

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA
ÊNFASE EM QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

**"QUALIDADE DA ENERGIA EM PROJETOS DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA"**

Por

Andrezza Amaral Nunes de Oliveira

Monografia de Final de Curso

Prof. Selênio Rocha Silva

(Orientador)

Belo Horizonte, Dezembro/2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica:

Ênfase em Qualidade da Energia Elétrica

“Qualidade da Energia em Projetos de Eficiência Energética”

Andrezza Amaral Nunes de Oliveira

Prof. Selênio Rocha Silva

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Belo Horizonte Dezembro/2011

"Qualidade da Energia em Projetos de Eficiência Energética "

Andrezza Amaral Nunes de Oliveira

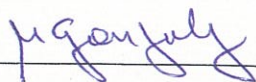
Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Certificado de Especialista em Sistemas de Energia Elétrica com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica.

Aprovada em 22 de dezembro de 2011

Por:



Prof. Selênio Rocha Silva
(Orientador)



Prof. Manuel Lousada y Gonzalez
(Relator)

Resumo

A definição da eficiência energética tem sido inserida em contextos quase exclusivos de redução do uso de energia elétrica. Na realidade, o conceito de eficiência energética deve exercer influência mais abrangente nos cenários produtivos. Eficiência energética não apenas inclui a importante redução no consumo de energia como também abrange a redução nas perdas de produção e tempos de parada, desperdício de materiais, danos e falhas de equipamentos, manutenção de equipamento e perdas de trabalho tipicamente associadas à má qualidade da energia elétrica.

Considerando este cenário é extremamente importante que os projetos de eficiência energética incorporem requisitos de qualidade de energia nas especificações dos equipamentos eficientes como também especifiquem, em paralelo às ações de redução de consumo de energia, sistemas que mitiguem ou eliminem os efeitos da má qualidade da energia no sistema elétrico sob estudo.

Este trabalho apresenta uma visão geral dos problemas de qualidade da energia nos principais equipamentos das indústrias de médio e grande portes, que representam grandes potenciais de economia em projetos de eficiência energética.

Abstract

The definition of energy efficiency has been placed almost exclusively in contexts of reduction of electricity consumption. In reality the concept of energy efficiency should have broader influence in productive scenarios. Energy efficiency not only includes a significant reduction in energy consumption but also includes the reduction in production losses and downtime, material waste, equipment damage and failure, equipment maintenance, typically associated with poor power quality.

Considering this scenario is extremely important that energy efficient projects incorporate quality requirements in the specification of energy efficient equipments as well as specifying systems to mitigate or even eliminate the the bad effects of poor power quality in the power systems under study.

This paper presents an overview of the problems of power quality in the equipments most applied in medium and large industries, which represent large potential of savings in energy efficiency projects.

Sumário

Lista de Figuras	7
Lista de Tabelas	8
Lista de Abreviaturas e Siglas	9
1. Introdução	11
1.1. Objetivo do Trabalho	11
1.2. Relevância	11
1.3. Metodologia	12
1.4. Organização do Texto	12
2. Qualidade da Energia Elétrica	14
2.1. Considerações Iniciais	14
2.2. Distúrbios na QEE	15
2.2.1. Afundamentos de Tensão	19
2.2.2. Elevação de tensão	21
2.2.3. Harmônicas	21
2.2.4. Desequilíbrios	22
2.2.5. Interrupções	23
2.2.6. Componentes Interharmônicas de Tensão e Corrente	24
2.3. Normas e Recomendações	24
3. Sistemas Eficientes e Impactos na Qualidade da Energia	27
3.1. Considerações Iniciais	27
3.2. Programas de Eficiência Energética	27
3.3. Medidas de Eficiência Energética e a Qualidade da Energia	29
3.3.1. Acionamentos de Velocidade Variável	29
3.3.1.1. Problemas de QEE Associados aos AVV's	31
3.3.2. Motores Elétricos	32
3.3.2.1. Problemas de QEE Associados aos Motores	35
3.3.3. Bancos de Capacitores	36
3.3.3.1. Problemas de QEE Associados aos Capacitores	38
3.3.4. Iluminação	39
3.3.4.1. Problemas de QEE Associados a Iluminação	41
4. Eficiência Energética por Meio da Qualidade da Energia	42
4.1. Proposta do Trabalho	42
4.2. Requisitos de Equipamentos	43
4.2.1. Acionamentos de Velocidade Variável	44
4.2.2. Motores Elétricos	45
4.2.3. Bancos de Capacitores	46
4.2.4. Iluminação	48
4.3. Dispositivos de Condicionamento	49
4.3.1. Filtros Passivos	50
4.3.2. Filtros Ativos	51
4.3.3. Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT)	54
5. Conclusão	56
5.1. Conclusões Finais	56
5.2. Contribuições Apresentadas	56
5.3. Propostas para Trabalhos Futuros	56
Referências Bibliográficas	58

Lista de Figuras

Figura 3-1 Configuração típica de um AVV	30
Figura 3-2 Fração de perdas típicas em um motor de 4 polos de 50Hz, adaptado de (Almeida, 2011).....	33
Figura 3-3 Curvas de eficiência para motores CA típicos, adaptado de (Power Efficiency Corporation, 2011)	34
Figura 3-4 Sobreaquecimento do motor devido a um desequilíbrio de fase, adaptado de (Mehrdad, 2007)	35
Figura 3-5 Fator <i>derating</i> da potência mecânica para tensões desequilibradas, adaptado de (Mehrdad, 2007)	36
Figura 3-6 Potência ativa (P), potência reativa (Q1), potência aparente (S1) e fator de potência ($\cos\phi$);.....	38
Figura 3-7 Representação da ressonância em série e paralela de uma banco de capacitor, adaptado de (Manual WEG, 2011)	39
Figura 4-1 Áreas de abrangência propostas para um projeto de Eficiência Energética	42
Figura 4-2 Representação do fator de potência real, adaptado de (Manual WEG, 2011)	47
Figura 4-3 Filtros passivos passa alta, adaptado de (Akagi, 2005)	51
Figura 4-4 Filtros passivos passa faixa, adaptado de (Akagi, 2005)	51
Figura 4-5 Filtro ativo sintetizador de corrente, adaptado de (Akagi, 2005)	52
Figura 4-6 Filtro ativo sintetizador de tensão, adaptado de (Akagi, 2005)	54

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 Classificação dos distúrbios de QEE de curta duração (IEEE 1159, 1995).....	16
Tabela 2-2 Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios	17
Tabela 2-3 Limites individuais de flutuação de tensão	18
Tabela 2-4 Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental	19

Lista de Abreviaturas e Siglas

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- AVV – Acionamentos à Velocidade Variável
- CA – Corrente alternada
- CC – Corrente contínua
- CLP – Controladores Lógicos Programáveis
- CVT – *Constant Voltage Transformer* (Transformador de Tensão Constante)
- DHT – Distorção Harmônica Total
- DIT – Demais Instalações de Transmissão
- DOE – *Department of Energy* (Departamento de Energia dos Estados Unidos)
- DRP – Duração Relativa de Violação de Tensão Precária
- DRC – Duração Relativa de Violação de Tensão Crítica
- DRCM – Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica
- DRPM – Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária
- DTHT – Distorção de Tensão Harmônica Total
- EMC – *Electromagnetic Compatibility* (Compatibilidade Eletromagnética)
- EPRI – *Electrotechnical Power Research Institute* (Instituto de Pesquisa em Energia Eletromecânica)
- ESCO – *Energy Services Companies* (Companhia de Serviços em Energia)
- FACTS – *Flexible AC Transmission Systems* (Sistema Flexível de Transmissão de Corrente Alternada)
- HVDC – *High Voltage Direct Current* (Corrente Contínua de Alta Tensão)
- IEC – *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica Internacional)
- IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Elétricistas e Eletrônicos)
- IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar Porta Isolada)
- K – Fator de Desequilíbrio de Tensão
- LED – *Light-Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)
- ms – milissegundo
- PFC – *Power Factor Compensation* (Fator de Potência de Compensação)
- Plt – Indicador de Severidade de Cintilação de Longa Duração
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PROREDE – Procedimentos de Rede

Pst – Indicador de Severidade de Cintilação de Curta Duração

PWM – *Pulse-Width Modulated* (Pulso de Largura Modulada)

ONS – Operador Nacional do Sistema

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

RDT – Restaurador Dinâmico de Tensão

RMS – *Root Mean Square* (Valor Quadrático Médio)

SIN – Sistema Integrado Nacional

VSD – *Variable Speed Driver* (Dispositivo de Velocidade Variável)

VUF=*Voltage Unbalance Factor* (Fator de Desequilíbrio de Tensão)

1. Introdução

Conforme (Eletrobrás/Procel, 2001), os atuais projetos de conservação de energia, adotados por diversas empresas governamentais (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL) e não governamentais (*Energy Services Companies* – ESCOS e consultorias em geral), são elaborados e executados considerando que o sistema elétrico esteja trabalhando com formas de onda exclusivamente senoidais, com frequências e níveis de tensão iguais aos nominais. Dessa forma os problemas da qualidade da energia elétrica particulares dos ambientes avaliados não são considerados e as medidas de efficientização acabam, normalmente, piorando o cenário da qualidade da energia daquele sistema elétrico, com a inclusão de inversores de frequência, controladores de intensidade luminosa, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos de baixa qualidade, bancos de capacitores para correção de fator de potência, entre outras medidas.

1.1. *Objetivo do Trabalho*

Este trabalho objetiva incitar a compreensão da eficiência energética como conceito diretamente relacionado a qualidade da energia elétrica e não apenas relacionado a utilização de equipamentos que realizam mais trabalho com menos energia. Essa visão defende que uma energia eficiente é aquela capaz de produzir um resultado financeiro positivo para qualquer indústria ou estabelecimento, seja pelo seu uso otimizado ou mesmo pela qualidade da energia utilizada. Neste contexto, o trabalho objetiva apresentar as ações típicas para a melhoria da qualidade da energia elétrica e que devem ser consideradas em projetos de eficiência energética.

1.2. *Relevância*

O tema qualidade da energia e eficiência energética vem ganhando cada vez mais destaque nos diversos setores da sociedade, sejam eles industriais, comerciais, institucionais ou domésticos.

Este trabalho apresenta os impactos na qualidade da energia elétrica devido à inclusão de equipamentos geralmente aplicados em projetos de eficiência energética em indústrias de médio e grande porte, além dos impactos da uma má qualidade da energia elétrica nesses equipamentos. O cenário das indústrias de médio e grande porte foi escolhido devido aos grandes números envolvidos em projetos de eficiência energética, tanto com relação às capacidades nominais dos equipamentos especificados, quanto aos valores de investimentos.

1.3. Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste na realização de levantamento bibliográfico sobre as tecnologias aplicadas em projetos de eficiência energética em indústrias de médio e grande porte, seus impactos na qualidade da energia elétrica e as soluções tecnológicas mais utilizadas atualmente para a minimização de impactos negativos nos componentes do sistema elétrico.

1.4. Organização do Texto

Esta monografia foi dividida em 5 capítulos, sendo que o Capítulo 1 busca apresentar o conteúdo trabalhado nos demais capítulos.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral dos fenômenos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) apresentando um breve histórico de como a qualidade da energia tem ganhado importância cada vez maior para as concessionárias, indústrias e consumidores em geral. É realizada também uma breve revisão bibliográfica dos conceitos da QEE e das normas e recomendações que abordam o tema qualidade da energia e que atualmente encontram-se em vigor no Brasil e no mundo.

No Capítulo 3 são apresentadas as abordagens normalmente utilizadas em programas de eficiência energética, os potenciais impactos na QEE gerados pelas medidas de conservação de energia, assim como os danos nos sistemas em geral devido a uma má QEE.

No Capítulo 4 é apresentada uma abordagem crítica da estrutura de um projeto de eficiência energética englobando tanto os aspectos tradicionais de programas de eficiência energética

como também o trato responsável dos distúrbios de qualidade da energia existentes no cenário avaliado e dos distúrbios inseridos pelas medidas de conservação de energia propostas.

No Capítulo 5 são apresentadas a conclusão deste trabalho e as oportunidades de continuidade de estudo para o tema.

Finalmente o trabalho apresenta as referências bibliográficas consultadas neste trabalho.

2. Qualidade da Energia Elétrica

2.1. Considerações Iniciais

No passado, a questão da qualidade da energia elétrica não era largamente discutida, pois a maioria dos usuários não necessitava de um fornecimento de energia, ou tensão, de alta qualidade. Atualmente a questão da qualidade da energia elétrica surge como um fator muito mais relevante às partes conectadas no sistema elétrico.

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto são, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes. Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros pode ser considerado como uma perda de qualidade de energia.

