



## **PROJETO DE FILTROS PASSIVOS APLICADO EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS**

**Worlen Ferreira Gimack**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

Belém

Maio de 2019

# **PROJETO DE FILTROS PASSIVOS APLICADO EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS**

Worlen Ferreira Gimack

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS–MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinado por:

---

Prof. Jandecy Cabral Leite.  
(FEQ/UFPA-Orientador)

---

Prof. Manoel Henrique Reis Nascimento, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA - Membro)

---

Prof. Jorge de Almeida Brito Junior, Dr.  
(ITEGAM - Membro)

BELÉM, PA–BRASIL

Maio de 2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Bibliotecado ITEC/UEPA-Belém-PA**

---

G491 Gimack, Worlen Ferreira, 1981-  
Projeto de filtros passivos aplicado em  
instalações industriais / Worlen Ferreira Gimack.  
- 2019.

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós- Graduação em Engenharia de Processos,  
Belém, 2019.

1.Sistemas de energia elétrica-Controlle  
de qualidade. 2.Energia elétrica-Distribuição.  
3.Harmônicos (Ondas elétricas). 4.Filtros  
elétricos passivos. I.Título.

---

CDD 23. ed.– 62 1 . 3 1 9 1  
Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461

*Many of the truths that we cling to depend on our point of view.  
May the Force be with you!"*

*– Jedi Master Yoda –*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha incrível mãe que amo tanto, Ofélia Ferreira Gimack, heroína que me deu todo apoio durante a estadia na universidade e a buscar mais conhecimentos durante a pós-graduação, com incentivo nas horas difíceis, desânimo e cansaço.

Ao meu pai Lauro Barbosa Gimack, que tenho maior respeito e dignidade, vem me apoiando durante todo processo.

A minha namorada, Ana Cristina Souza pereira, obrigada pela paciência, pelo incentivo, pela força e principalmente pelo carinho. Apoio necessário para continuar crescendo. Eu amo você.

Agradeço a todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação nesse processo de formação, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por expandir meus conhecimentos. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

A Universidade Federal do Pará (UFPA), junto com o Instituto de Tecnologia Galileo da Amazônia (ITEGAM), pelo curso de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Processos (PPGEP) que fora me ofertado. A todos que colaboram direto e indiretamente destas instituições fazem parte do meu grande carinho por vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite, pelo suporte, orientações, correções e incentivos que ao longo da jornada esteve presente. Sua ajuda me ergueu para enfim concluirmos mais uma etapa. Muito Obrigado.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGE/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M.Eng.)

## **PROJETO DE FILTROS PASSIVOS APLICADO EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS**

**Worlen Ferreira Gimack**

Maio/2019

Orientador: Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Por uma necessidade da busca uma nova forma e melhoria em qualidade de energia elétrica, podemos citar o melhor desempenho de instalações de filtros capacitivos, afim de retirar do sistema elétrico as harmônicas, transientes, distorções entre outros, com isto evitando a queima de equipamentos, maquinas, lâmpadas.

Este sistema além de proteger sistema, provem de economia de energia devido o sistema RLC, em paralelo atuando em conjunto, retirando todos males da rede elétrica e desviando para o aterramento.

Palavras-chave: *filtro capacitivo- harmônica, transientes, distorções, RLC.*

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M.Eng.)

## **PROJECT OF PASSIVE FILTERS APPLIED IN INDUSTRIAL FACILITIES**

**Worlen Ferreira Gimack**

*Maio/2019*

Orientador: Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite

*Research Area: Process Engineering*

Due to a need to search for a new form and improvement in electric power quality, we can cite the best performance of capacitive filter installations, in order to remove from the electrical system the harmonics, transients, distortions among others, thus avoiding the burning of equipment, machines, lamps. This system in addition to protect system, provide energy saving due to the RLC system, in parallel acting together, removing all evils from the power grid and diverting to ground.

Key words: capacitive-harmonic filter, transients, distortions, RLC.

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO I

### Introdução

1.1. Introdução .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
1.2. A Dissertação em Etapas .....	2
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivos geral.....	2
1.3.2 Objetivos específico.....	2
1.4. Contribuição e Relevância do Tema .....	3
1.5. Delimitação.....	3
1.6. Estrutura dos capítulos.....	4

## CAPÍTULO II

### Aspecto gerais relacionados à análises harmônicas

2.1. Formas de ondas distorcidas .....	5
2.2. Harmônicos e qualidade de energia .....	7
2.3. Harmônica e componente de seguência.....	8
2.4. Impedância de seguência e componentes do sistema de potência .....	11
2.5. Índice de Harmônico .....	11
2.5.1. Fator Harmônico .....	11
2.5.2. Fator de fluência telefônica .....	13
2.6. Fator de potência, Fator de distorção e fator total de potência.....	14
2.7. Amplificação e atenuação de Harmônica .....	17
2.8. Novas técnicas de conversão de energia.....	18
2.9. Análise e medições Harmônicas em sistemas de energia .....	18
2.9.1. Harmônicas em Sistemas de Energia.....	18
2.9.2. Cargas Lineares e Não-Lineares .....	19
2.10. Aumento em cargas não lineares .....	20
2.10.1 Efeito Harmônico.....	22
2.11. Máquinas rotativas .....	23
2.11.1 Efeito de indução .....	23

2.11.2 Redução de torque .....	25
2.11.3 Campos Pulsantes e Estresses Dinâmicos .....	26
2.11.4 Efeito do tipo e comprimento do cabo .....	27
2.12. Transformadores .....	33

### **CAPÍTULO III**

#### Qualidade de energia elétrica e normas

3.1. Introdução .....	39
3.2. Conceitos Gerais de qualidade de energia .....	39
3.3. Distorções Harmônicas .....	41
3.3.1 Ordem frequência e sequência das Harmônicas .....	42
3.3.2 Cargas não Lineares .....	44
3.4. Normas de qualidade de energia .....	44
3.4.1. Normas IEC 61000-3-6 de compatibilidade eletromagnética.....	46
3.4.2. Norma e IEEE 519-2014 Prática recomendada IEEE e requisitos para controle Harmônicos e sistema elétrico de potência .....	49
3.4.3. Norma ANEEL- Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional- PRODIST-MÓDULO 08 .....	52

### **CAPÍTULO IV**

#### Filtros passivos Harmônicos

4.1. Introdução .....	55
4.2. Tipos de filtros .....	57
4.3. Filtros de derivação e série .....	61
4.4. Localização dos filtros harmônicos .....	61
4.5. Filtros sintonizados .....	62
4.6. Frequência de sintonia .....	68
4.7. Filtro Mínimo.....	68
4.8. Frequência ressonantes deslocadas .....	70
4.9. Efeito de tolerâncias em componentes de filtros .....	72
4.10. Interrupção de um dos filtros paralelo .....	72
4.11. Operação com cargas variáveis.....	73
4.12. Divisão de reativo ( KVAR) entre bancos de filtros paralelo .....	73
4.13. Perdas nos capacitores .....	74

4.14. Ajuste e desequilíbrio de filtro Harmônico.....	74
4.15. Relações em um filtro sintonizado.....	75
4.16. Seleção do fator de qualidade (Q).....	77
4.17. Filtro com sintonia dupla .....	78
4.18. Filtro de passagem de faixa.....	80
4.19. Filtros Amortecidos .....	82
4.20. Filtro passa-alta de segunda ordem.....	85
4.21. Filtro tipo C.....	89
4.22. Filtro tipo passa-baixa.....	94

## **CAPÍTULO V**

### Estudo de caso

5.1. Aplicação e estudo de caso .....	95
5.2. Levantamentos de dados .....	96
5.3. Diagrama unifilar para aplicação de filtros.....	99
5.4. Medição com analisador HIOKI .....	101
5.4.1. Análise da Tensão em Regime Permanente.....	103
5.4.2. Análise da Corrente em Regime Permanente .....	104
5.4.3. Análise da Potência Ativa e Potência Reativa em Regime Permanente.....	105
5.4.4. Análise de Fator de Potência .....	106
5.4.5. Análise da Distorção Harmônica da Industria KDW da Amazônia. ....	107
5.4.6. Aplicação do Estudo de caso com a colocação dos Filtros Capacitivos de Harmônicas .....	108
5.4.7 Materiais para instalação .....	109
5.4.8 Resultado da aplicação.....	112

## **CAPÍTULO VI**

### conclusão do trabalho

6.1. conclusão .....	114
6.2. Algumas sugestões para continuidade deste trabalho.....	115

