indutivo pode ser cobrado, ou seja, valores de fator de potência baixos, porém capacitivos não podem ser cobrados. Durante o período indutivo o banco de capacitores deve estar ligado.

Em contrapartida ao período indutivo, no período capacitivo apenas o F.P. capacitivo pode ser cobrado, ou seja, valores de fator de potência inferiores a 0.92, porém indutivos não podem ser cobrados. Durante o período capacitivo o banco de capacitores deve estar desligado.

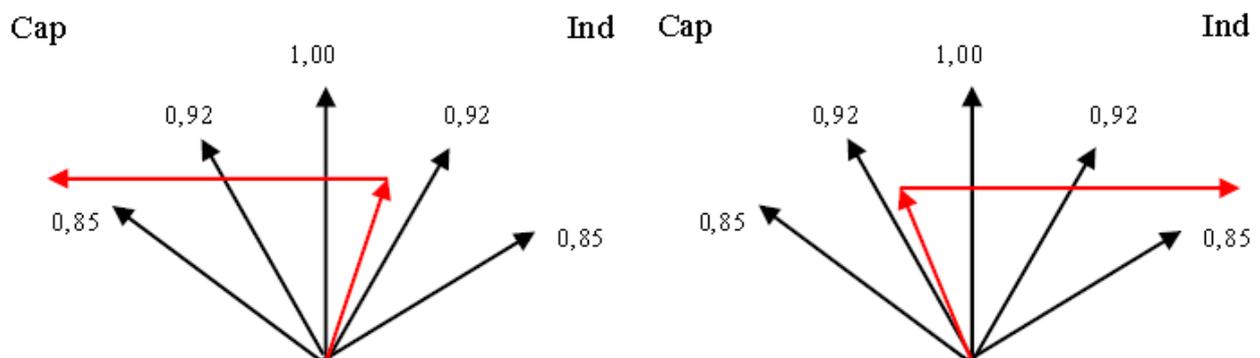


Figura 48: F.P nos períodos indutivo e capacitivo, disponível em: ROTONDO JUNIOR, salvador. Correção do fator de potência i: conceitos básicos e informações gerais sobre a correção do fator de potência.

De um modo geral, o consumidor poderá utilizar até 0,425 Varh por cada kWh que consumir. Valores acima deste patamar devem ser multados. Divide-se a energia ou potência reativa por sua correspondente ativa. Resultados superiores a 0,425 são indicativos da necessidade de realizar a correção do fator de potência.

Referências

[1] COSERN. **Energia Reativa:** O Que Os Nossos Clientes Precisam Saber Para Reduzir Os Custos Com Energia Elétrica. Natal: Cosern, 2016;

[2] ROTONDO JUNIOR, salvador. **Correção do fator de potência:** conceitos básicos e informações gerais sobre a correção do fator de potência. São Paulo: Engeeletrica, 2016;

[3] COPEL. **Fator de Potência:** Como transformá-lo em um fator de economia. Paraná: Copel, 2016.