O termo qualidade da energia é atualmente difundido, apesar de alguns autores utilizarem o termo qualidade da tensão. O IEC (*International Electrotechnical Commission*), que tem o peso normativo e é utilizado como referência normativa em diversos países do mundo, não utiliza o termo qualidade da energia em nenhuma das suas normas. Aplica, ou invés disso, o termo compatibilidade eletromagnética (Bollen, 2000).

A deterioração da qualidade pode provocar ineficiências técnicas e econômicas com significativas perdas para a sociedade, uma vez que os modernos processos industriais produtivos podem sofrer interrupções devido a uma má qualidade da energia elétrica.

Bollen (Bollen, 2000) classificou algumas causas para o recente crescimento do interesse em qualidade da energia:

- Equipamentos se tornaram mais sensíveis a distúrbios de tensão: Os equipamentos eletrônicos se tornaram bem mais sensíveis que há 10 ou 20 anos atrás. Além disso, as indústrias também se tornaram mais preocupadas com perdas de produção devido às pequenas margens de lucro.

- Equipamentos que causam distúrbios na tensão: Equipamentos eletrônicos modernos não apenas são afetados por uma má qualidade da energia como também são, muitas vezes, as causas de distúrbios para outros consumidores. O aumento do uso de equipamentos conversores de energia levou a um grande crescimento dos distúrbios de tensão. A principal causa de distúrbios, neste caso, são as correntes harmônicas geradas por retificadores e inversores que causam distorções na tensão de suprimento.
- Crescente necessidade de padronização e critérios de desempenho: A eletricidade é vista como um produto que deve ser medido, previsto, garantido, melhorado etc. Antigamente o consumidor tinha apenas um contrato com a concessionária de energia. Hoje o cenário é mais complexo, com a entrada de empresas distintas para geração, transmissão e distribuição. Isso faz crescer a necessidade de se criar critérios para responsabilizar empresas pela confiabilidade do fornecimento de energia e da criação de critérios para definir níveis de qualidade da energia aceitáveis. O consumidor atualmente é, em geral, mais afetado pela qualidade da energia e por isso mais consciente e participativo.
- Concessionárias buscam entregar um melhor produto: Algumas concessionárias simplesmente buscam entregar uma energia de boa qualidade. Promover um sistema com alta confiabilidade de suprimento com custo reduzido é um desafio técnico praticado por muitas concessionárias e que tem valor social de sustentabilidade.
- A qualidade da energia pode ser medida: O surgimento de dispositivos eletrônicos capazes de medir e mostrar formas de onda certamente contribuiu para o interesse na qualidade da energia. Correntes harmônicas e quedas de tensão eram difíceis de medir no passado e apenas valores eficazes de tensão, frequência e longas interrupções podiam ser medidas em larga escala.

2.2. Distúrbios na QEE

Os diversos distúrbios que ocorrem em um sistema elétrico, e que afetam a QEE podem ser agrupados de acordo com a sua duração, intensidade, tipo de ocorrência, entre outros.

Na Tabela 2-1 são apresentados os distúrbios eletromagnéticos associados à QEE, conforme o padrão IEEE Std 1159.

Tabela 2-1 Classificação dos distúrbios de QEE de curta duração (IEEE 1159, 1995)

Categorias	Componente espectral típico	Duração típica	Magnitude típica da tensão
<u>1 - Transientes</u>			
1.1 - Impulsivos			
Nanosegundos	tempo de crista 5 ns	< 50 ns	
Microsegundos	tempo de crista 1 us	50 ns - 1 ms	
Milisegundos	tempo de crista 0,1 ms	> 1 ms	
1.2 - Oscilatórios			
Baixa frequência	< 5 kHz	0,3 - 30 us	0 - 4 pu
Média frequência	5 - 500 kHz	20 us	0 - 8 pu
Alta frequência	0,5 - 5 MHz	5 us	0 - 4 pu
<u>2 - Variações de curta duração</u>			
2.1 - Instantâneos			
Afundamento de tensão		0,5 - 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
Elevação de tensão		0,5 - 30 ciclos	1,1 - 1,8 pu
2.2 - Momentâneos			
Interrupção		0,5 - 3 s	< 0,1 pu
Afundamento de tensão		30 ciclos - 3 s	0,1 - 0,9 pu
Elevação de tensão		30 ciclos - 3 s	1,1 - 1,8 pu
2.3 - Temporárias			
Interrupção		3 s - 1 min	< 0,1 pu
Afundamento de tensão		3 s - 1 min	0,1 - 0,9 pu
Elevação de tensão		3 s - 1 min	1,1 - 1,8 pu
<u>3 - Variações de longa duração</u>			
3.1 - Interrupção sustentada		> 1 min	0,0 pu
3.2 - Subtensões		> 1 min	0,8 - 0,9 pu
3.3 - Sobretensões		> 1 min	1,1 - 1,2 pu
<u>4 - Desequilíbrio</u>		Contínuo	0,5 - 2%
<u>5 - Distorção de forma de onda</u>			
5.1 - Nível CC		Contínuo	0 - 0,1 %
5.2 - Harmônicos	0 - 100° H	Contínuo	0 - 20 %
5.3 - Interharmônicos	0 - 6 kHz	Contínuo	0 - 2 %
5.4 - Corte		Contínuo	
5.5 - Ruído	espectro banda	Contínuo	0 - 1 %
<u>6 - Flutuação de tensão</u>	< 25 Hz	Intermitente	0,1 - 7%
<u>7 - Variações de frequência</u>		< 10 s	

No módulo 2.8 dos Procedimentos de Rede – Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes (Submódulo 2.8 ONS, 2010) – também são apresentados os indicadores de desempenho relacionados à QEE, conforme apresentado a seguir.

- Indicadores de Variação de Frequência

O Módulo 2.8 dos Procedimentos de Rede define o indicador DFD como uma avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios, contabilizados no período de 1 (um) ano, adotando-se os limites apresentados na .

Tabela 2-2 Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios

Desempenho	Tempo acumulado máximo de exposição a desvios de frequência (segundos)
$f > 66,0 \text{ Hz}$	0
$63,5 \text{ Hz} < f \leq 66,0 \text{ Hz}$	30
$62 \text{ Hz} < f \leq 63,5 \text{ Hz}$	150
$60,5 \text{ Hz} < f \leq 62,0 \text{ Hz}$	270
$58,5 \text{ Hz} < f \leq 59,5 \text{ Hz}$	390
$57,5 \text{ Hz} < f \leq 58,5 \text{ Hz}$	45
$56,5 \text{ Hz} < f \leq 57,5 \text{ Hz}$	15
$f < 56,5 \text{ Hz}$	0

- Indicadores de Tensão

O Módulo 2.8 dos Procedimentos de Rede classifica faixas críticas, precárias e adequadas para tensão de atendimento. O desempenho da tensão de atendimento em regime permanente nos pontos de observação da tensão em base mensal é avaliado qualitativamente a partir da comparação dos indicadores DRP – Duração Relativa de Violação de Tensão Precária – e DRC – Duração Relativa de Violação de Tensão Crítica – com os seguintes valores de referência máximos:

(a) Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária (DRPM), estabelecida como 3%; e

(b) Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica (DRCM), estabelecida como 0,5%.

- Flutuação de Tensão

Os níveis de severidade de cintilação, causados pela flutuação de tensão, são quantificados pelos indicadores Indicador de Severidade de Cintilação de Curta Duração – Pst e Indicador de Severidade de Cintilação de Longa Duração – Plt, conforme descrição e recomendação da Comissão Internacional de Eletrotécnica na norma IEC 61000-4-15 (*Flickermeter – Functional and design specifications*).

Os indicadores de severidade de cintilação, adotados como representativos da flutuação de tensão em barramentos da rede básica e em barramentos dos transformadores de fronteira, são:

(a) PstD95%: valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 (um) dia (24 horas);

(b) PltS95%: valor do indicador Plt que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de uma semana, ou seja, de 7 (sete) dias completos e consecutivos.

O Módulo 2.8 do Procedimento de Rede define os limites individuais de flutuação de Tensão conforme indicado na Tabela 2-3.

Tabela 2-3 Limites individuais de flutuação de tensão

PstD95%	PltS95%
0,8pu/FT	0,6pu/FT

- Desequilíbrios de Tensão

O indicador que avalia o desequilíbrio de tensão é o Fator de Desequilíbrio de Tensão (K), que será apresentado mais detalhadamente no item 2.2.4. O valor do indicador a ser comparado com o valor limite, identificado como KS95%, é obtido pelo maior valor que for superado em apenas 5% dos registros de K obtidos no período de um dia, em intervalos de 10 minutos, por 7 dias consecutivos. O limite individual é de $KS95\% \leq 1,5\%$

- Distorção Harmônica de Tensão

Conforme o Módulo 2.8 (Submódulo 2.8 ONS, 2010) entende-se por Distorção de Tensão Harmônica Total – DTHT a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. O cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT) é apresentado no item 2.2.3 deste trabalho.

Para verificar a atendimento ao indicador, utiliza-se o DTHTS95%, que é obtido pelo maior valor que for superado em apenas 5% dos registros de DTHT obtidos no período de um dia, em intervalos de 10 minutos, por 7 dias consecutivos.

Os limites individuais de tensões harmônicas de ordem 2 a 50, bem como o limite para a DTHTS95% são apresentados na Tabela 2-4.

Tabela 2-4 Limites individuais em porcentagem da tensão fundamental

13,8kV ≤ V < 69kV				V ≥ 69kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥ 27	0,7%			≥ 27	0,4%		
DTHTS95% = 3%				DTHTS95% = 1,5%			

- Variação de Tensão de Curta Duração

Com relação às variações de tensão de curta duração, o que diferencia a classificação do Módulo 2.8 da recomendação IEEE 1159 são os períodos para classificação de variações momentâneas de tensão para todos os distúrbios com duração superior a um ciclo (0,016 segundos) e inferior a 3 segundos, não sendo classificados os distúrbios com duração inferior a 1 ciclo.

Serão explorados nos itens abaixo alguns conceitos de problemas de QEE mais comuns em indústrias de médio e grande porte e suas causas.

2.2.1. Afundamentos de Tensão

Um grave problema para as indústrias são os afundamentos nos valores de tensão. O afundamento de tensão é a redução da magnitude da tensão de suprimento acompanhada por uma recuperação do valor prévio da tensão em um curto período de tempo (Bollen, 2000).

Os afundamentos de tensão são causados, na maioria das vezes, por curto-circuitos no sistema elétrico, sobrecargas e por partidas de grandes motores. Durante o início da partida, os motores drenam correntes da ordem de 5 a 8 p.u. do sistema elétrico, com baixos fatores de potência, na faixa de 0,15 a 0,3. A passagem da corrente de partida do motor pela impedância do sistema, sobretudo em redes com baixo nível de curto-circuito, pode resultar em severos afundamentos de tensão (Carvalho, 2000). Destaca-se, contudo, que as partidas de grandes motores muitas vezes são controladas e, geralmente, podem não causar problemas nas cargas sensíveis. A maioria dos grandes motores parte de forma indireta, através de dispositivos próprios, como por exemplo, partida com chave estrela-triângulo, partida com auto-transformador, partida com chaves estáticas (soft starter), entre outros. A adoção destes dispositivos tem por objetivo reduzir a severidade dos afundamentos de tensão, tornando-os de magnitude que geralmente não são suficientes o bastante para comprometer a operação dos equipamentos eletro-eletrônicos. Isto torna a partida de motores uma causa de geração de afundamento de tensão menos relevante, se comparada com a ocorrência de curto-circuitos nas linhas de transmissão e de distribuição (Costa, 2003).

As faltas no sistema elétrico são as principais causas do afundamento de tensão. Podem ocorrer tanto dentro da indústria, como no sistema de alimentação da concessionária, sobretudo neste último, devido à existência de milhares de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e distribuição, sujeitas a toda sorte de fenômenos naturais. Em sistemas industriais a distribuição primária e secundária é tipicamente realizada através de cabos isolados, que possuem reduzida taxa de falta se comparados às linhas aéreas (Costa, 2003).

Os afundamentos de tensão geralmente não causam danos a equipamentos, mas interrompem processos industriais inteiros, com perdas de qualidade nos produtos e no tempo para a retomada de produção. Por isso, são grandes responsáveis por perdas de produção.

As cargas mais vulneráveis ao afundamento de tensão são os equipamentos eletrônicos a base de microprocessadores, como os acionamentos à velocidade variável (AVV's) e os controladores lógicos programáveis (CLP's). Os efeitos mais comuns são disfunções nos CLP's ou nos microprocessadores de controle, causando interrupções de parte ou de todo o processo, atuação dos dispositivos de proteção dos AVV's e seu conseqüente desligamento, desatracamento das bobinas de contadores e relés auxiliares, perda de programação dos microcomputadores, entre outros. Estas ocorrências, como mencionado anteriormente, podem

resultar em prejuízos econômicos, perda de produtividade, redução da qualidade do produto e diminuição da satisfação dos clientes (Costa, 2003).