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	116
-------------------------------	-----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Forma de onda simulada do espectro harmônico .....	06
Figura 2.2	Formas de onda de corrente de linha típicas de HVDC, inversor CC e ASD de seis pulsos.....	06
Figura 2.3	Assinatura de corrente errática de um forno de arco elétrico durante a fusão da sucata.....	07
Figura 2.4	Curva de redução proposta devido ao fator de tensão harmônico (HVF) igual ao THD <sub>v</sub> , todas as máquinas.....	25
Figura 2.5	Exemplos de redução de torque dos motores NEMA quando usados com inversores.....	26
Figura 2.6	O valor <i>rms</i> da corrente do estator com cancelamento de ruído aumenta à medida que a falta se desenvolver.....	29
Figura 2.7	Cable length versus pulse rise time that is likely to cause reflection...	30
Figura 2.8	Output filterat motor terminalstopreventreflections, (b) cableconstruction for ASDs, and (c) cabletermination.....	32
Figura 2.9	Circuito equivalente de um transformador de dois enrolamentos, (b) circuito equivalente simplificado.....	33
Figura 2.10	Diagrama fasorial correspondente ao circuito equivalente da Fig. 2:10 (a), (b) diagrama fasorial.....	34
Figura 2.11	Fluxo eletromagnético em um transformador tipo de núcleo em carregando.....	38
Figura 3.1	Harmônico de sequência zero.....	43
Figura 4.1	Filtro passivo paralelo.....	56
Figura 4.2	Resposta de frequência de passa baixa, passa alta, passagem de banda e banda de parada (entalhe) filtros.....	59
Figura 4.3	Especificações de resposta e atenuação de frequência de um passa-baixa filtro, (c) resposta de atenuação de um filtro Butterworth de ordens diferentes.....	60
Figura 4.4	Conexões de um filtro ST, fonte harmônica em um sistema de distribuição; (b) circuito equivalente olhando da injeção harmônica como a fonte.....	63
Figura 4.5	Resposta de um filtro shunt sintonizado onde mostra a banda de passagem e assíntotas.....	65
Figura 4.6	Gráfico de impedância generalizada, (a) plano R – X e plano Y.....	66
Figura 4.7	Gráficos de matriz de impedância de auto-impedância e impedância mútua.....	67
Figura 4.8	Conversor interligando os sistemas AC e DC e (b) não característico interações de frequência.....	68

Figura 4.9	Mostra os gráficos $R - X$ , $Z - \omega$ e ângulo de fase dos filtros ST isolados e em paralelo.....	69
Figura 4.10	Frequência de ressonância deslocada, filtro sintonizado.....	70
Figura 4.11	Simulação EMTP de transientes de comutação.....	71
Figura 4.12	Configuração do sistema de um transformador de 20 MVA com um banco de capacitores de 5 Mvar nos enrolamentos secundários comutados juntos.....	71
Figura 4.13	Perdas médias em capacitores de filme-folha, com variação de temperatura, dados de um elemento capacitor específico tipo, e um específico fabricante.....	74
Figura 4.14	Circuitos de dois filtros sintonizados paralelos de 6 Mvar (quinto harmônico) e 4 Mvar (sétimo harmônico) e (b) circuito equivalente de um único filtro duplo afinado.....	79
Figura 4.15	Um circuito RC como filtro de passagem de banda e (b) um filtro de banda larga aprimorado para mitigação de harmônicos.....	81
Figura 4.16	: Circuitos de filtros amortecidos. (a) Filtro de primeira ordem, (b) filtro de segunda ordem, (c) filtro de terceira ordem e (d) filtro tipo C.....	83
Figura 4.17	Filtro Passa Alta de segunda ordem (a) Circuito, (b) plotagem de $R - X$ e (c) $z - \omega$ .....	85
Figura 4.18	Circuito de dois paralelos Filtros sintonizados com uma passa alta de segunda ordem filtro, (b) gráfico $R - X$ , (c) $z - \omega$ plotado e (d) plotagem angular.....	88
Figura 4.19	Efeito da magnitude da resistência $R$ nas características de impedância em um filtro passa-alta de segunda ordem.....	89
Figura 4.20	Filtro tipo C e (b) equivalência com um filtro ST.	90
Figura 4.21	Características do filtro tipo C, resistência, reatância e impedância versus frequência.....	93
Figura 4.22	Filtro Tipo Passa Baixa.....	95
Figura 5.23	Analisador de Qualidade de Energia PW 3198-90 HIOKI. Fonte: Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica ITEGAM, (2018) .....	97
Figura 5.24	Perfil da tensão nas fases A B e C da Empresa KDW Engenharia.....	98
Figura 5.25	Corrente RMS registra nas fases A B e C da Empresa KDW Engenharia.....	99
Figura 5.26	Potência ativa registrada nas fases A B e C da Empresa KDW Engenharia.....	99

Figura 5.27	Potência reativa registrada nas fases A B e C da Empresa KDW Engenharia.....	100
Figura 5.28	Fator de Potência registrado nas fases A B e C da Empresa KDW Engenharia.....	101
Figura 5.29	Valores de DHTv médios obtidos para as fases A-B-C.....	101
Figura 5.30	Valores de DHTi médios obtidos para as fases A-B-C.....	102
Figura 5.31	As formas de instalações e modelos de filtros.....	103
Figura 5.32	Diagrama unifilar da SE, e indica o ponto exato de instalação dos filtros capacitivos.....	106
Figura 5.33	Painel com os 15 filtros Capacitivos Montado para aplicação no QGBT/220V.....	108
Figura 5.34	instalação de filtros na tensão 380V.....	109
Figura 5.35	Pontos de cabos com solda de estanho do painel.....	109
Figura 5.36	Filtros colocados no QGBT/220V.....	110
Figura 5.37	Filtros colocados no QGBT/380V.....	110
Figura 5.38	Gráfico de Equiparação de Consumo na Indústria.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Conteúdo Harmônico da Forma de Onda.....	05
Tabela 2.2	Maior problema de qualidade de energia.....	08
Tabela 2.3	Ordem Harmônica e Rotação.....	10
Tabela 3.1	Ordem, frequência e sequência das harmônicas.....	40
Tabela 3.2	Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa (BT) e média tensão (MT).....	45
Tabela 3.3	Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média.....	46
Tabela 3.4	Limites de distorção de tensão.....	47
Tabela 3.5	Limites de distorção de corrente para sistemas de 120 V a 69 KV.....	48
Tabela 3.6	Limites de distorção de corrente para sistemas com classificação acima de 69 kV até.....	49
Tabela 3.7	Limites de distorção de corrente para sistemas classificados > 161 Kv.....	49
Tabela 3.8	mostra as terminologias aplicáveis ao cálculo das distorções harmônicas.....	51
Tabela 3.10	Os limites para as distorções harmônicas totais.....	53
Tabela 4.1	Parâmetros dos filtros do tipo C em alguns projetos de HVDC	92
Tabela 5.1	Valores Mínimos, Máximos e Médios de tensão RMS medidos nas fases A, B, C.....	96
Tabela 5.2	Valores Mínimos, Máximos e Médios de tensão RMS medidos nas fases A, B, C.....	97
Tabela 5.3	Valores Mínimos, Máximos e Médios de tensão RMS medidos nas fases A, B, C.....	98
Tabela 5.4	Valores Mínimos, Máximos e Médios obtidos nas fases A, B e C.....	99
Tabela 5.5	Valores Mínimos, Máximos e Médios obtidos nas fases A, B e C.....	99
Tabela 5.6	Valores Mínimos, Máximos e Médios de DHTi obtidos nas fases A B e C.....	101
Tabela 5.7	Demonstrativo de contas.....	110
Tabela 5.8	Demonstrativo de contas depois.....	111

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - Motivação

Os harmônicos do sistema de potência é um assunto de pesquisa contínua nos dias atuais, em se tratando de qualidade de energia elétrica (QEE). Esta pesquisa visa apresentar a aplicação da tecnologia de ponta e os avanços dos filtros passivos em uma rede industrial. É um assunto de interesse de muitos profissionais do sistema de energia envolvidos em análise harmônica e mitigação e as aplicações no clima moderno quando as cargas não lineares nos sistemas de utilidade estão aumentando. Os sistemas elétricos modernos contêm uma grande quantidade de fontes contaminantes ou produtores de harmônicos onde se destacam fundamentalmente as cargas não lineares empregadas nas indústrias, nas instalações comerciais e residenciais (PATIDAR & SINGH, 2009).

A dissertação fornece uma cobertura abrangente de geração, efeitos e controle de harmônicos. Novas tecnologias de mitigação de harmônicos, detalhados passo-a-passo do projeto de filtros passivos, inter-harmônicos e *flicker* são cobertos. A intenção da pesquisa é que sirva como referência e guia prático sobre aplicação dos filtros passivos para combater os impactos harmônicos.

Para os profissionais deve ser capaz de formar uma base clara para entender o assunto de harmônicos, e um interesse dos estudantes/especialistas avançado deve ser simulado para explorar mais. Uma primeira leitura da dissertação é seguida por uma leitura crítica detalhada é sugerida, as referências utilizadas no texto, exemplos e gráficos do mundo real buscam esse objetivo e fornecem uma compreensão clara.

Os efeitos das harmônicas podem ser experimentados à distância, e o efeito nos componentes do sistema de potência é um campo dinâmico e em evolução. Essas interações foram analisadas em termos de pensamento atual (DAS, 2015).

A retransmissão de proteção tem sido chamada de “uma arte e ciência”. O autor não hesitará em chamar os projetos de filtros harmônicos passivos e as tecnologias de mitigação da mesma. Isto é assim porque muita subjetividade está envolvida. Deixando de lado ferramentas de pesquisa de alta tecnologia como as simulações de diversas ferramentas computacionais como de Monte Carlo, Algoritmos Genéticos (NSGA II e III), Lógica Fuzzy, Recozimento Simulado, Colônia de Formigas, Redes Neurais Artificiais entre outras são capazes de resolver um entendimento aos especialistas para tomada de decisão. Esta pesquisa não visa estes

modelos matemáticos computacionais disponível, mas sim só a aplicação do projeto de filtros passivos em sistemas elétricos industriais (DAS, 2015; LEITE, 2013). As técnicas invariavelmente exigem estudos iterativos para atender a vários objetivos conflitantes. A natureza das harmônicas, a modelagem dos componentes do sistema de potência e as características dos filtros, antes de tentar um projeto de filtro prático para aplicações do mundo real, é dedicado a projetos de filtro passivo harmônico prático numa indústria do Pólo Industrial de Manaus (PIM).

## **1.2 A Dissertação em Etapas**

Primeira etapa - Reconhecendo a relevância do assunto abordado, a presente dissertação é desenvolvida em duas etapas. A primeira etapa apresenta os seguintes tópicos: Uma caracterização das principais fontes de geração de harmônicos em instalações industriais; Desenvolvimento da metodologia de aplicação do projeto dos filtros passivos para as análises de harmônicos em instalações industriais visando baixar os custos da fatura de energia elétrica da empresa;

A segunda etapa - Consiste na validação da aplicação dos filtros passivos no quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT-220V) e na Subestação com 380V, visando recuperar a estabilidade do sistema instalado, bem como evitar a queimas de motores e equipamentos eletrônicos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

Desenvolver uma metodologia de um projeto de filtros passivos para a seleção da configuração e parâmetros de projeto de um conjunto de filtros harmônicos passivos para sistemas elétricos industriais de uma indústria do PIM.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Identificar as características dos filtros harmônicos passivos na indústria;
- Utilizar o diagrama unifilar para o uso de aplicação dos filtros passivos no sistema instalado em uma planta industrial;
- Projetar a montagem dos painéis para colocação dos filtros passivos;
- Avaliar o impacto dos filtros harmônicos passivos redes elétricas industriais com cargas não lineares;
- Propor ações para aplicação dos filtros passivos para o estudo de caso prático.

## 1.4 Contribuição e Relevância do Tema

A presente dissertação justifica-se pela necessidade de superar algumas limitações dos métodos desenvolvidos nas bibliografias referenciadas entre as quais pode-se citar:

1). Mostram-se uma variedade de abordagens sobre os objetivos a atingir com a instalação de filtros passivos na indústria do PIM, mas com o objetivo de maximizar os benefícios econômicos produzidos por esses filtros;

2). Concentram-se na determinação dos parâmetros de projeto de determinados tipos de filtro, cuja configuração é selecionada previamente à otimização, e nunca consideram a otimização da própria seleção do tipo de filtro a ser utilizado;

3). Em muitos casos, a aplicação é realizada para uma determinada condição de carga, o que se opõe ao caráter essencialmente variável da carga, e;

4). Muitos autores analisam apenas um só cenário de operação da rede elétrica, de modo que os resultados podem não ser adequados para outro cenário com variações do nível de curto-circuito, e nos parâmetros dos filtros, por exemplo.

Nessa ótica, tendo em conta o elevado ritmo de crescimento econômico do PIM, tem-se observado a introdução de novas tecnologias da eletrônica e telecomunicações nos processos de automatização das indústrias, da mesma forma que cresce a presença de cargas que, por suas características não lineares, incide diretamente nos índices de QEE nestas instalações. A necessidade de manter um elevado fator de potência conjuntamente com a manutenção dos parâmetros de QEE é uma questão do ponto de vista da eficiência energética que impacta nos índices de rentabilidade das indústrias. As aplicações dos resultados obtidos nesta dissertação, sem dúvida, constituem um aporte de melhoria do sistema elétrico instalado.

## 1.5 Delimitação da pesquisa

Esta pesquisa delimita-se tão somente a aplicação do projeto dos filtros passivos em uma indústria do PIM, visando atender os aspectos econômicos estabelecidos para redução dos custos com as faturas de energia da empresa.

## 1.6 Estrutura dos capítulos

No **capítulo 1**, introdução, são apresentados, de forma sucinta, os elementos que motivaram à realização deste trabalho, juntamente com os objetivos, a relevância e contribuição da tese e o estado da arte por meio de pesquisas correlatas.

No **capítulo 2**, revisão da literatura, mostrando os diversos tipos de atividades envolvendo a aplicações dos filtros passivos e suas características industriais.

O **capítulo 3** analisam-se aspectos relacionados com as normas de qualidade de energia, considerando as recomendações do IEC, IEEE e PRODIST/MODULO 8/ANEEL.

O **capítulo 4** está orientado ao estudo dos filtros harmônicos passivos, apresentando os filtros sintonizados, variações dos parâmetros, os distintos tipos de filtros amortecidos, as expressões do projeto e dos componentes de custos dos filtros.

O **capítulo 5** aborda a aplicação do projeto de filtros passivos e todas as etapas de montagem e aplicação para fins de atenuar a sua implementação no sistema instalado indústria por meio na indústria do PIM.

Finalmente, no **capítulo 6**, apresentam-se as conclusões proporcionadas pelos resultados da dissertação e as recomendações para possíveis desdobramentos e aplicações futuras.

## CAPÍTULO 2

### ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS À ANÁLISES HARMÔNICAS

#### 2.1 - Formas de onda distorcidas

As Emissões harmônicas podem ter amplitudes e frequências variadas. Os sistemas harmônicos mais comuns são sistemas de componentes em forma de onda residual periódica, que têm frequências que podem ser resolvidas em alguns múltiplos da frequência fundamental. A análise de Fourier é a ferramenta matemática utilizada para essa análise, os componentes mais frequentes são chamados de harmônicos não intérpretes. A distorção produzida por cargas não-lineares pode ser resolvida em várias categorias:

- Uma forma de onda distorcida que possui as Séries de Fourier com frequência fundamental igual à frequência do sistema de energia e existe um estado estacionário periódico. Este é o caso mais comum em estudos harmônicos. A forma de onda mostrada na Figura 2.1 é sintetizada a partir dos harmônicos mostrados na Tabela 2.1. A forma de onda na Figura 2.1 é simétrica em relação ao eixo  $x$  e pode ser descrita pela equação (2.1):

$$I = \sin(\omega t - 30^\circ) + 0.17 \sin(5\omega t + 174^\circ) + 0.12 \sin(7\omega t + 101^\circ) \quad (2.1)$$

A forma de onda é tipicamente de um conversor de fonte de corrente de seis pulsos, harmônicos limitados a 23<sup>a</sup>, embora harmônicos mais altos estejam presentes. A emissão harmônica varia em uma ampla faixa de formas de onda distorcidas. A Figura 2.2 mostra uma forma de onda típica para link HVDC, inversores CC e um inversor de fonte de tensão de seis pulsos (VSI) ASD, Ref. (IEEE WORKING GROUP ON POWER SYSTEM HARMONICS, 1983). As formas de onda típicas e distorções de vários tipos de equipamentos de comutação eletrônica de potência. Esta é a situação mais comum na prática, e as formas de onda distorcidas podem ser decompostas em vários harmônicos. O sistema geralmente pode ser modelado como um sistema linear.