2.2.2. Elevação de tensão

São consideradas elevações de tensão aqueles valores de magnitude acima de 110% da tensão de referência. Assim como os afundamentos de tensão, as elevações de tensão também recebem diferentes nomes dependendo da duração dos mesmos. Elevações de tensão de curta duração são originados, entre outras formas, de descargas elétricas, operações de chaveamento, reduções repentinas de carga no sistema, curtos circuitos monofásicos e não linearidades.

Um exemplo típico em indústrias é a ressonância entre uma reatância magnetizante não-linear de um transformador e uma capacitância (na forma de um banco de capacitor ou mesmo como a capacitância de um cabo subterrâneo), que pode levar a uma alta e duradoura sobretensão (Bollen, 2000). Esse fenômeno é chamado de ferroressonância e pode levar a sérios danos aos equipamentos do sistema elétrico.

2.2.3. Harmônicas

A forma de onda da tensão real nunca é exclusivamente composta de uma única frequência. Quando se considera que um sinal é periódico, o mesmo pode ser descrito por uma soma de senoides com frequências múltiplas da frequência fundamental, chamadas componentes harmônicas (Bollen, 2000).

A principal causa das distorções harmônicas de tensão são as cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico. Um crescente número de cargas do sistema é composto por conversores eletrônicos que drenam correntes não senoidais e que acabam por provocar tensões não senoidais no sistema.

Há ainda outras duas causas para as distorções harmônicas de tensão. Uma delas é devida ao sistema de transporte da energia elétrica das fontes geradoras até as cargas não ser completamente linear, embora normalmente os desvios sejam pequenos. O exemplo clássico é

o transformador que está presente nesse sistema operando na sua curva de saturação. Outro exemplo de componente não linear é o elo de alta tensão contínua (HVDC), pois a transformação de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) e, vice-versa, faz uso de dispositivos eletrônicos que conduzem apenas durante parte do ciclo da onda, drenando correntes não senoidais.

O aumento do uso de dispositivos eletrônicos para controle do fluxo de potência e tensão (FACTS) traz o risco de aumento das distorções harmônicas geradas pelo sistema. Vale lembrar que essa mesma tecnologia permite remover grande parte das distorções originadas em algum ponto do sistema, como explicado no Capítulo 4.

Outra causa das distorções harmônicas é devido a tensão gerada por um gerador síncrono não ser exatamente senoidal, por causa de pequenos desvios da estrutura ideal da máquina geradora. Porém, como esses desvios são pequenos, considera-se que a tensão gerada é puramente senoidal.

Um dos parâmetros mais avaliados em harmônicos é a Distorção Harmônica Total (THD – *Total Harmonic Distortion*), tanto para a tensão (U) quanto para a corrente (I). Abaixo são apresentadas as fórmulas para distorção harmônica total de tensão, equação (1) e corrente, a equação (2).

$$THD\%(U) = 100 * \frac{\sum_{2}^{\infty} U^2}{U_1^2} \quad (1)$$

$$THD\%(I) = 100 * \frac{\sum_{2}^{\infty} I^2}{I_1^2} \quad (2)$$

Nas equações acima o índice corresponde a ordem harmônica da onda.

2.2.4. Desequilíbrios

O desequilíbrio de tensão e corrente é um fenômeno presente em sistemas trifásicos, nos quais os valores RMS (*Root Mean Square*) ou valor eficaz das tensões e/ou os ângulos de fase entre tensões consecutivas não são iguais. A severidade dos desequilíbrios de tensão em um sistema trifásico pode ser expressa por indicadores. O indicador mais empregado é o indicador de desequilíbrio de seqüência negativa. Esse indicador é calculado como a razão entre a

componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva dos componentes de tensão, conforme equação (3).

$$VUF = \frac{V_-}{V_+} \quad (3)$$

Onde:

VUF =Voltage Unbalance Factor

V- =Tensão de fase de seqüência negativa

V+ =Tensão de fase de seqüência positiva

Outros indicadores também são utilizados para verificação da severidade do desequilíbrio de magnitude e de fase.

A principal fonte de desequilíbrio de tensão é carga desbalanceada, o que provoca uma corrente desbalanceada. As causas são as divisões desbalanceadas de consumidores monofásicos entre as fases do sistema trifásicos e as grandes cargas monofásicas ou bifásicas no sistema elétrico.

Conforme (Mehrdad, 2007), ocasionalmente o desequilíbrio de tensão pode ser causado por erros nas conexões de *taps* dos transformadores de distribuição, um suprimento de energia instável, conexões mal feitas de alimentadores, presença de um transformador delta aberto, problemas nos próprios motores ou funcionamento impróprio de banco de capacitores.

2.2.5. Interrupções

A interrupção de tensão ou interrupção de suprimento (Bollen, 2000) ocorre quando a tensão nos terminais de suprimento se aproxima de zero que, para o IEC corresponde a tensão menor que 1% e para o IEEE corresponde a tensão menor que 10% da tensão nominal. Interrupções na tensão são iniciadas por faltas que acabam por disparar proteções do sistema elétrico. As interrupções também podem ser causadas por falhas físicas de equipamentos ou por operação intencional de usuários.

As interrupções são menos frequentes que os afundamentos e, geralmente, são fenômenos locais, ao contrário dos afundamentos, que são fenômenos considerados globais. As curtas e a maior parte das longas interrupções são originadas na rede de distribuição local. Entretanto os afundamentos de tensão nos terminais dos equipamentos podem ser devido a curtos-circuitos a centenas de quilômetros distante da carga, nas linhas de transmissão. Reduzir o número de interrupções geralmente requer melhorias em um único alimentador, enquanto reduzir o número de afundamentos de tensões requer melhorias em diversos alimentadores, além das linhas de transmissão de energia.

2.2.6. Componentes Interharmônicas de Tensão e Corrente

Alguns equipamentos produzem componentes de corrente que não são múltiplos inteiros da onda frequência fundamental (Bollen, 2000).

Seus principais causadores são os sistemas de dupla conversão presentes em turbinas eólicas, sistemas de ar condicionado, acionamentos eletrônicos de velocidade variável, cargas não sincronizadas com a frequência da rede, cicloconversores, fornos a arco, máquinas de solda, entre outros (Eletricidade Moderna, 2008).

A magnitude das interharmônicas é geralmente pequena o suficiente para não causar problemas, porém pode excitar ressonâncias entre indutâncias de transformadores e bancos de capacitores. As frequências interharmônicas abaixo da frequência fundamental são mais perigosas e podem levar a uma saturação de transformadores e danos a geradores síncronos e turbinas.

2.3. Normas e Recomendações

Existem atualmente diversas normas e recomendações técnicas a respeito do tema de qualidade da energia. O IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – instituto internacionalmente conhecido e respeitado, apresenta várias recomendações técnicas e especificações relacionadas ao tema da qualidade da energia. O IEEE Std. 1159 – *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* – e o IEEE Std. 519 – *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* – apresentam recomendações técnicas e limites máximos para as harmônicas de

corrente geradas por equipamentos. A recomendação IEEE 1346 – *IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronics Process Equipment* – apresenta um método para comparar o desempenho de equipamentos em relação a qualidade da energia. Além das recomendações apresentadas aqui, o IEEE oferece diversas outras recomendações com temas relacionados a qualidade da energia.

Já o IEC apresenta o IEC 61000 – *Electromagnetic Compatibility (EMC)*, composto de 6 partes, cada uma consistindo de diversas seções. Um exemplo de aplicação da norma IEC 61000 é a parte 3 que estabelece limites de emissão de harmônicos, de flutuações e flicker no sistema elétrico, entre outros. O IEC-61000 também aborda os aspectos de níveis de compatibilidade de ambientes (Parte 2), técnicas de medição e teste (Parte 4), recomendações para instalações (Parte 5) e normas relacionadas aos aspectos de imunidade de equipamentos e ambientes (Parte 6).

No Brasil, o módulo 8 do PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional –, aprovado através da Resolução 345/2008 pela ANEEL), estabelece procedimentos relativos a qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Em relação a qualidade do produto, esse módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade da tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem a ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. O Módulo 8 do PRODIST deve ser atendido por todos os consumidores com instalações conectadas a qualquer classe de tensão de distribuição, aos produtores de energia, as empresas distribuidoras, aos agentes importadores e exportadores de energia elétrica, as transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão (DIT) e pelo Operador Nacional do Sistema – ONS.

Os Procedimentos de Rede, também chamados de PROREDE, são documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS, com participação dos agentes, e aprovados pela ANEEL, que definem os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do SIN – Sistema Integrado Nacional. O submódulo 2.8 do PROREDE – Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes – apresenta os

indicadores de desempenho relacionados à QEE da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira e os valores limites de referência, no aspecto tanto global ou sistêmico, como individual ou por agente. Os indicadores, diretrizes e procedimentos estabelecidos neste submódulo aplicam-se a toda a rede básica e aos barramentos dos transformadores de fronteira.

No Brasil, geralmente são utilizadas como referências em projetos de instalações e de equipamentos as normas e recomendações internacionais.

3. Sistemas Eficientes e Impactos na Qualidade da Energia

3.1. Considerações Iniciais

A definição da eficiência energética tem sido inserida em contextos quase exclusivos de redução do uso de energia elétrica. Na realidade o conceito de eficiência energética deve exercer influencia mais abrangente nos cenários produtivos (Mehrdad, 2007). Eficiência energética não apenas inclui a importante redução no consumo de energia como também abrange a redução nas perdas de produção e tempos de parada, desperdício de materiais, danos e falhas de equipamentos, manutenção de equipamento e perdas de trabalho tipicamente associadas à má qualidade da energia.

A disseminação de avançados circuitos eletrônicos, equipamentos de estado sólido, computadores e controles eletrônicos sensíveis geraram muitos benefícios para os consumidores industriais, de manufatura, comerciais e institucionais, porém também criaram a vulnerabilidade de falhas. Além disso, os avanços tecnológicos não apenas são afetados, mas, muitas vezes, são as causas de problemas de qualidade da energia.

3.2. Programas de Eficiência Energética

Com a difusão da importância da sustentabilidade dos sistemas energéticos e sobretudo com a elevação dos preços relativos dos combustíveis em meados da década de setenta, emergiu a necessidade do uso racional da energia, quer no âmbito das empresas, quer no cenário institucional (Eletrobrás/Procel, 2007).

A energia não consumida em perdas pode vir a ser utilizada para algum fim útil e diversas medidas de redução do consumo de energia elétrica, como a substituição de lâmpadas incandescentes por tecnologias mais eficientes e a adequação de motores de indução às cargas acionadas ou utilização de inversores de frequência passaram a ser implantadas em empresas e indústrias.

Os programas de eficiência energética geralmente abrangem três áreas de trabalho: gestão da energia, especificação de equipamentos mais eficientes ou mudança no processo para torná-lo mais eficiente e, por último, a conscientização das pessoas e conseqüente mudanças de hábitos. Essas três áreas formam um tripé em projetos de eficiência energética e cada uma tem grande importância para que se atinjam resultados positivos consistentes.

A gestão da energia é responsável por gerenciar e direcionar as medidas de conservação de uma instalação e trabalha os seguintes aspectos (Eletrobrás/Procel, 2007):

- Conhecimentos das informações relacionadas a fluxo de energia, ações que influenciam esses fluxos, os processos e atividades que utilizam a energia e relacionam com um produto ou serviço;
- Acompanhamento dos índices de controle como, por exemplo, consumo de energia, custos específicos, fator de utilização e valores médios, contratados, faturados e registrados de energia;
- Controle dos índices com vistas a redução do consumo energético através da implantação de ações que buscam a utilização racional da energia.

As ações citadas acima criam subsídio para as duas outras áreas de um projeto de eficiência energética tradicional: campanhas de conscientização de uso consciente da energia e a troca de equipamentos ou a adequação de processos industriais.

Campanhas para uso consciente da energia elétrica devem considerar a divulgação por toda a empresa da responsabilidade de cada funcionário no cenário geral, informando como e porque cada um deve colaborar, os valores de desperdício, as metas etc. sempre o mais próximo possível do público. Tão importante quanto os aspectos técnicos dos projetos de eficiência energética, são as mudanças de hábitos dos usuários, tornando a utilização dos sistemas mais eficiente, reduzindo o desperdício e o consumo.

Já a especificação de equipamentos eficientes está relacionada ao levantamento de equipamentos e processos nas empresas e indústrias e identificação se sua troca ou adequação irão trazer retorno financeiro.

Dentre as medidas normalmente tomadas em projetos de eficiência energética no setor industrial pode-se destacar (Eletrobrás/Procel, 2001):

- Acionamentos de velocidade variável para motores;
- Compensação de potência reativa através de bancos de capacitores;
- Motores de alta eficiência;
- Dimensionamento ótimo de motores;
- Iluminação interior e exterior com lâmpadas de sódio a alta pressão;
- Recuperação de calor de processo;
- Cogeração industrial;
- Bombas de calor para processo, entre outros.