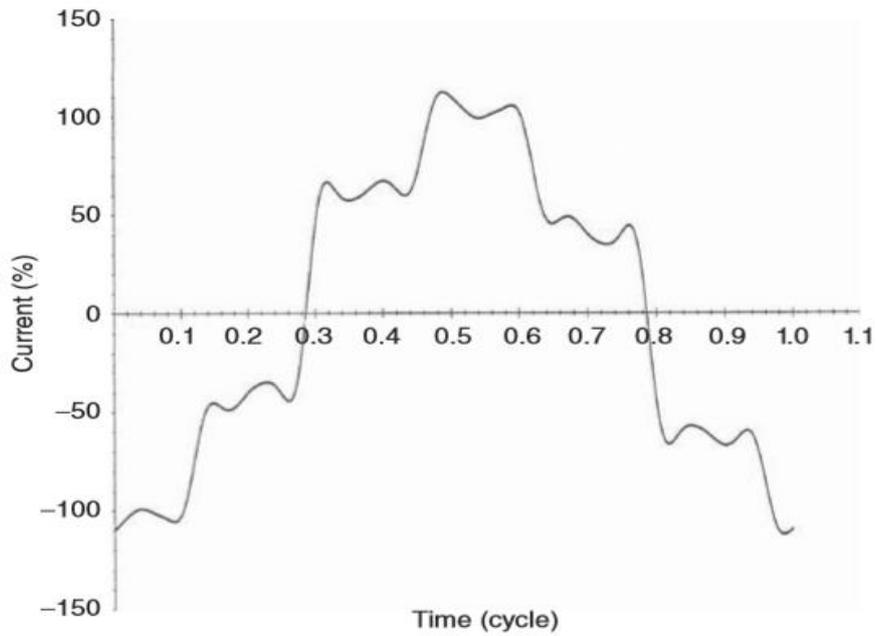


Figura 2.1 - Forma de onda simulada do espectro harmônico mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 Conteúdo Harmônico da Forma de Onda.

H	5	7	11	13	17	19	23
%	17	12	11	5	28	1.5	0.5

Fonte: DAS, (2015).

$h$  = ordens harmônicas mostradas em porcentagem da corrente fundamental.

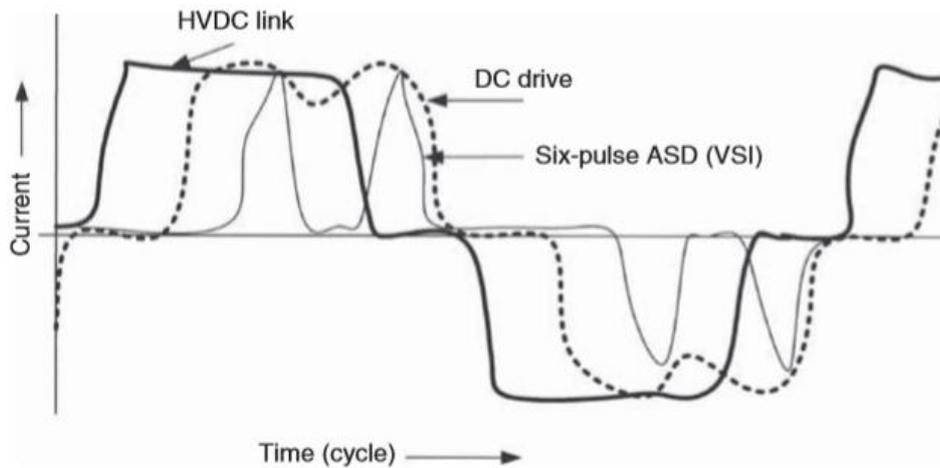


Figura 2.2 - Formas de onda de corrente de linha típicas de HVDC, inversor CC e ASD de seis pulsos.

Fonte: (IEEE WORKING GROUP ON POWER SYSTEM HARMONICS, 1983).

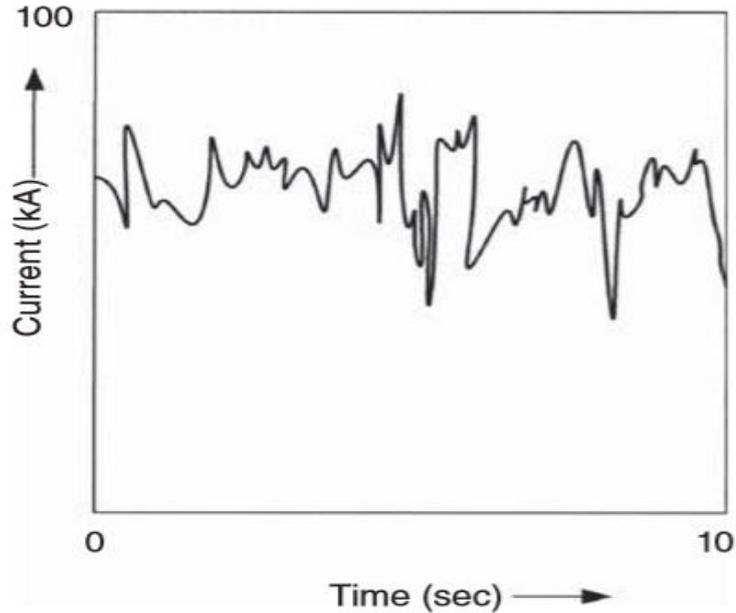


Figura 2.3 - Assinatura de corrente errática de um forno de arco elétrico durante a fusão da sucata.

Fonte: DAS, (2015).

- Uma forma de onda distorcida com um submúltiplo de frequência do sistema de potência e um estado estacionário periódico existe. Certos tipos de cargas pulsadas e controladores de ciclos integrais produzem esses tipos de formas de onda.

- A forma de onda é um período periódico, mas talvez seja o mais periódico. A expansão da região metropolitana ainda pode existir. Os exemplos são dispositivos de arco: fornos de arco, fluorescente, mercúrio e luz de vapor de sódio. O processo não é a natureza periódica, e uma forma de onda periódica é obtida quando as condições de operação são mantidas durante o tempo de fusão. (Figura 2.3). A forma de onda é altamente distorcida e aperiódica. No entanto, as emissões harmônicas típicas do forno a arco durante a fusão e o refino foram definidas no padrão IEEE 519 (IEEE Std 519-2014).

As cargas do forno de arco são altamente poluentes e causam desequilíbrio de fase, oscilação, carga de impacto, harmônicas, inter-harmônicas e ressonância, e podem gerar vibrações de torção em equipamentos rotativos.

## 2.2 - Harmônicos e Qualidade de Energia Os harmônicos são uma das principais

As preocupações de qualidade de energia. As preocupações com a qualidade de energia abrangem preocupações muito mais amplas, como quedas e oscilações de tensão, transientes, sobrecargas e sobretensões, variações de frequência, interrupções definitivas, qualidade de energia para equipamentos eletrônicos sensíveis, como computadores. A Tabela 2.2 resume

alguns problemas de qualidade de energia. Uma referência de importância é a IEEEER, Recomendada para Práticas de Sistemas de Energia de Emergência e de Espera para Aplicações Industriais e Comerciais (ANSI/IEEE Standard 446, 1987).

Tabela 2.2 Maior problema de qualidade de energia.

N <sup>o</sup>	Categoria	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Magnitude típica da tensão
1	<i>Distorção DC de distorção de forma de onda</i>	0 – 500Hz	Curso estável	0 – 25%
	Harmônicas	0 – 6KHz	Curso estável	0 – 30%
	Inter-harmônica	Banda larga	Curso estável	0 – 5%
	Entalhando		Curso estável	
	Modo de ruído comum Normal Mode		Curso estável	
2	Flutuações de tensão		Intermitente	01 – 7%
	Cintilação		Curso estável	Pst e Plt
	Desequilíbrio de Tensão			0.5 – 4%
3	Impulsos Transitórios			
	nanosegundos	5 ns subida	< 50 ns	
	microsegundos	1 μs subida	50 ns – 1ms	
	milisegundos	0.1 ms subida	> 1 ms	
4	Transientes oscilatórios			
	Baixa Frequência	< 5KHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
	Média Frequência	5 – 500 KHz	20 μs	0 – 8 pu
	Alta Frequência	0.5% MHz	5 μs	0 – 8 pu
5	Variações de Durações Curtas			
	a. Instantâneas			
	interrupções		0.5 – 30 ciclos	<0.1 pu
	Afundamentos		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
	b. momentâneo			
	Interrupções		30 ciclos – 3s	<0.1 pu
	Afundamentos		30 ciclos – 3s	0.1 – 0.9 pu
	Ondulação		3s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
	c. Temporárias			
	Interrupções		3s – 1 min	<0.1pu
	Afundamentos		3s – 1 min	<0.1 – 0.9 pu
	Ondulação		3s – 1 min	<1.1 – 1.2 pu
6	Variações de longa duração			
	Interrupção sustentada		• 1 min	<0.0 pu
	Sobretensão		• 1 min	<0.8 – 0.9 pu
	sobretensão		• 1 min	1.1 – 1.2 pu
7	<b>Varição de Frequência</b>		<b>&lt;10s</b>	

Fonte: DAS, (2015).

### 2.3 Harmônica e Componente de Sequência

A teoria dos componentes da sequência não é discutida neste livro e referências (G.O, 1959; BLACKBURN, 1993 e WESTINGHOUSE, 1964) podem ser vistas. Em um sistema trifásico balanceado sob condições não-sinusoidais, a tensão harmônica de ordem  $h$  (ou corrente) pode ser expressa como:

$$V_{ah} = \sum_{h \neq 1} V_h(h\omega_o t - \theta_h) \quad (2.2)$$

$$V_{bh} = \sum_{h \neq 1} V_h (h\omega_o t - (h\pi/3)\theta_h) \quad (2.3)$$

$$V_{ch} = \sum_{h \neq 1} V_h (h\omega_o t - (2h\pi/3)\theta_h) \quad (2.4)$$

Baseado em Equações (2.2 a 2.4) e rotação anti-horária dos fatores fundamentais, podemos escrever:

$$V_a = V_1 \sin \omega t + V_2 \sin 2\omega t + V_3 \sin 3\omega t + V_4 \sin 4\omega t + V_5 \sin 5\omega t + \dots \quad V_b = V_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + V_2$$

$$\sin(2\omega t - 240^\circ) + V_3 \sin(3\omega t - 360^\circ) + V_4 \sin(4\omega t - 480^\circ) + V_5 \sin(5\omega t - 600^\circ) + \dots = V_1$$

$$\sin(\omega t - 120^\circ) + V_2 \sin(2\omega t + 120^\circ) + V_3 \sin 3\omega t + V_4 \sin(4\omega t - 120^\circ) + V_5 \sin(5\omega t + 120^\circ) + \dots$$

$$V_c = V_1$$

$$\sin(\omega t + 120^\circ) + V_2 \sin(2\omega t + 240^\circ) + V_3 \sin(3\omega t + 360^\circ) + V_4 \sin(4\omega t + 480^\circ) + V_5$$

$$\sin(5\omega t + 600^\circ) + \dots$$

$$= V_1 \sin(\omega t + 120^\circ) + V_2 \sin(2\omega t - 120^\circ) + V_3 \sin 3\omega t + V_4 \sin(4\omega t + 120^\circ) + V_5 \sin(5\omega t - 120^\circ)$$

$$+ \dots$$

Condições subequilibradas, a harmônica (frequência de harmônico =  $h$  vezes a frequência fundamental) da fase  $b$  fica  $h$  vezes  $120^\circ$  atrás daquela do mesmo harmônico na fase  $a$ . O  $h^{\text{th}}$  harmônico da fase  $c$  fica a  $240^\circ$  atrás do mesmo harmônico na fase  $a$ . No caso de harmônicos triplos, o deslocamento dos ângulos de fase em três vezes  $120^\circ$  ou três vezes  $240^\circ$  resulta em vetores co-fasiais. A Tabela 2.3 apresenta a seqüência de harmônicos e o padrão é claramente positivo-negativo-zero. Nós podemos escrever:

$$\text{Harmônicos da ordem } 3h + 1 \text{ têm seqüência positiva} \quad (2.5)$$

$$\text{Harmônicos da ordem } 3h + 2 \text{ têm seqüência negativa} \quad (2.6)$$

$$\text{Harmônicos da ordem } 3h \text{ são de seqüência zero} \quad (2.7)$$

Todos os harmônicos triplos gerados por cargas não lineares são fasores de seqüência zero. Estes somam no neutro. Em um sistema trifásico de quatro fios, com balanceamento perfeitamente seqüência positiva e negativa cancelarão deixando apenas os harmônicos de seqüência zero. Em um sistema trifásico balanceado, que atende a carga monofásica, o neutro carrega a seqüência zero e o desbalanceamento residual de correntes de seqüência positiva e negativa. Mesmo os harmônicos estão ausentes na linha por causa da simetria de fase e as

formas de onda assimétricas adicionarão harmônicos pares aos condutores de fase, por exemplo, circuito de ponte trifásico semi-controlado.

Tabela 2.3 Ordem Harmônica e Rotação.

Ordem Harmônica	Frente	Inverso
Fundamental	X	
2		X
4	X	
5		X
7	X	
8		X
10	X	
11		X
13	X	
14		X
16	X	
17		X
19	X	
20		X
22	X	
23		X
25	X	
26		X
28	X	
29		X
31	X	

Nota: O padrão é repetido para harmônicos de ordem superior.

Fonte: DAS, (2015).

## 2.4 Impedâncias de Sequência de Componentes do Sistema de Potência

As Impedâncias de sequência positiva, negativa e zero variam em grandes limites, dependendo do equipamento do sistema de potência (BARKER & DE MELLO, 2000; MILANOVIC & ZHANG, 2010). Por exemplo, para transformadores, as impedâncias de sequência positiva e negativa podem ser consideradas iguais, mas a impedância de sequência zero pode ser infinita dependendo das conexões do enrolamento do transformador e do aterramento. A impedância de sequência zero das linhas de transmissão pode ser de duas a três vezes a impedância de sequência positiva ou negativa (CHIMKLAI & MARTI, 1995). Mesmo para fluxo de corrente de frequência fundamental, a modelagem precisa de impedâncias de sequência é importante e as impedâncias de sequência para harmônicas devem ser modeladas (ELMORE, 2003; FUCHS & MASOUM, 2011).

## 2.5 Índices de Harmônicos

### 2.5.1 Fator Harmônico

$$DF = \sqrt{\frac{\sum \text{of squares of amplitudes of all Harmonics}}{\text{Square of the amplitude of the fundamental}}} \times 100\% \quad (2.8)$$

O índice mais utilizado, distorção harmônica total (THD), que é de uso comum, é o mesmo que DF.

### 2.5.2 Equações para índices harmônicos comuns

Podemos escrever as seguintes equações. A tensão RMS na presença de harmônicos pode ser escrita como:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} V_{h,rms}^2} \quad (2.9)$$

E da mesma forma, a expressão para a corrente é

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} I_{h,rms}^2} \quad (2.10)$$

O fator de distorção total da tensão é

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} V_{h,rms}^2}}{V_{f,rms}} \quad (2.11)$$

onde  $V_{f,rms}$  é a tensão de frequência fundamental. Isso pode ser escrito como

$$THD_V = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{f,rms}}\right)^2 - 1} \quad (2.12)$$

Ou

$$V_{rms} = V_{f,rms} \sqrt{1 + THD_V^2} \quad (2.13)$$

Similarmente:

$$TDH_1 = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_{h,rms}^2}}{I_{f,rms}} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{f,rms}}\right)^2 - 1} \quad (2.14)$$

$$I_{rms} = I_{f,rms} \sqrt{1 + TDH_1^2} \quad (2.15)$$

Onde:

$I_{f,rms}$ : É a corrente de frequência fundamental.

A distorção da demanda total (TDD) é definida como

$$TDD = \frac{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}{I_L} \quad (2.16)$$

Onde:

$I_L$ : é a corrente de demanda de carga.

A distorção harmônica parcial ponderada (PWHD) da corrente é definida como:

$$PWHD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=14}^{h=40} h I_h^2}}{I_{f,rms}} \quad (2.17)$$

Expressão semelhante é aplicável para a tensão. A PWHD avalia a influência de harmônicos de corrente ou tensão de ordem superior. Os parâmetros de soma são calculados com componentes de corrente harmônica única  $h$ .

## 2.5.2 - Fator de Influência Telefônica

Os harmônicos geram a influência do telefone através do acoplamento indutivo. O fator de influência do telefone (TIF) para uma onda de tensão ou corrente em um circuito de alimentação elétrica é uma variação do valor do pico de intensidade da onda quadrada de todos os componentes da onda senoidal (incluindo ondas AC fundamentais e harmônicas) para o valor quadrático médio (não ponderado) da onda inteira:

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum W_f^2 I_f^2}}{I_{rms}} \quad (2.18)$$

Onde:

$I_{f, max}$  esta for a frequência máxima atual na frequência  $f$ ,  $W_f$  é a mesma frequência de TIF na frequência  $f$ . A tensão pode ser substituída pela corrente. Esta definição pode não ser tão explícita, para cálculo. Uma expressão semelhante pode ser escrita para tensão.