A seguir são apresentadas discussões sobre as medidas de eficiência e as relações existentes com a Qualidade da Energia Elétrica.

3.3. Medidas de Eficiência Energética e a Qualidade da Energia

Estão relacionados a seguir os principais equipamentos utilizados em projetos de eficiência energética destacando-se os problemas de qualidade de energia que são causados por esses equipamentos assim como os problemas sofridos pelos mesmos em função de uma má qualidade da energia. Procurou-se destacar neste trabalho os equipamentos mais utilizados em indústrias típicas de médio e grande porte.

Outros problemas de qualidade de energia não destacados aqui, mas que também causam transtornos para indústrias, escritórios e residências como, por exemplo, flicker, ruídos etc. não serão abordados neste trabalho, por não serem, em geral, os principais causadores de prejuízos financeiros para indústrias de médio e grande porte.

3.3.1. Acionamentos de Velocidade Variável

Os acionamentos de velocidade variável, ou VSD (*Variable Speed Driver*), são requeridos quando se é necessário ter controle da velocidade do processo.

A Figura 3-1 apresenta uma configuração típica de um AVV.

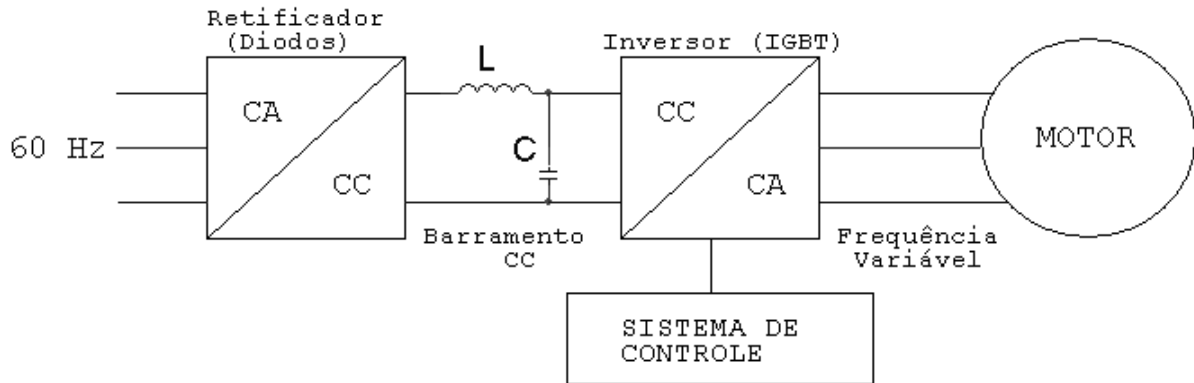


Figura 3-1 Configuração típica de um AVV

A alimentação trifásica alimenta o retificador a diodos. A tensão de saída do retificador é então suavizada pelo capacitor conectado no barramento CC. A indutância presente em alguns dispositivos objetiva a suavização da corrente no barramento CC, reduzindo a distorção harmônica de corrente obtida pela alimentação. A tensão CC é então invertida pelo controlador. O método mais comumente utilizado pelo inversor é o PWM (*Pulse Width Modulation*). Esse método proporciona o controle da magnitude e frequência da alimentação do motor através do controle da largura dos pulsos de tensão na saída do inversor.

Os VSDs podem tornar o processo bastante eficiente, proporcionando economia de energia. Quando há uma variação da velocidade, a potência empregada na saída é otimizada, afetando diretamente o consumo de energia e proporcionando um sistema “motor+inversor” com altos índices de eficiência (Guia Técnico WEG, 2011). A variação da velocidade está relacionada a redução da potência consumida pelos motores elétricos, conforme as equações (4) e (5) [TOS 11]:

$$P_{Entrada} = \frac{P_{Saída} * FC}{\eta_{Motor}} \quad (4)$$

$$P_{Entrada} = \frac{P_{Saída} * FC}{\eta_{Motor} * \eta_{Inversor}} * \left(\frac{N_{Inversor}}{N_{Motor}} \right)^3 \quad (5)$$

Onde:

FC=fator de carga

η =rendimento do motor ou inversor

N=velocidade do motor ou inversor

A equação (4) apresenta a potência de entrada do motor em caso de operação com a velocidade nominal do motor e a equação (5) apresenta a potência de entrada do motor em caso de operação com inversor de potência.

O uso dos inversores geralmente é uma opção economicamente atraente para aplicações em grandes ventiladores de fornos de queima, bombas e em outros motores elétricos onde o controle de velocidade de rotação ou de fluxo é feito pelo controle de *dampers* ou válvulas do processo. Além disso, o uso dos inversores elimina os afundamentos de tensão e os danos causados pelas altas correntes de partidas de motores, gerando economia em gastos com manutenção.

3.3.1.1. Problemas de QEE Associados aos AVV's

Na presença de um pequeno desequilíbrio de tensão, um retificador trifásico a diodos irá receber uma alta corrente desbalanceada.

Nos acionamentos a velocidade variável CA ou CC muitos desligamentos ocorrem devido a uma baixa tensão no barramento CC, gerada por variações da tensão da rede de alimentação. O desligamento ou má operação pode ser devido ao controlador ou inversor PWM não operar adequadamente quando essa tensão CC é muito baixa. O desligamento também pode ocorrer devido a proteção de subtensão conectada ao barramento CC que, na maioria dos casos, intervem desligando o equipamento antes que um mau funcionamento do mesmo ocorra (Bollen, 2000). Na presença de afundamentos de tensão na alimentação de inversores, também ocorrem aumento das correntes no barramento CC, principalmente durante a recuperação da tensão nominal de alimentação.

Estas correntes harmônicas circulando nas impedâncias da rede de alimentação provocam quedas de tensão harmônicas, distorcendo a tensão de alimentação do próprio inversor ou de outros consumidores. Como efeito destas distorções harmônicas de corrente e tensão podemos ter o aumento de perdas elétricas nas instalações com sobreaquecimento dos seus componentes (cabos, transformadores, bancos de capacitores, motores, etc.) bem como um baixo fator de potência.

Uma outra questão a ser considerada no caso de uso de inversores em projetos de eficiência energética é que o rendimento do motor de indução alimentado por esse equipamento diminui devido ao aumento nas perdas causado pelas correntes harmônicas no enrolamento do motor.

3.3.2. Motores Elétricos

Motores elétricos aplicados nas indústrias consomem entre 30% a 40% da energia elétrica produzida no mundo. Na União Européia sistemas tracionados por motores elétricos são as cargas mais importantes nas indústrias, utilizando aproximadamente 70% da energia consumida (Almeida, 2011).

A importância relativa dos cinco diferentes tipos de perdas em motores de indução dependem do tamanho do motor, como pode ser visto na Figura 3-2.

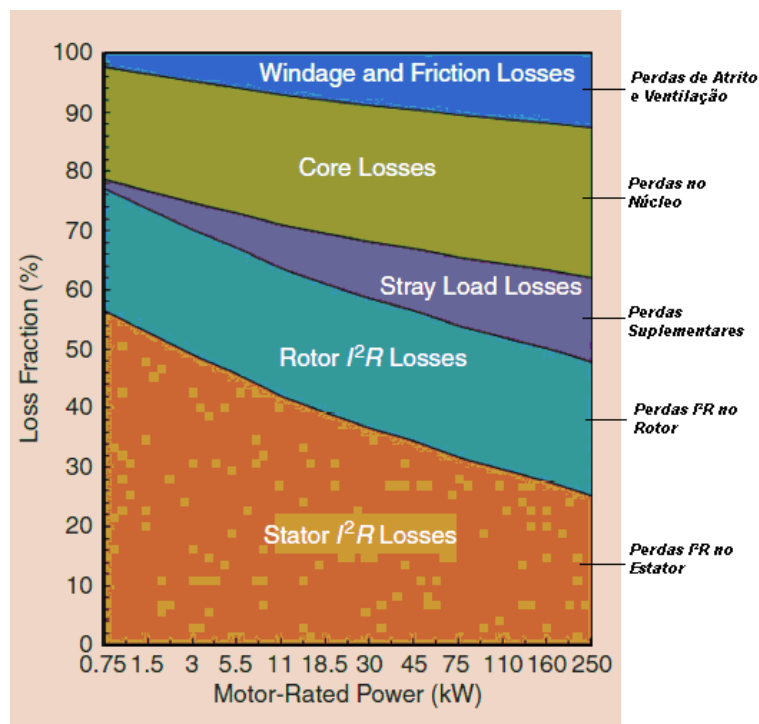


Figura 3-2 Fração de perdas típicas em um motor de 4 polos de 50Hz, adaptado de (Almeida, 2011)

Em pequenos e médios motores as perdas I^2R , ou seja, perdas por aquecimento, são dominantes.

A grande utilização dos motores faz com que os mesmos se tornem extremamente atrativos em aplicações de eficiência energética. Para promover uma transformação no mercado de motores elétricos foi aprovado em novembro de 2008 um novo padrão internacional, o IEC-60034-30 – *Efficiency Classes of Single-Speed, Three-Phase, Cage-Induction Motors* – estabelecendo classes de eficiência para motores.

Uma das linhas de ação de um projeto de eficiência energética é a utilização de motores mais eficientes. No Brasil, o Decreto 4.508, de 11 de dezembro de 2002, estabeleceu valores mínimos de rendimento para motores normais e de alto rendimento (Garcia, 2003). Entretanto, motores eficiência funcionando a baixa carga se tornam ineficientes, da mesma forma que os motores padronizados, além de provocarem um baixo fator de potência.

Motores normalmente são superdimensionados por razões de segurança e por questões de padronização de valores de potência. Isso faz com que motores geralmente trabalhem nas taxas de 50-75% da sua potência nominal. É essencial, portanto, que os fabricantes

mencionem os valores de eficiência dos motores trabalhando nessas taxas de carregamento (Slaets, 2011).

A Figura 3-3 apresenta motores de corrente alternada de três níveis de potência funcionando com diferentes carregamentos e o respectivo rendimento desses motores.

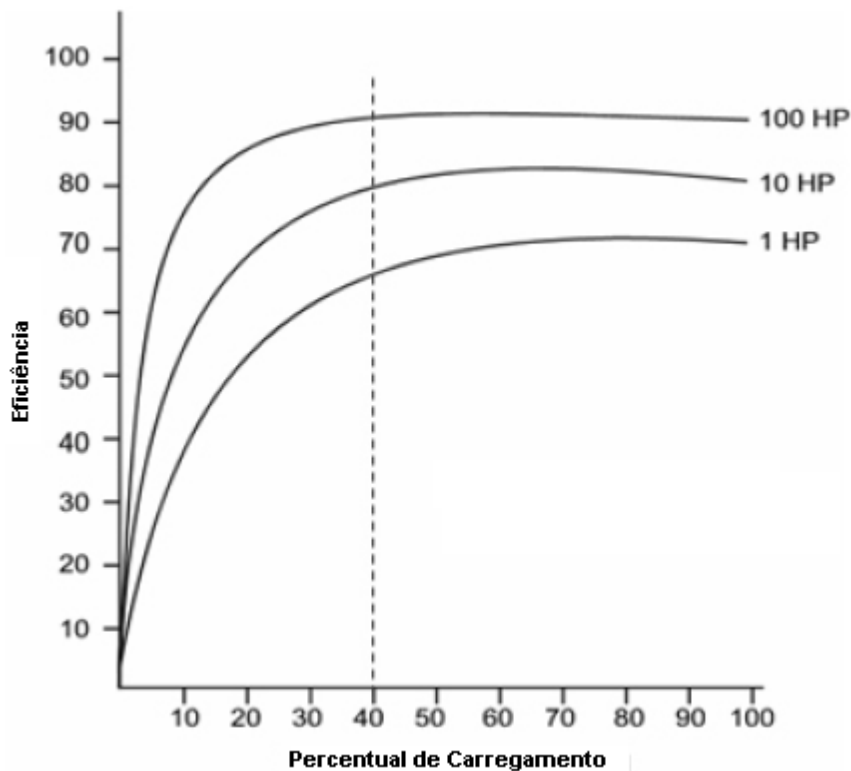


Figura 3-3 Curvas de eficiência para motores CA típicos, adaptado de (Power Efficiency Corporation, 2011)

Em geral, motores de indução em corrente alternada operam de forma mais eficiente com seu carregamento por volta de 75% da plena carga. A 50% da carga total, a eficiência do motor começa a reduzir e em cargas mais leves a partir desse valor, a eficiência reduz rapidamente. Muitos motores na indústria operam em cargas leves. De acordo com o departamento de Energia dos Estados Unidos, DOE, 44% dos motores nas indústrias operam a 40% ou menos da sua carga plena e, por isso, estão operando de forma ineficiente. Como uma regra geral, quanto maior é a potência do motor, mais plana é a curva de eficiência do mesmo e mais a carga precisa estar leve para que a máquina passe a operar de forma ineficiente (Power Efficiency Corporation, 2011).