O produto de TI é a influência indutiva expressa em termos do produto de sua raiz quadrada de magnitude média  $I$  em ampères vezes seu TIF.

$$IT = TIF * I_{rms} = \sqrt{\sum (W_f I_f)^2} \quad (2.19)$$

O produto kVT é a influência indutiva expressa em termos do produto da sua magnitude quadrática média da raiz em kV vezes o seu TIF.

$$kVT = TIF * kV_{rms} = \sqrt{\sum (W_f V_f)^2} \quad (2.20)$$

O efeito de aumento de peso que reflete o peso médio da mensagem e o acoplamento normalizado em 1kHz é dado por:

$$W_f = 5P_{ff} \quad (2.21)$$

Onde:

$P_f = C$  mensagem ponderação na frequência  $f$  em consideração.

## 2.6 - Fator de Potência, Fator de Distorção e Fator Total de Potência

Para tensões e correntes sinusoidais, o fator de potência é definido como kW / kVA e o ângulo do fator de potência  $\phi$  é:

$$\phi = \cos^{-1} \frac{kW}{kVA} = \tan^{-1} \frac{kvar}{kW} \quad (2.22)$$

O fator de potência na presença de harmônicos compreende dois componentes: deslocamento e distorção. O efeito dos dois é combinado em fator de potência total. O componente de deslocamento é a relação entre a potência ativa da onda fundamental em watts

e a potência aparente da onda fundamental em volt-ampères. Este é o fator de potência visto pelos medidores de watt-hora e var-hora. O componente de distorção é a parte que está associada a tensões e correntes harmônicas.

$$PF_t = PF_f \times PF \quad (2.23)$$

Na frequência fundamental, o fator de potência de deslocamento será igual ao fator de potência total, já que o fator de potência de deslocamento não inclui kVA devido a harmônicos, enquanto o fator de potência total o inclui. Para cargas geradoras harmônicas, o fator de potência total será sempre menor que o fator de potência de deslocamento. Continuando com a separação entre o fator de potência e o fator de deslocamento, o fator de potência do inversor com o reator de link de CD é dado pela expressão de IEEE 519, Ref. (IEEE Std 519-2014, Revisão do IEEE Std 519-1992).

$$Total\ PF = \frac{q}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \quad (2.24)$$

onde  $q$  é o número de pulsos do conversor e  $\pi/q$  é o ângulo em radianos. Isto ignora a sobreposição de comutação e sobreposição de fase, e negligência a corrente de magnetização do transformador. Para um conversor de seis pulsos, o fator de potência máxima é  $3/\pi = 0,955$ . Um conversor de 12 pulsos possui um fator de potência máxima teórica de 0,988. O fator de potência cai drasticamente com o aumento do ângulo de disparo. Notando que o fator de potência funciona como uma topologia, por exemplo, com modulação por largura de pulso, o fator de potência de entrada depende apenas do tipo de conversor e o fator de potência do motor é compensado por um capacitor no barramento CC. No caso de tensão e corrente senoidal, o relacionamento a seguir é válido.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2.25)$$

Onde:

$P$  é a potência ativa;

$Q$  é o volt-ampere reativo;

$S$  é o volt-ampère.

Esse relacionamento foi amplamente explorado em programas de fluxo de carga:

$$S = V_f I_f, Q = V_f I_f \sin(\theta_f - \delta_f), P = V_f I_f \cos(\theta_f - \delta_f), \text{ and } PF = P/S \quad (2.26)$$

$\theta_f - \delta_f =$  ângulo de fase entre a tensão fundamental e a corrente fundamental. No caso de carga não linear ou quando a fonte possui forma de onda não senoidal, a potência ativa P pode ser definida como:

$$P = \sum_{h=1}^{h=\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (2.27)$$

Q pode ser escrito como

$$Q = \sum_{h=1}^{h=\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (2.28)$$

Vh e Ih estão em valores eficazes, e a potência aparente pode ser definida como

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.29)$$

Onde:

D é o poder de distorção.

Considere o D2 até o terceiro harmônico:

$$D^2 = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2)(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2) - (V_0 I_0 + V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2 + V_3 I_3 \cos \theta_3)^2 - (V_1 I_1 \cos \theta_1 + V_2 I_2 \cos \theta_2 + V_3 I_3 \cos \theta_3)^2 \quad (2.30)$$

Uma expressão para o fator de potência de distorção pode ser obtida a partir dos fatores de distorção harmônica de corrente e tensão. A partir da definição desses fatores, as tensões e correntes harmônicas *rms* podem ser escritas como

$$V_{rms(h)} = V_f \sqrt{1 + \left(\frac{TDH_V}{100}\right)^2} \quad (2.31)$$

$$I_{rms(h)} = I_f \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (2.31)$$

Portanto, o fator de potência total é:

$$PF_{tot} = \frac{P}{V_f I_f \sqrt{1 + \left(\frac{TDH_V}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}}$$

(2.32)

Negligenciando a energia contribuída pelas harmônicas e também a distorção de tensão, como geralmente é pequena, isto é,

$$THD_V \cong 0 \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} PF_{tot} &= \cos(\theta_f - \delta_f) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \\ &= PF_{deslocamento} PF_{distorção} \end{aligned} \quad (2.34)$$

O fator gerador de poder é o produto do fator de potência de deslocamento (que é o fator fundamental de poder) e é multiplicado pelo fator de potência de distorção, conforme definido anteriormente. As tendências modernas na tecnologia convergente são para compensar os harmônicos de linha e melhorar o fator de potência para aproximadamente a unidade simultaneamente.

## 2.7 - Amplificação e Atenuação de Harmônicas

Os harmônicos originários de sua fonte são propagados nos sistemas de energia e seu impacto pode estar presente à distância (EMANUAL, 1995). Nesse processo, os harmônicos podem ser amplificados ou mitigados. Os bancos corretores nos sistemas de potência podem ser fontes de amplificações harmônicas e distorções de forma de onda. Muitos tipos diferentes de fontes harmônicas podem ser dispersos por todo o sistema, e as distorções de corrente e tensão devido a elas tornam-se preocupantes (DAS, 2015). As concessionárias devem manter uma certa qualidade de tensão nas instalações do consumidor e, por sua vez, os harmônicos injetados nos sistemas de energia por um consumidor devem ser controlados e limitados (MATHUR & VARMA, 2002; DAS, 2015). A natureza do sistema de energia: distribuições industriais, sistemas de distribuição comercial e sistemas de distribuição ou transmissão de energia são importantes em um aspecto. Uma análise requer uma estimativa correta da geração harmônica em um determinado ponto nos sistemas de potência, modelagem de componentes do sistema e harmônicos para resultados precisos, por exemplo, modelos de injeção de corrente constante para todos os tipos de harmônicos. geração pode não ser precisa (GHOSH & LEDWICH, 2012). Com base na análise harmônica precisa, as disposições das estratégias de mitigação de harmônicas ativas na fonte da geração harmônica podem ser aplicadas para limitar

os harmônicos. Os filtros passivos são outra opção importante, especialmente em grandes classificações Mvar (GHOSH & LEDWICH, 2012; DAS, 2015; FAN & JOHAN, 2006).

## **2.8 - Novas técnicas de conversão de energia**

Os avanços na eletrônica de potência resultaram em técnicas para melhorar as ondas atuais e os fatores de potência simultaneamente, minimizando os requisitos de filtros (F. L. LUO & H. YE, 2010). Em geral, esses sistemas usam comutação de alta frequência para obter maior flexibilidade na conversão de potência e podem também mudar a harmônica de potência inferior. A distorção é criada com frequência de frequências altas, o que é geralmente superior a 20kHz, e a distorção não pode penetrar no sistema. Algumas publicações (somente livros) sobre harmônicos são listadas separadamente em Referências. Também alguns importantes padrões ANSI / IEEE (ANSI/IEEE STANDARD 446, 1987).

## **2.9 - Análise e medições harmônicas em sistemas de energia**

### **2.9.1 - Harmônicas em Sistemas de Energia**

Os sistemas de energia elétrica devem ser projetados não apenas para as correntes e tensões sinusoidais, mas também para cargas não lineares e eletronicamente comutadas (LAWRENSON, 1980; SALOMONSSON & SANNINO, 2007; BOLLEN, 2003). Houve um aumento de tais cargas nos últimos tempos, e estas podem introduzir poluição harmônica, distorcer formas de onda de corrente e tensão, criar ressonâncias, aumentar as perdas do sistema e reduzir a vida útil do equipamento elétrico (CHAPMAN, 2001; SINGH, 2009; GHOSH, LEDWICH, 2012). Os harmônicos são um dos principais problemas para garantir uma certa qualidade de energia. Isso requer uma análise cuidadosa de geração harmônica e suas medições e o estudo dos efeitos deletérios, controles harmônicos e limitação a níveis aceitáveis (DAS, 2015; NATARAJAN, 2002; MENDIS & GONZALEZ, 2002; ARRILLAGA & WATSON, 2004; STONES & COLLINSON, 2001). O interesse na análise harmônica remonta ao início da década de 1990, em conexão com sistemas DC (HVDC) de alta tensão e compensadores estáticos (SVC) (IEEE WORKING GROUP ON POWER SYSTEM HARMONICS, 2003).

Harmônicos em sistemas de potência se originam devido a operações variadas, por exemplo, ferro-ressonância, saturação magnética, ressonância subsíncrona e cargas não-

lineares e eletronicamente comutadas. A emissão harmônica de cargas não lineares predomina (BUZDUGAN & BALAN, 2017; DAS, 2017; DAVIS, SUBUDHI, & CARROLL, 1996).

### 2.9.2 Cargas Lineares e Não-Lineares

Para distinguir entre cargas lineares e não-lineares, podemos dizer que cargas lineares invariantes no tempo são caracterizadas de modo que uma aplicação de tensão senoidal resulta em um fluxo senoidal de corrente (EMANUEL, 1990; DAS, 2015; TONG, 2012). Essas cargas exibem constante estado estacionário impedância durante a tensão sinusoidal aplicada (DE BRABANDERE, 2004; PAL, 2002). Iluminação incandescente é um exemplo de tal carga (RICHARDSON, 2009; PALENSKY & DIETRICH, 2011; HART, 1992).

Os motores elétricos não fornecidos através de conversores eletrônicos também aproximadamente atender a essa definição. As formas de onda de corrente ou tensão serão quase senoidais e seus ângulos de fase serão deslocados dependendo do fator de potência do circuito elétrico. Transformadores e máquinas rotativas, sob condições normais de carga, atendem aproximadamente a essa definição (WAGNER, 2003; AKAGI, WATANABE & AREDES, 2017; FUCHS & MASOUM, 2011).

No entanto, deve ser reconhecido que a onda de fluxo no espaço de ar de uma máquina rotativa não é sinusoidal. Ondulações dentárias e ranhuras em máquinas rotativas produzem harmônicos rotativos para frente e para trás. Circuitos magnéticos podem saturar e gerar harmônicos (BINNS & SCHMID, 1975; MILLER, 2002; DAS, 2015).

Em um dispositivo não linear, a aplicação de uma tensão sinusoidal não resulta em um fluxo senoidal de corrente (SONI & SONI, 2014; GREBE, 1995). Essas cargas não exibem impedância constante durante todo o ciclo de tensão sinusoidal aplicada (DOHERTY, 1936; GREBE, 1995). A não-linearidade não é o mesmo que a dependência de frequência da impedância, isto é, a reatância de um reator muda proporcionalmente à frequência aplicada, mas é linear em cada frequência aplicada se negligenciarmos a saturação e as franjas (WHITE, 2004; DIXIT & JAIN, 2016).

No entanto, cargas não lineares desenham uma corrente que pode mesmo ser descontínuo ou fluir em pulsos para uma parte do ciclo de tensão senoidal (HAMDAN, 2009; ARRILLAGA & WATSON, 2004; LEONHARD, 2001).

Matematicamente, a linearidade implica em duas condições:

- ✓ Homogeneidade
- ✓ Superposição

Considere o estado de um sistema definido no formulário de equação de estado:

$$\dot{X} = f[x(t), r(t), t] \quad (2.35)$$

Se  $x(t)$  é a solução para esta equação diferencial com condições iniciais  $x(t_0)$  em  $t = t_0$  e insira  $r(t)$ ,  $t > t_0$ :

$$X(t) = \varphi[x(t_0), r(t)] \quad (2.36)$$

então a homogeneidade implica que

$$\varphi[x(t_0), \alpha r(t)] = \alpha \varphi[x(t_0), r(t)] \quad (2.37)$$

Onde  $\alpha$  é uma constante escalar. Isto significa que  $x(t)$  com entrada  $\alpha r(t)$  é igual a  $\alpha$  vezes  $x(t)$  com entrada  $r(t)$  para qualquer escalar  $\alpha$ .

Superposição implica que:

$$\varphi[x(t_0), r_1(t) + r_2(t)] = \varphi[x(t_0), r_1(t)] + \varphi[x(t_0), r_2(t)] \quad (2.38)$$

Isto é,  $x(t)$  com entradas  $r_1(t) + r_2(t)$  é igual à soma de  $x(t)$  com entrada  $r_1(t)$  e  $x(t)$  com entrada  $r_2(t)$ . Assim, a linearidade é superposição e homogeneidade.

## 2.10 - Aumento em Cargas Não Lineares

Cargas não lineares estão continuamente aumentando. Estima-se que, durante a próxima 10 anos, mais de 60% das cargas nos sistemas de utilidade serão não lineares (HART, 1992). Também muito do crescimento da carga eletrônica envolve o setor residencial e eletrodomésticos (AKAGI, 1996; AHMAD *et al.*, 2014; PABLA, 2012).

Preocupações com harmônicos se originam de uma certa qualidade de energia, o que leva às questões relacionadas com (1) efeitos sobre o funcionamento de equipamentos elétricos, (2) análise e (3) controle harmônico (KHALID & DWIVEDI, 2011; GHOSH & LEDWICH, 2012; SINGH, CHANDRA & AL-HADDAD, 2014; GOMEZ-EXPOSITO, CONEJO, & CANIZARES, 2018; DAS, 2015).

Um número crescente de cargas de consumo sensível à baixa qualidade de energia, e estima-se que os problemas de qualidade de energia indústria dos EUA dezenas de bilhões de dólares por ano. Embora o uso ampliado do consumidor equipamentos de automação e eletrônica de potência estão levando a maior produtividade, essas cargas pesadas são uma fonte de ruído elétrico e harmônicos e são menos tolerantes a má qualidade de energia. Por exemplo,

os acionamentos de velocidade ajustáveis (ASDs) são menos tolerantes a quedas de tensão e aumentos em comparação com um motor de indução; e uma queda de tensão de 10% de determinada duração de tempo podem precipitar o desligamento do ASD (WILLIS, 1997; SCHWEPPE, *et al.*, 2013; CAMPBELL, 2012).

Estes geram harmônicos de linha e uma fonte contendo harmônicos impacta sua operação, levando a geração de harmônicos. Isto implica que as cargas não lineares que são uma fonte de geração de harmônicos são relativamente menos tolerantes ao pobre poder qualidade que se origina da emissão harmônica dessas cargas (ARRILLAGA & WATSON, 2004; DAS, 2015; BOLLEN, 2003; MAAS, 2003; GHOSH, & LEDWICH, 2012; CASE, 2003).

Alguns exemplos de cargas não lineares são os seguintes (BREITUNG, K.; RACKWITZ, 1982; THANEDAR *et al.*, 1986; ARGYRIS, 1955; TROGER, Hans; STEINDL, 2012; TROGER, Hans; STEINDL, 2012; KIM & PARK, 2010):

- Sistemas ASD
- Ciclo-conversores
- Fornos de arco
- Laminadores
- Fontes de alimentação do modo de comutação
- Computadores, copiadoras, televisores e eletrodomésticos
- Modulação de estouro de pulso
- Compensadores estáticos de var (SVCs)
- Reatores controlados por tiristor (TCRs)
- Transmissão HVDC, harmônicos originados em conversores
- Tração elétrica, circuitos de chopper
- Geração de energia eólica e solar
- Carregamento da bateria e células de combustível
- Esquemas de recuperação de frequência de deslizamento de motores de indução
- Iluminação Fluorescente e Balastros Eletrônicos
- Sistemas de carregamento de veículos elétricos
- Aquecimento com retificador controlado por silício (SCR), aquecimento por indução e soldagem a arco.

### ***2.10.1 Efeitos de Harmônicos***

Harmônicos causam distorções nas formas de onda de tensão e corrente, que têm efeitos adversos nos equipamentos elétricos (CIVIDINO, 1992; CHAPMAN, 2001; REDL, TENTI &

VAN WYK, 1997). A estimativa de harmônicos de não-lineares cargas é o primeiro passo em uma análise harmônica, e isso pode não ser simples (ACKERMANN & KNYAZKIN, 2002; DAVIS, EMANUEL & PILEGGI, 2000).