3.3.2.1. Problemas de QEE Associados aos Motores

Os desequilíbrios de tensão são principalmente preocupantes para cargas trifásicas (Bollen, 2000). O desequilíbrio leva a uma produção de calor nos enrolamentos das máquinas de indução e síncronas. Isso reduz a eficiência da máquina, aumentando suas perdas, e leva também à necessidade de *derating* da máquina, ou seja, a redução da sua potência de trabalho abaixo da potência máxima da mesma.

Quando as tensões de linha aplicadas a um motor estão desbalanceadas ocorre a aparecimento de uma tensão de seqüência negativa nos enrolamentos do motor. A tensão de seqüência negativa tem um sentido de rotação contrário ao da tensão de seqüência positiva e, portanto, contrário ao movimento do motor. Essa condição provoca um fluxo de seqüência negativa em excesso àquele de um sistema em condições de tensão equilibradas. Nota-se dessa forma a produção excessiva de calor, o que reduz a vida do isolamento. Na fase com a maior corrente a porcentagem do aumento da temperatura é de aproximadamente duas vezes o quadrado da porcentagem do desequilíbrio de tensão, ou seja, se 3% de desequilíbrio de tensão está presente, a temperatura irá aumentar em, aproximadamente, 18%. Esse mesmo desequilíbrio pode causar vibração eletromecânica, levando a falhas nos rolamentos, e aumento do ruído audível, principalmente em motores de altas rotações.

A Figura 3-4 apresenta o aumento da temperatura em função do desequilíbrio de tensão em um motor de indução trifásico.

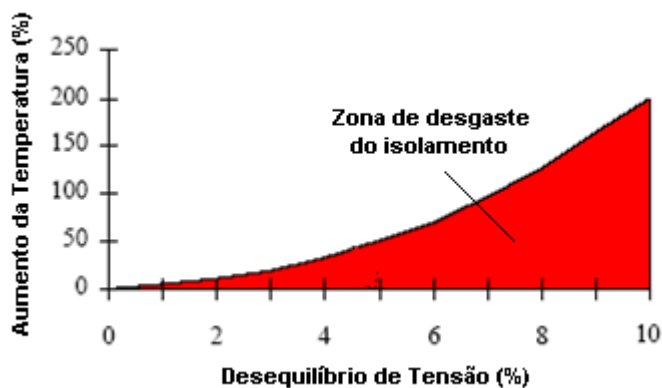


Figura 3-4 Sobreaquecimento do motor devido a um desequilíbrio de fase, adaptado de (Mehrdad, 2007)

O aumento da temperatura dos enrolamentos do motor é exponencialmente proporcional ao desequilíbrio de tensão entre as fases de motores trifásicos.

A Figura 3-5 apresenta a evolução do fator *derating* para valores crescentes de desequilíbrio de tensão.

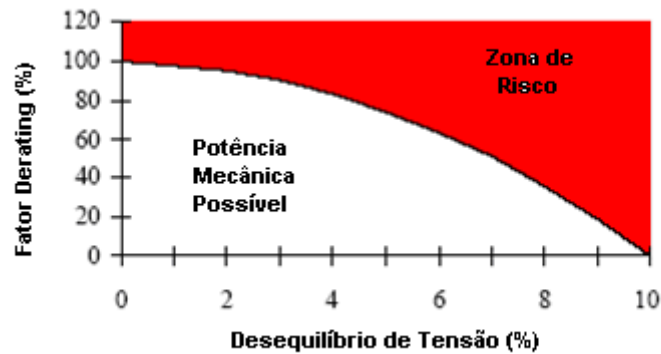


Figura 3-5 Fator *derating* da potência mecânica para tensões desequilibradas, adaptado de (Mehrddad, 2007)

O fator de *derating* decresce exponencialmente com o aumento do desequilíbrio de tensão entre as fases do motor trifásico.

Os motores de indução também são afetados pelas interharmônicas. Teoricamente, os efeitos esperados das interharmônicas são os mesmos esperados para as harmônicas, embora as magnitudes das interharmônicas sejam normalmente pequenas. Alfredo Testa (Eletricidade Moderna, 2008) menciona como efeitos das interharmônicas as flutuações de tensão, oscilações subsíncronas e redução da vida útil de motores de indução e de transformadores.

3.3.3. Bancos de Capacitores

Os capacitores são utilizados para controlar o fator de potência do sistema elétrico. O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente drenada da fonte de suprimento da energia pela carga, conforme apresentado na equação (6):

$$FP = \frac{kW}{kVA} = \cos \varphi = \cos \left(\text{ArcTAN} \frac{kVAr}{kW} \right) \quad (6)$$

O fator de potência de um equipamento ou de um sistema elétrico completo define o consumo de energia reativa daquele equipamento ou sistema. Com o uso de sistemas para compensação de fator de potência (PFC – *Power Factor Compensation – System*), a quantidade de potência reativa demandada da rede da concessionária será reduzida ou até mesmo eliminada. Como resultado disso, grandes economias podem ser alcançadas e o uso desses sistemas podem se tornar economicamente atrativos .

Os transformadores, as linhas de transmissão altamente carregadas, motores de indução e máquinas síncronas subexcitadas são cargas indutivas e agem como drenos para a potência reativa, promovendo o atraso da corrente em relação a tensão do sistema. Capacitores shunt, linhas de transmissão levemente carregadas e máquinas síncronas sobreexcitadas são cargas capacitivas e funcionam como fontes de potência reativa resultando em um aumento do fator de potência.

Em qualquer equipamento elétrico apenas a potência ativa é capaz de realizar trabalho, enquanto a potência reativa causa quedas de tensão adicionais e perdas de energia em forma de calor. Um baixo fator de potência leva a um aumento de perdas e aquecimento e reduz a capacidade de transmissão elétrica do sistema. Como resultado os custos são aumentados para o consumidor e para a concessionária, uma vez que a potência reativa sobrecarrega as linhas de transmissão. Por esse motivo as concessionárias estabelecem um limite inferior para o fator de potência a ser medido no ponto de acoplamento do sistema de distribuição/transmissão com a subestação do consumidor. Caso esse limite de fator de potência não seja respeitado, o consumidor é penalizado. A compensação do fator de potência pode ser diretamente transformador em economia ao se evitar a aplicação dessas penalidades (Ahrens, 2005):

- Multas a concessionária;
- Perdas extras em cabos e transformadores devido às altas correntes que circularão no sistema;
- Investimentos para aumento da capacidade de cabamentos e transformadores para suportar o fluxo de potência do sistema.

A Figura 3-6 apresenta o triângulo das potências. Os projetos de eficiência energética buscam quantificar a demanda de potência reativa no sistema para adequar o fator de potência, reduzindo perdas no sistema e penalidades pela concessionária de energia.

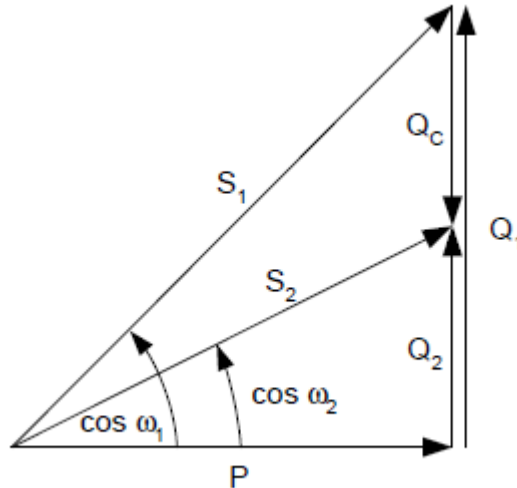


Figura 3-6 Potência ativa (P), potência reativa (Q1), potência aparente (S1) e fator de potência ($\cos\phi_1$); Ao adicionar o capacitor (Qc) o fator de potência melhora (de $\cos\phi_1$ para $\cos\phi_2$) (Ahrens, 2005)

Os bancos de capacitores são utilizados na indústria também com o objetivo de filtrarem as harmônicas do sistema. Maiores detalhes serão apresentados no Capítulo 4.

A solução mais aplicada e econômica para controlar o fator de potência adotado pela maioria dos engenheiros são os capacitores estáticos, que se aplicam a sistemas com cargas estáticas.

3.3.3.1. Problemas de QEE Associados aos Capacitores

Os capacitores para correção de fator de potência podem sobreaquecer devido às distorções harmônicas de tensão. Como a impedância do capacitor é inversamente proporcional à frequência da tensão aplicada, correntes harmônicas excessivas passam a circular pelo mesmo, aumentando a corrente RMS e conseqüentemente causando elevação nas temperaturas de operação dos equipamentos e fadiga nas isolações de cabos.

O capacitor pode também formar um circuito ressonante com os componentes indutivos do sistema, causando sobretensões e sobrecorrentes que podem levar a danos permanentes ao sistema, além de levar a explosão do banco de capacitor.

A ressonância série: é a condição na qual as reatâncias capacitiva e indutiva de um circuito RLC são iguais. Quando isso ocorre, as reatâncias se cancelam entre si e a impedância do circuito se torna igual à resistência, a qual é um valor muito pequeno. Ocorre 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.

A ressonância paralela: baseia-se na troca de energia entre um indutor e um capacitor ligados em paralelo com uma fonte de tensão. Na condição ressonância paralela a corrente de linha é nula porque a soma vetorial das correntes no circuito “tanque” é zero. A tensão e a impedância resultante assumem valores muito elevados.

A Figura 3-7 apresenta o esquema de ressonância em série e paralela de um banco de capacitor.

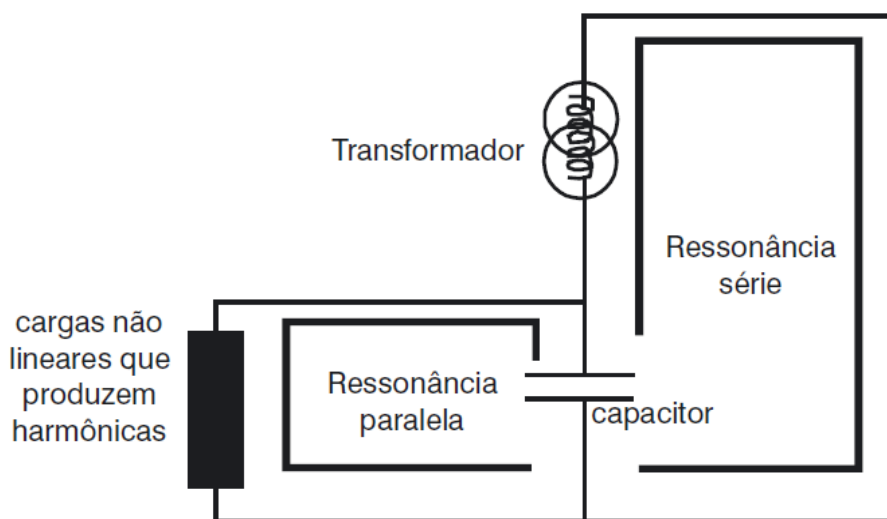


Figura 3-7 Representação da ressonância em série e paralela de uma banco de capacitor, adaptado de (Manual WEG, 2011)

Além dos problemas indicados acima, os bancos de capacitores com estágios (montantes de potência separados em grupos) mal dimensionados ao serem chaveados para o sistema provocam transitórios danosos aos equipamentos no sistema e aos próprios capacitores.

3.3.4. Iluminação

Apesar da iluminação, normalmente, não ser o foco de projetos de eficiência energética no setor industrial, ela é significativa e, por vezes, expressiva no consumo final de energia elétrica, principalmente em indústrias com linhas de produção baseadas em trabalhos manuais, que não podem ser substituídos por máquinas [SAL 10].

Hoje já se encontram disponíveis no mercado luminárias com conjunto óptico eficiente, apresentando melhor desempenho e altos índices de aproveitamento desse conjunto, lâmpadas com maior fluxo luminoso nominal, menor consumo de energia, incremento da vida útil, melhor índice de reprodução de cor e por fim reatores com alto fator de potência e baixo índice de distorção harmônica.

Projetos de eficiência energética devem dimensionar os sistemas de iluminação buscando atender às necessidades dos usuários e considerar as atividades desenvolvidas nos locais estudados, utilizando como direcionamentos técnicos (Costa, 2006):

- Norma Brasileira Regulamentadora NBR-5413 – Iluminância de Interiores;
- O fator de depreciação em função dos processos industriais desenvolvidos no local uma vez que este índice acarreta na queda do rendimento do sistema proposto, em virtude do acúmulo das partículas suspensas no ar se depositarem nas luminárias e nas lâmpadas;
- A altura de instalação das luminárias;
- A escolha da lâmpada, do reator e da luminária a ser utilizada, por exemplo a utilização de luminárias com refletores em alumínio e aletas para o controle de ofuscamento nas áreas administrativas;
- A utilização de reatores que operam em alta frequência evitando assim o efeito estroboscópico já que esse fenômeno consiste em visualizar objetos parados quando estes se encontram em movimento rotativo ou alternativo quando a frequência coincide com múltiplos da frequência da rede elétrica, evitando graves acidentes.

Projetos de eficiência energética em iluminação também contam com outros equipamentos de controle da iluminação, como o dimerizadores, os relés fotoelétricos, relés temporizados, sensores de presença, entre outros.

3.3.4.1. Problemas de QEE Associados a Iluminação

Nos ambientes industriais as lâmpadas mais utilizadas são as de descarga, tanto de baixa pressão (fluorescentes e sódio) quanto de alta pressão (mercúrio, sódio e vapor metálico). Em sistemas de iluminação eficientes, o principal distúrbio eletromagnético injetado na rede é a distorção harmônica causada pelos reatores eletrônicos que acionam as lâmpadas de descarga.

Os reatores eletrônicos fazem parte do sistema de iluminação tanto de lâmpadas de baixa pressão quanto das lâmpadas de alta pressão. Esse equipamento tem, basicamente, a função de fornecer a tensão inicial necessária para acender a lâmpada, limitar e regular a corrente durante sua operação para níveis adequados à operação do conjunto. O ignitor fornece a tensão impulsiva necessária para o acendimento da lâmpada, em algumas lâmpadas o reator fornece este impulso de tensão, dispensando o uso do ignitor.

Os reatores podem ser eletromagnéticos ou eletrônicos. Atualmente os reatores mais utilizados são os reatores eletrônicos. São mais compactos que os eletromagnéticos, mais leves, eliminam o efeito estroboscópico¹, aumentam a vida útil das lâmpadas, apresentam uma luz mais estável, possuem ausência de ruído audível, permitem dimerizar o fluxo luminoso nominal da lâmpada e consomem menos energia. Porém nos reatores eletrônicos de baixa qualidade (sem filtros), a distorção harmônica total (DHT) pode chegar a 25%, enquanto nos reatores eletromagnéticos convencionais está entre 12 e 20% [SAL 10]. Se a distorção harmônica total for significativa, equipamentos eletrônicos sensíveis localizados no sistema podem ser afetados, causando um mal funcionamento do sistema ou até mesmo danificando o mesmo.

Em projetos de eficiência energética, por muitas vezes, a qualidade dos sistemas especificados não são avaliados e a preocupação principal dos projetista se concentra nos dados de eficiência global dos conjunto luminária/lâmpada/reator. Opta-se, então, pela especificação de lâmpadas de descarga em larga escala, o que acarreta em altos valores de THD.

¹ Efeito de cintilação.

4. Eficiência Energética por Meio da Qualidade da Energia

4.1. Proposta do Trabalho

Pesquisas realizadas nos Estados Unidos (Eletrobrás/Procel, 2001), patrocinadas pelo *Electrotechnical Power Research Institute* (EPRI) identificaram três distúrbios da Qualidade da Energia que mais tem afetado os consumidores: Variações instantâneas de tensão (transitórios), as depressões de tensão e os harmônicos. Dentre os distúrbios citados acima aquele que tem maior importância em projetos de eficiência energética são os harmônicos, devido ao fato de que os principais equipamentos adotados em medidas de conservação da energia são responsáveis pela geração dos mesmos.

Entretanto um projeto de eficiência energética responsável do ponto de vista da qualidade da energia não deve apenas mitigar a inserção de harmônicos que os equipamentos especificados irão inserir no sistema elétrico da planta industrial, especificando corretamente os mesmos, mas também analisar a rede elétrica existente, entender quais são as fontes de distúrbios nesse sistema e buscar mitigar esses distúrbios.

Um projeto de Eficiência Energética deve, portanto, considerar quatro áreas de trabalho, que podem ser trabalhadas por uma mesma equipe ou equipes diferentes. A Figura 4-1 apresenta as áreas de abordagem sugeridas neste trabalho para um projeto de eficiência energética.

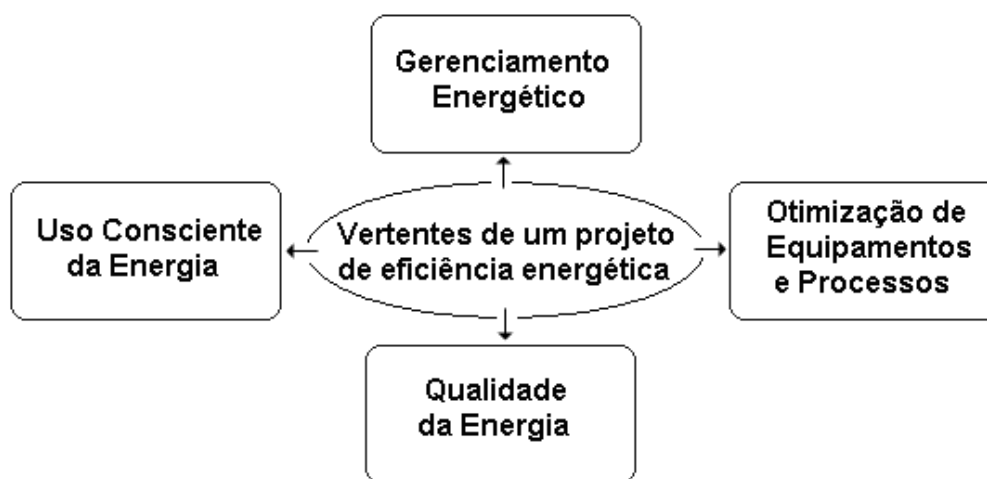


Figura 4-1 Áreas de abrangência propostas para um projeto de Eficiência Energética

Envolver análises da qualidade da energia em projetos de eficiência energética por meio da especificação criteriosa de equipamentos eficientes ou por especificação de dispositivos de condicionamento, buscando mitigar problemas de qualidade da energia, irá contribuir para o aumento da vida útil de equipamentos e, dessa forma, tornar as análises de viabilidade financeira de medidas de eficiência energética mais consistentes.

A seguir serão apresentadas as duas principais vertentes a serem consideradas em projetos de eficiência energética, com relação QEE, em indústrias já existentes: os principais requisitos de equipamentos de processo a serem especificados em projetos de eficiência energética e os filtros e compensadores utilizados para mitigar problemas de qualidade da energia já existentes no sistema.

4.2. Requisitos de Equipamentos

Em projetos de eficiência energética, deve-se avaliar a compatibilidade eletromagnética dos equipamentos especificados, tanto em seus aspectos de susceptibilidade quanto de emissividade, ou seja, os equipamentos não devem ser sensíveis nem inserirem distúrbios eletromagnéticos no ambiente. Os manuais dos fornecedores apresentam diversas informações relacionadas ao tema qualidade da energia e as normas que são atendidas pelo equipamento.

Não se pode esperar que equipamentos normais resistam a níveis de perturbação elevados em redes industriais especificadas para operar, por exemplo, sob classe 3 da norma IEC-61000-2-4. Se, por outro lado, somente equipamentos com imunidade suficientemente elevada forem conectados, uma rede poderá ser operada com, por exemplo, níveis de harmônicas significativamente acima de quaisquer valores de normas. Isso pode permitir que se economizem equipamentos de mitigação adicionais dispendiosos. Sabe-se que algumas redes industriais são operadas sem problemas com fortes distorções de forma de onda, bem acima de todas as limitações definidas pelas normas internacionais, devido a seleção completa e cuidadosa de equipamentos operacionais (Unger, 2011).

A seguir são apresentadas informações relacionadas às medidas de mitigação das causas e efeitos dos distúrbios de QE de alguns dos principais equipamentos utilizados em projetos de eficiência energética.

4.2.1. Acionamentos de Velocidade Variável

Devido às características do circuito de entrada, comum a maioria dos inversores no mercado, constituído de um retificador a diodos e um banco de capacitores de filtro, a sua corrente de entrada (drenada da rede) possui uma forma de onda não senoidal contendo harmônicas da frequência fundamental (Guia Técnico WEG, 2011). Conforme apresentado no item 3.3.1.1 essas harmônicas causam diversos problemas nos componentes do sistema elétrico.

As harmônicas da corrente de entrada são dependentes dos valores das impedâncias presentes no circuito de entrada/saída do retificador. A adição de uma reatância de rede e/ou indutor do barramento CC reduz o conteúdo harmônico da corrente proporcionando as seguintes vantagens:

- Aumento do fator de potência na entrada do inversor;
- Redução da corrente eficaz de entrada;
- Diminuição da distorção da tensão na rede de alimentação;
- Aumento da vida útil dos capacitores do barramento CC.

A reatância de rede e o indutor do barramento CC quando dimensionados corretamente tem praticamente a mesma eficácia para redução das correntes harmônicas. O indutor no barramento CC tem a vantagem de não introduzir queda de tensão, enquanto a reatância de rede é mais eficaz na redução dos transientes de sobretensão que possam surgir na rede de alimentação. O indutor do barramento CC equivalente a indutância de rede é calculado conforme a equação (7):

$$L_{CC-Equivalente} = L_{CA} * \sqrt{3} \quad (7)$$

Alguns modelos de inversores já possuem indutor no barramento CC embutido. Nesses modelos não se faz necessário ter impedância de linha mínima ou adicionar indutores de linha externos para proteção dos mesmos.

Quando a impedância de rede não for suficiente para limitar os picos de corrente na entrada, a reatância de rede ou bobina CC deverá ser adicionada, evitando danos ao inversor. O projetista deverá atentar para contabilizar essa queda. Os valores mínimos de impedância exigidos, expressos em queda percentual variam entre os modelos de inversores e não são necessários quando já existe indutor no barramento CC (Guia Técnico WEG, 2011). Para o cálculo do valor da reatância de rede necessária para obter a queda de tensão percentual desejada utiliza-se a equação (8):

$$L = \frac{\text{Queda}[\%] \times \text{TensãoRede}[V]}{\sqrt{3} \times 2\pi \times \text{FreqRede} \times I_{\text{Nominal}} \times 100} \quad (8)$$

Em algumas aplicações com motores distantes dos inversores, a utilização de uma reatância trifásica de carga, com queda de aproximadamente 2 %, adiciona uma indutância na saída do inversor para o motor. Isto diminuirá a taxa de variação da tensão dos pulsos gerados na saída do inversor, e com isto os picos de sobretensão no motor e a corrente de fuga que irão aparecer com distâncias grandes entre o inversor e o motor (em função do efeito “linha de transmissão”) serão praticamente eliminados. Há muitos fatores que influenciam o nível dos picos e tempo de subida dos pulsos de tensão como tipo e comprimento do cabo, potência do motor, frequência de chaveamento e entre outras variáveis.

4.2.2. Motores Elétricos

Com relação aos motores elétricos, os projetos de eficiência energética devem atentar para que a substituição de motores superdimensionados, uma das medidas mais comuns nesses projetos, pois cerca de 35% dos motores operam com carregamento abaixo de 60%, seja feita por motores de alto rendimento. Existem no mercado diversos motores de alto rendimento já em conformidade com a nova lei de eficiência energética (Garcia, 2003). Alguns fabricantes até mesmo já superam as exigências mínimas de rendimento para esses motores. Dessa forma,

garante-se que o motor irá operar dentro da faixa de potência apropriada para um melhor rendimento e, conseqüentemente, melhor fator de potência para o sistema elétrico.

Os projetistas devem se atentar também para os desequilíbrios de fase existentes nessa rede elétrica, uma das principais causas de redução de vida útil para os motores trifásicos.

4.2.3. Bancos de Capacitores

Em projetos de eficiência energética em instalações existentes, devem ser realizadas medições² de tensão e corrente da instalação, além de verificados os parâmetros elétricos de vários equipamentos. Se a potência das cargas não lineares não ultrapassar 20% da carga total da fábrica, pode-se corrigir o fator de potência somente com capacitores, pois é pouca a possibilidade de haver problemas com harmônicas na instalação elétrica. Se o total de cargas não lineares ultrapassar 20% da carga total instalada deverá ser efetuada uma medição detalhada dos níveis de harmônicas. Detectando-se a existência de harmônicas na instalação elétrica deve-se obedecer ao seguinte critério:

- Limite de distorção harmônica individual de tensão deverá ser menor ou igual à 3%;
- Limite de distorção total de harmônicas de tensão (THD) deverá ser menor ou igual à 5%.

Ultrapassando estes limites deverão ser instalados indutores de proteção anti-harmônicas nos capacitores ou filtros para as harmônicas significativas, conforme IEEE Std. 519 (IEEE 519, 1992).

A tarefa de corrigir o fator de potência em uma rede elétrica com harmônicas é mais complexa, pois as harmônicas podem interagir com os capacitores causando fenômenos de ressonância. Quando há distorção harmônica na instalação elétrica, o triângulo de potências, apresentado na Figura 3-6, sofre uma alteração, recebendo uma terceira dimensão provocada

² Os instrumentos convencionais, tipo bancada ou tipo alicate, são projetados para medir formas de onda senoidal pura, ou seja, sem nenhuma distorção. Porém, atualmente, são poucas as instalações que não têm distorção significativa na senóide de 50/60 Hz. Nestes casos os instrumentos de medidas devem indicar o valor RMS verdadeiro (conhecidos como TRUE RMS), identificado no próprio instrumento.

pela potência aparente necessária para sustentar a distorção da frequência fundamental (50/60 Hz), conforme Figura 4-2.

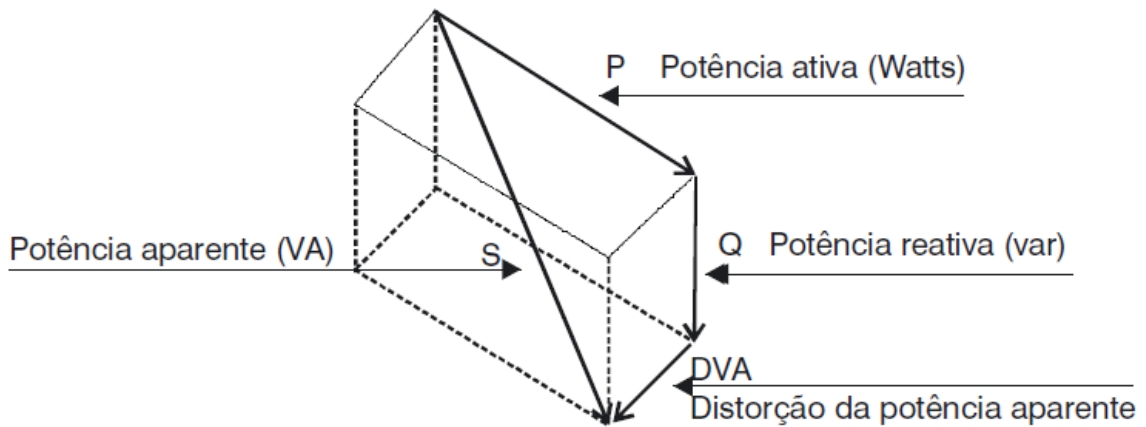


Figura 4-2 Representação do fator de potência real, adaptado de(Manual WEG, 2011)

O cálculo do fator de potência real é apresentado na equação (9).

$$FP = FP_{Distorção} * FP_{Deslocamento} \quad (9)$$

Sendo que o Fator de Deslocamento ($F_{Deslocamento}$) é o fator de potência relativa a onda fundamental. O Fator de Distorção é calculado conforme apresentado equação (10):

$$FP_{Distorção} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (10)$$

Quando se tem harmônicas presentes na rede elétrica acima dos valores pré-estabelecidos anteriormente, corre-se o risco que ocorra ressonância série entre o transformador e o capacitor ou banco de capacitores ou ressonância paralela entre os mesmos e as cargas (motores, etc.). Nesta situação, usam-se indutores anti-harmônicas em série com os capacitores, os quais evitam a ressonância do(s) capacitor(es) com todo o espectro de harmônicas que possa ser gerado. O fenômeno da ressonância série ou paralela também pode ocorrer em instalações livre de harmônicas e com fator de potência unitário (Manual WEG, 2011).

A frequência de ressonância do sistema sob análise é calculada pela equação (11):

$$f_r = f_0 * \sqrt{\frac{S_{trafo}}{Z * Q_c}} \quad (11)$$

Onde:

f_r = frequência de ressonância

f_0 = frequência da fundamental (50/60 Hz)

S_{trafo} = potência aparente do transformador (kVA)

Z = impedância do transformador (Ω)

Q_c = potência reativa de cada estágio mais o banco fixo (kVAr)

Os indutores anti-harmônicas protegem os capacitores contra harmônicas e correntes de surto, porém as harmônicas permanecem na rede elétrica. Quando se utilizam indutores anti-harmônicas, dispensa-se o uso de indutores anti-surto (Manual WEG, 2011).

Além dos cuidados apresentados acima, recomenda-se que o projetista divida adequadamente a capacitância do banco em estágios conforme orientação do fabricante. A recomendação de valor máximo para os estágios pelos fabricantes não é aleatória, está baseada em aspectos práticos de aplicação e permite que se mantenha as correntes de surto, provocadas pelo chaveamento de bancos (ou módulos) em paralelo, em níveis aceitáveis para os componentes. Estas correntes podem atingir patamares superiores a 100 vezes a corrente nominal dos capacitores, decorrendo daí, todo o tipo de dano que possa ser provocado por altas correntes em um circuito qualquer (atuação de fusível, queima de contatos dos contadores, queima dos resistores de pré-carga, além da expansão da caneca do capacitor, com conseqüente perda deste) (Manual WEG, 2011).

4.2.4. Iluminação

Os projetos de eficiência energética em sistemas de iluminação, apesar de não serem o principal foco na maior parte das indústrias de médio e grande porte, representam bons potenciais de economia de energia.

Os procedimentos normalmente realizados nesse tipo de projeto é a substituição das lâmpadas existentes por lâmpadas mais eficientes disponíveis no mercado. Essa substituição deve sempre ser embasada em estudos luminotécnicos para que os níveis de iluminância mínimos requeridos por norma sejam atendidos.

Os projetistas devem também fazer a escolha das tecnologias mais adequadas a serem utilizadas em cada aplicação. Tanto os reatores das lâmpadas de vapor de sódio (que são atualmente as lâmpadas de descarga mais eficientes) quanto os LEDs e os reatores das lâmpadas fluorescentes de alto rendimento injetam harmônicas de corrente na rede elétrica, devido a sua característica não-linear. Entretanto, um reator eletrônico de boa qualidade, com filtros, pode apresentar uma DHT inferior a 5% e fator de potência de conjunto (lâmpada + reator) 0,95 capacitivo (Alvarez, 1998).

Cabe, portanto, aos projetistas a especificação da lâmpada com a melhor relação eficiência x qualidade da energia.

4.3. Dispositivos de Condicionamento

Neste item são apresentadas brevemente as diversas soluções para minimizar os danos causados em um sistema com má qualidade da energia elétrica. Conforme apresentado no item 4.1, envolver análises da qualidade da energia em projetos de eficiência energética por meio da especificação de dispositivos de condicionamento irá contribuir para um aumento da vida útil dos equipamentos existentes e aqueles especificados pelo projeto e, dessa forma, tornar as análises de viabilidade financeira mais consistentes.

Existem algumas medidas que buscam melhorar a qualidade da energia elétrica em instalações de médio e grande porte. Soluções gerais para evitar ou resolver todos os problemas de qualidade da energia dificilmente são possíveis. Ao contrário, quase toda situação requer uma solução específica, que depende de (Unger, 2011):

- Estrutura de fornecimento e da instalação da planta;
- Sensibilidade das cargas; e
- Fonte de perturbação.

Há ainda muitos outros fatores a se considerar como: espaço disponível, fluxos de energia reativa etc. A variedade dos casos possíveis é grande, conseqüentemente qualquer solução ideal com respeito à tecnologia e custos precisa considerar os casos individualmente. É necessário ressaltar que soluções ideais raramente podem ser implementadas.

Considerar os possíveis problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica durante a fase de planejamento ou ampliação de uma planta torna a implementação posterior de equipamentos para a mitigação mais fácil e mais barata (Unger, 2011).

A seguir serão apresentadas as principais tecnologias utilizadas na indústria atualmente visando a mitigação ou eliminação dos problemas de qualidade da energia.

4.3.1. Filtros Passivos

Os filtros passivos ainda constituem uma medida padrão para limitar a distorção harmônica de tensão, pois são mais baratos e robustos que as suas alternativas. Estão disponíveis em todos os tamanhos e níveis de tensão. O termo passivo se refere ao fato de esses circuitos utilizarem apenas componentes resistivos, capacitivos e indutivos, e não requererem alimentação para produzir o resultado desejado. Os filtros passivos podem ser passa baixa frequência, passa alta frequência, passa faixa e rejeita faixa, dependendo da disposição dos elementos passivos no circuito do filtro.

Filtros passivos tem sido amplamente utilizados na indústria para absorver correntes harmônicas de cargas não lineares devido ao seu baixa custo e alta eficiência. Entretanto, os filtros passivos possuem alguns inconvenientes como a alta dependência da impedância do sistema, peso, suscetibilidade para ressonâncias e variação das suas características com o tempo (Chen, 2002). As figuras Figura 4-3 e Figura 4-4 apresentam os filtros passivos passa alta e passa faixa, respectivamente.

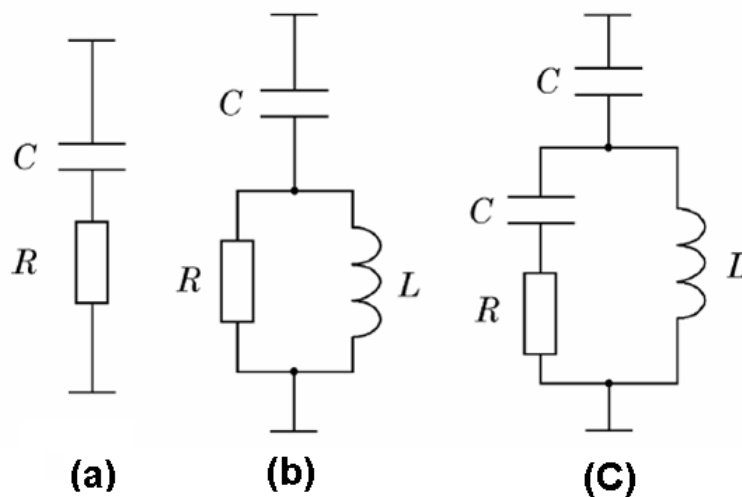


Figura 4-3 Filtros passivos passa alta, adaptado de (Akagi, 2005)

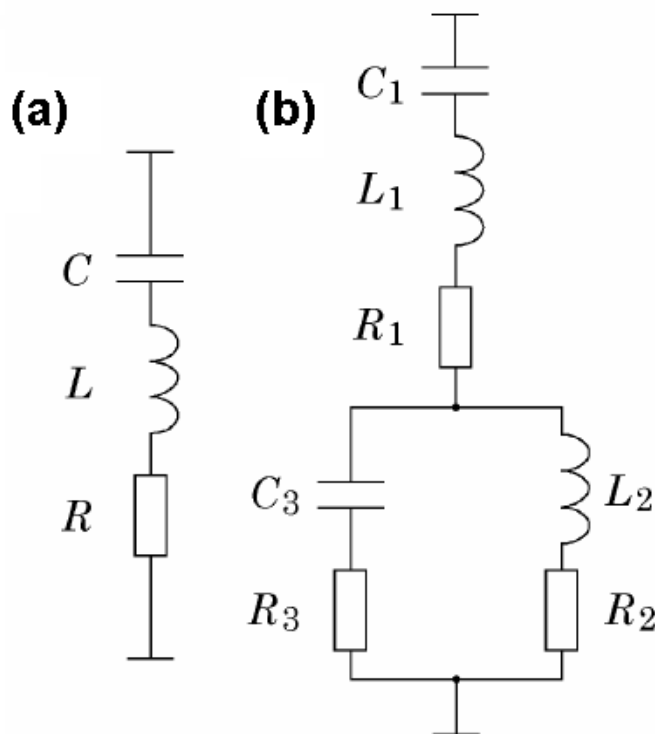


Figura 4-4 Filtros passivos passa faixa, adaptado de (Akagi, 2005)

4.3.2. Filtros Ativos

Os filtros ativos permitem maior variedade de aplicações do que os filtros passivos, para mitigação de afundamentos de tensão, harmônicas ou desequilíbrios combinados – com a possibilidade, por exemplo, da realização de correção dinâmica do fator de potência. Os filtros ativos representam solução útil e flexível para diversos problemas, especialmente no

caso de requisitos que não podem ser atendidos por filtros passivos, como funções dinâmicas de compensação de afundamentos de tensão (Unger, 2011). Atualmente são utilizados na indústria para casos especiais onde o condicionamento dinâmico de energia é essencial ao processo.

Embora seja uma tecnologia bastante consolidada, o uso de filtros ativos para melhoria da qualidade da energia é muito restrito. Uma razão fundamental é seu custo relativamente elevado. Aliem-se ainda as falhas de regulamentação da qualidade de energia (especialmente no Brasil) que tolera distorções relativamente elevadas de corrente, exatamente com o argumento da dificuldade de sua compensação.

Existem diferentes maneiras de sintetizar correntes ou tensões, com forma, frequência e amplitudes arbitrárias, de maneira a ser possível a utilização de topologias inversores (conversores CC-CA) no condicionamento da energia elétrica. Tais circuitos podem operar como filtros ativos, para os quais se deve produzir uma forma de corrente que compense as distorções presentes na rede.

A Figura 4-5 mostra estruturas de inversores trifásicos que podem sintetizar diferentes formas de corrente em seus terminais.

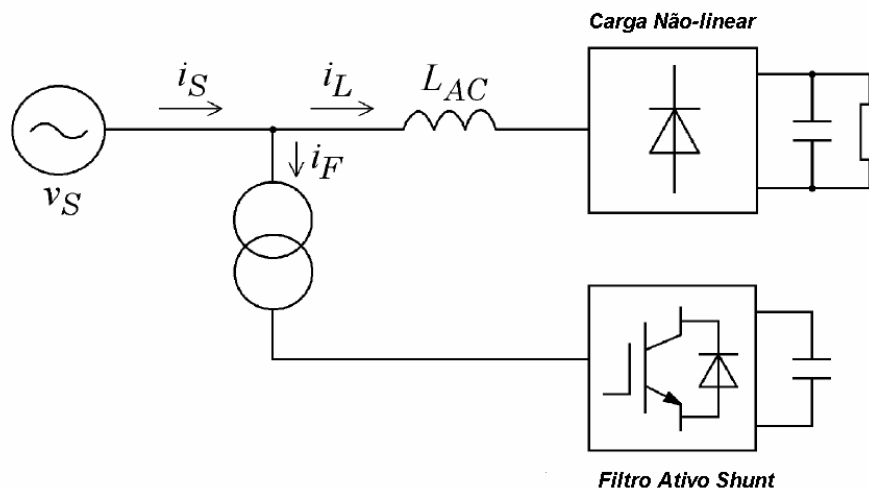


Figura 4-5 Filtro ativo sintetizador de corrente, adaptado de (Akagi, 2005)

Em geral o filtro ativo conectado em paralelo (shunt) é utilizado para otimizar o fluxo de corrente da rede. Os problemas causados pelas cargas e que podem ser solucionados pelo

filtro ativo em paralelo são as correntes harmônicas, compensação de potência reativa (baixo fator de potência) e ativa, desequilíbrio de corrente, e variações de carga de baixa frequência (*flicker*).

Como mitigador de harmônicas, o filtro ativo mede a corrente e a separa em fundamental e componentes harmônicas. Injeta, então, as correntes necessárias para mitigar ou eliminar as componentes de corrente indesejadas. Mais do que eliminar uma faixa de frequências, o algoritmo de controle do filtro elimina as componentes discretas das harmônicas, como a 5ª ou 7ª, por exemplo (Povh, 1997). A compensação de reativos pode ocorrer tanto para potências reativas indutivas ou capacitivas. O filtro ativo conectado em modo shunt pode também injetar na rede tanto correntes de seqüência positiva quanto negativa, tornando possível a eliminação de correntes de seqüência negativa associadas com cargas desbalanceadas e proporcionando o equilíbrio dinâmico de cargas. O dispositivo também armazena energia, por meio de capacitor no barramento CC do conversor, permitindo a transferência de energia para o sistema. O dispositivo também promove um equilíbrio das correntes de linha do sistema proporcionando uma rápida compensação de reativos no caso de flicker no sistema.

A conexão do filtro ativo em série diretamente no caminho no fluxo de potência via um transformador é realizada para compensar distorções de tensão originadas no sistema elétrico e para proteger cargas sensíveis contra afundamentos e elevações de tensão. Nesta configuração o fluxo de potência total da carga é transferido por meio do transformador de acoplamento, conforme apresentado na Figura 4-6.

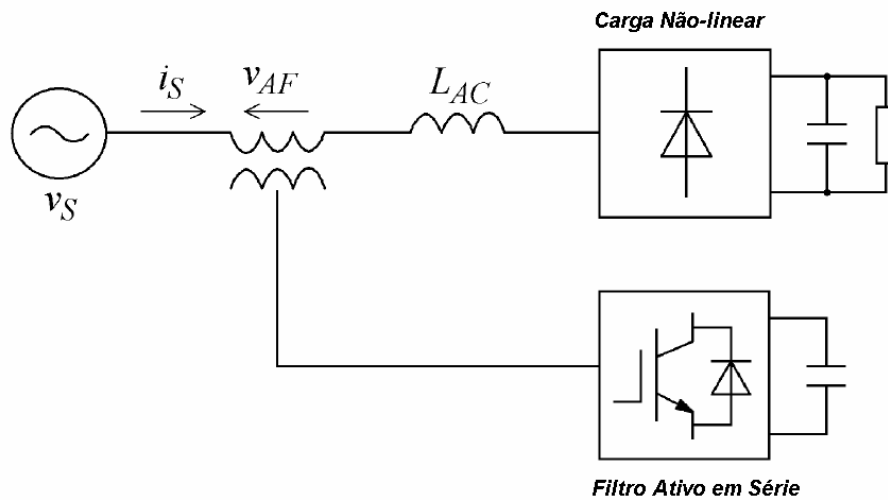


Figura 4-6 Filtro ativo sintetizador de tensão, adaptado de (Akagi, 2005)

O filtro ativo conectado em série injeta no sistema uma tensão tal que a carga possa receber tensão de ótima qualidade, tanto em condições permanentes quanto transitórias, compensando dinamicamente os afundamentos e elevações de tensão da rede. A redução das distorções de tensão da rede é feita pela injeção de tensão harmônicas em série com o sistema, a semelhança da injeção de correntes harmônicas de um filtro ativo conectado em série (Povh, 1997).

Diversas pesquisas na área de qualidade da indicam aplicações prática para filtros híbridos, compostos de componentes ativos e passivos, porém ainda sem adesão na indústria. O propósito do filtro híbrido é reduzir a capacidade nominal de operação do filtro ativo, fazendo com que a função do filtro ativo seja isolar as correntes harmônicas da carga e não compensá-las. A compensação é feita pelos elementos passivos (Akagi, 2005).

4.3.3. Restaurador Dinâmico de Tensão (RDT)

Enquanto os filtros ativos têm como foco a proteção do sistema elétrico às correntes harmônicas ofensivas, os restauradores dinâmicos de tensão são filtros ativos dedicados à proteção de cargas sensíveis contra desligamentos inoportunos e falhas de operação. Os Restauradores Dinâmicos de Tensão também são capazes de injetar formas de onda complexas para compensar transitórios de chaveamentos e outros distúrbios presentes na tensão de alimentação (Silva, 2002).

Os RTDs consistem de um inversor, geralmente baseado em tecnologia IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), conectado em série com o sistema de energia elétrica através de um transformador. Durante a ocorrência de um distúrbio nas tensões de alimentação da carga protegida, o restaurador injeta, em tempo real, tensões de compensação, de modo a oferecer à carga uma energia livre de distúrbios. Os RTDs são uma opção aos sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*) e apresentam algumas vantagens em relação aos mesmos, como potência reduzida, normalmente igual a uma fração da potência da carga protegida e ausência de banco de baterias para armazenamento de energia. Essas duas características estão associadas ao fato de o restaurador aproveitar as tensões sob distúrbios, injetando apenas o necessário para a compensação do distúrbio.

5. Conclusão

5.1. Conclusões Finais

Este estudo aponta a relevância de análise de distúrbios de QEE em projetos de eficiência energética visto que esses distúrbios são responsáveis por parte do prejuízo anual de uma indústria, principalmente daquelas que possuem cargas sensíveis. Também constitui prejuízo para as indústrias a redução de vida útil de equipamentos devido a má QEE.

5.2. Contribuições Apresentadas

Análise dos equipamentos normalmente utilizados em projeto de eficiência energética em consumidores industriais permite a execução de estudos de viabilidade econômica mais próximos da realidade, uma vez que sabe-se da existência de fatores de degradação da vida útil de equipamentos e aumento de consumo de energia gerado por uma má qualidade da energia.

A concepção de projeto de sistemas industriais eficientes, através da especificação e aquisição de equipamentos eletro-eletrônicos, deixa os equipamentos do sistema não apenas menos vulneráveis aos problemas de qualidades de energia como também menos nocivos a qualidade do sistema elétrico e, conseqüentemente, diminuindo os prejuízos associados aos distúrbios de qualidade da energia.

5.3. Propostas para Trabalhos Futuros

Com o intuito de aprofundamento no estudo das conseqüências dos distúrbios de QEE, a seguir estão relacionadas algumas sugestões de desenvolvimento posterior deste trabalho:

- Análise detalhada das medidas preventivas e corretivas para minimização dos transtornos e prejuízos associados aos problemas de qualidade da energia não associados diretamente a medidas de eficiência energética;

- Proposta de requisitos de projeto que visa o conceito de topologia do sistema elétrico buscando a otimização da qualidade da energia elétrica;
- Levantamento de custos de um projeto eficiente e com alta qualidade da energia elétrica;
- Análise da aplicação das *smart grids* para otimização e gerenciamento do uso e condicionamento da energia elétrica.

A sofisticação dos equipamentos e das técnicas de medição continuam a revelar novas informações sobre distúrbios da qualidade ainda não totalmente dominados ou mesmo desconhecidos, o que prova o constante surgimento de novos assuntos a serem explorados no âmbito da Qualidade da Energia.

Referências Bibliográficas

AHRENS, Markus, KONSTANTINOVIC, Zarko. Harmonic Filters and Power Factor Compensation for Cement Plants. ABB Switzerland. IEEE. 2005.

AKAGI, Hirofumi. *Active Harmonic Filters*. Invited Paper, Proceedings of the IEEE, vol. 93, Nº 12, dez. 2005.

ALMEIDA, Aníbal T., FERREIRA, Fernando J. T. E., FONG, João A. C. *Standards for Efficiency of Electric Motors. Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE Industry Applications Magazine*, p. 12-19, jan-fev. 2011

ALVAREZ, A. L. M. Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para a determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino e similares. 1998. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BOLLEN, Math H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press. Nova Iorque. Estados Unidos da América. 2000.

CARVALHO FILHO, José Maria de. Uma Contribuição à Avaliação do atendimento a consumidores com cargas sensíveis - Proposta de novos indicadores. 2000. Tese de Doutorado, Escola Federal de Itajubá, Itajubá.

CHEN, Z., et al. *A Study of Parallel Operations of Active and Passive Filters*. Institute of Energy Technology, 2002. Dinamarca

COSTA, Janaína Gomes da. Avaliação do Impacto Econômico do Afundamento de Tensão na Indústria. 2003. 149f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

COSTA, G. J. C. Iluminação Econômica – Cálculo e avaliação. 4ª ed., Porto Alegre, 2006.

ELETROBRÁS/PROCEL. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos. Editora EFEI, 3ª ed., caps. 3, 10, 11, 12, p. 94-467, 2001.

ELETROBRÁS/PROCEL. Eficiência Energética: Teoria e Prática. 1ª ed., cap. 1, p. 1-6, Itajubá, 2007.

ELETRICIDADE MODERNA. Dois Olhares sobre Harmônicas, Interharmônicas e sua Medição e Análise. Revista Eletricidade Moderna, p. 212-220, out. 2008.

IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Abr. 1993. 519-1992.

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. Jun. 1995. 1159-1995.

GARCIA, Agenor Gomes Pinto. Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria. 2003. 127f. Tese (Pós graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEHRDAD, Dr. Mike, HAGER, Mr. H.O. *Energy Efficiency through Power Quality*. Conferência ICUE (*Industrial And Commerical Use Of Energy*), África do Sul, 2007.

Operador Nacional do Sistema. Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes. Disponível na "<http://www.ons.org.br>". Acesso em 20/08/2011.

POVH, D., et al. *Improvement of Supply Quality in Distribution System*. CIRED 97, 2-5 June 1997. Alemanha.

Incorporating Intelligent Energy Savings in a Soft Start. Power Efficiency Corporation. Disponível na www.powerefficiency.com. Acesso em 01/12/2011.

SALOMÃO, Thais Mazziotti. Eficiência Energética: Projetos Luminotécnicos em Plantas Industriais. 2010. 157f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

SLAETS, B., et al. *Energy Efficiency of Induction Machines*. Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, 2011 .

SILVA, Sidelmo Magalhães, CARDOSO FILHO, Braz J., SILVA, Selênio Rocha, RIBEIRO, Tatiana Nesralla. Análise e implantação de um restaurador dinâmico de tensão. *Revista Eletricidade Moderna*, p. 170-180, fev. 2002.

UNGER, Chritian. Redução de perturbações de tensão em instalações industriais. *Revista Eletricidade Moderna*, p. 40-47, mai. 2011.

Manual para Correção do Fator de Potência. Disponível na "<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>". Acesso em 20/08/2011.

Technical guide: Induction motors fed by PWM frequency inverters. Disponível na "<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-induction-motors-fed-by-pwm-frequency-converters-technical-guide-028-technical-article-english.pdf>". Acesso em 20/06/2011.