Existe uma interação entre o equipamento produtor de harmônicos, que pode ter topologias variadas e o sistema elétrico. Ao longo dos anos, muita atenção tem sido focada na análise e controle de harmônicos, e os padrões têm sido estabelecida para distorções de corrente e tensão harmônicas permissíveis (RODRIGUEZ & PENG, 2002; SINGH, 2009). Os efeitos das harmônicas são discutidos na aplicação do estudo de caso (XIA & HEYDT, 2002; PAPATHANASSIOU & PAPADOPOULOS, 2006).

Os harmônicos têm efeitos detectados em equipamentos elétricos. Estes podem ser discriminados como segue (IEEE. AREPORT PREPARED BY LOAD CHARACTERISTICS TASK FORCE, 1985):

1. Falha no banco de capacitores devido à sobrecarga reativa de potência, ressonância e amplificação harmônica. Operação de fusível incômodo.
2. Perdas excessivas, aquecimento, torques harmônicos e oscilações em máquinas de indução e síncronas, que podem gerar tensões de torção.
3. Aumento da carga de corrente de seqüência negativa de geradores síncronos, colocando em risco o circuito do rotor e os enrolamentos.
4. Geração de fluxos harmônicos e aumento da densidade de fluxo em transformadores, aquecimento por correntes parasitas e conseqüente desclassificação.
5. Sobretensões e correntes excessivas no sistema de potência, resultantes de ressonância.
6. Redução dos cabos devido a aquecimento adicional por corrente induzida e perdas de efeito nas perdas.
7. Interferência indutiva nos circuitos de telecomunicações.
8. Interferência de sinal em sistemas de estado sólido e controlados por microprocessador.
9. Avaria do relé.
10. A interferência afeta o controle e o controle dos sistemas de transporte, causando a desoperação dos sistemas, que realizam a comutação remota, o controle de carga e a medição.
11. Operação instável de circuitos de disparo baseados em detecção e travamento de cruzamento de tensão zero.
12. Interferência com controladores de motores grandes e sistemas de excitação de usinas de energia.

13. Possibilidade de ressonância subsíncrona.

14. Flicker.

As Cargas não lineares na presença de capacitores que podem gerar uma condição de ressonância com uma das harmônicas geradas pela carga, quando nenhuma existia antes. Isso também tem os seguintes efeitos adicionais:

- Aumentar a corrente de energização transitória dos transformadores e prolongar sua taxa de decaimento (WITTE, DE CESARO & MENDIS, 1994).
- Aumentar o dever nos dispositivos de comutação.
- A possibilidade de ressonância com corda parcial existe se a frequência predominante do transiente coincidir com a frequência natural do transformador.

## 2.11. Máquinas Rotativas

### 2.11.1 Motores de Indução

Os harmônicos produzem deformação elástica, isto é, deflexão do eixo, torques parasitários, ruído de vibração, aquecimento adicional e menor eficiência das máquinas rotativas. O movimento dos harmônicos é com ou contra a direção do fundamental. O critério de rotação para a frente ou para trás é estabelecido a partir de  $h = 6m \pm 1$ , onde a ordem da harmônica e da harmônica é diferente. Se  $h = 6m \pm 1$ , a radiação está na direção para frente, mas na velocidade de  $1h$ . Assim, 7, 13, 19,... harmônicos giram em uma direção igual à fundamental. Se  $h = 6m - 1$ , os harmônicos aromáticos entram em direção ao centro. Assim, 5, 11, 17,... são os harmônicos de rotação reversa. Harmônicos da ordem 2, 5, 8, 11, 14,... são os harmônicos de seqüência negativa. A magnitude da corrente harmônica em um motor de indução trifásico pode ser calculada a partir da expressão.

$$I_h = \frac{V_h}{h\omega_0 L_{lh}} \quad (2.39)$$

Onde:

$I_h$  é a  $h$ th corrente harmônica,  $V_h$  é a  $h$ th tensão harmônica e  $L_{lh}$  é o estator e o indutor de fuga do rotor do reator referenciado pela harmônica. A indutância efetiva tende a diminuir à medida que  $h$  aumenta. Aproximadamente  $L_{lh}$  é igual a  $L_l$  (reatância de fuga do estator), o valor mínimo quando a indutância da barra interna é insignificante. Um modelo preciso da impedância harmônica de um motor de indução é derivado.

Com certas suposições, as perdas harmônicas podem ser definidas como (IEEE. AREPORT PREPARED BY LOAD CHARACTERISTICS TASK FORCE, 1985).

$$\frac{P_h}{P_{RL}} = k \sum_{h=5}^{h=\infty} \frac{V_h^2}{h^3/V_1^2} \quad (2.40)$$

Onde:

$$k = \frac{(T_S/T_R)E}{(1 - S_R)(1 - E)} \quad (2.41)$$

$P_h$  é a perda harmônica,  $P_{RL}$  é a perda no ponto nominal com suprimento senoidal,  $T_S$  é o torque inicial,  $T_R$  é o torque nominal,  $S_R$  é o deslizamento e  $E$  é a eficiência. Nos motores NEMA classe C (NEMA, 1993),  $k$  pode variar até 25 ou mais.

Um índice de distorção do motor (MDI) é definido como

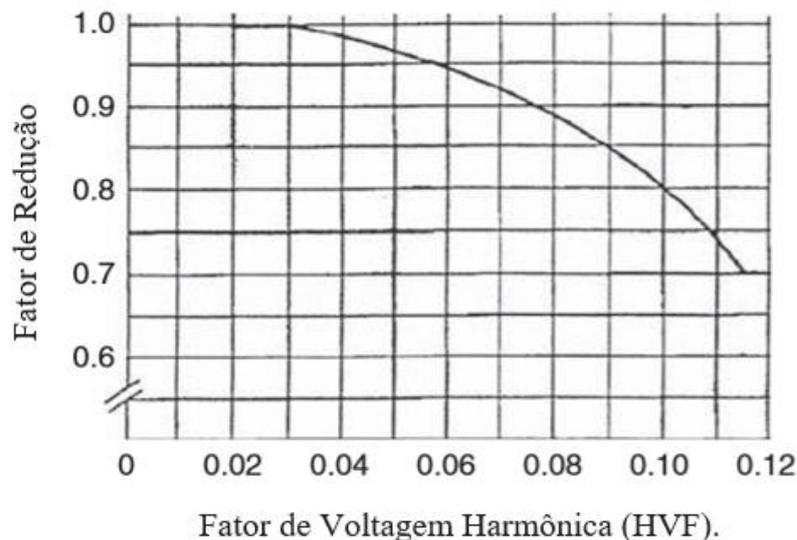
$$MDI = \frac{1}{V_1} \left( \sum_{H=5}^{H=\infty} \frac{V_h^2}{h^{3/2}} \right)^{1/2} \quad (2.42)$$

O uso da Eq. (2.42) permite uma comparação conveniente de diferentes projetos de motores, mas não avaliará o aquecimento localizado. Uma razão semelhante pode ser derivada apenas para o aquecimento do rotor. Os motores com grandes barras profundas ou gaiola dupla terão o maior aquecimento harmônico. Em uma análise detalhada, o efeito das harmônicas nas perdas do motor deve considerar a subdivisão dos vazios na corrente e na fricção, perda de cobre no estator, córtex, perda de cobre do rotor e perda no núcleo e nos condutores e o efeito das harmônicas em cada um desses componentes. A indutância de fuga efetiva do rotor e do estator diminui e a resistência aumenta com a frequência. Os circuitos equivalentes dos motores de indução para sequências positivas e negativas são mostrados no Capítulo 12 e o efeito das correntes de sequência negativa será mais pronunciado em frequências mais altas. A resistência do rotor pode aumentar de quatro a seis vezes o valor de CC, enquanto a reatância de vazamento pode reduzir a uma fração do valor da frequência fundamental. O aumento do teor de cobre no estator é proporcional à tendência da corrente atômica total de aumentar mais devido ao efeito da pele sobre a resistência em frequências mais altas. Os harmônicos contribuem para a saturação magnética, e o efeito da tensão distorcida nas perdas do núcleo não pode ser ignorado. Os principais componentes de perda influenciados pelas harmônicas são as perdas de cobre do

estator e do rotor e as perdas por dispersão. Um fator harmônico de 11% fornece aproximadamente 25% de redução de motores de uso geral.

A Figura 2.4 da NEMA (*North American Manufacturers Association* - Associação Norte-Americana de Fabricantes) (NEMA, 1993) mostra um fator de risco em relação ao fator de tensão harmônica, que é outro nome para o fator de distorção de tensão.

Figura 2.4: Curva de redução proposta devido ao fator de tensão harmônico (HVF) igual ao THDv, todas as máquinas.



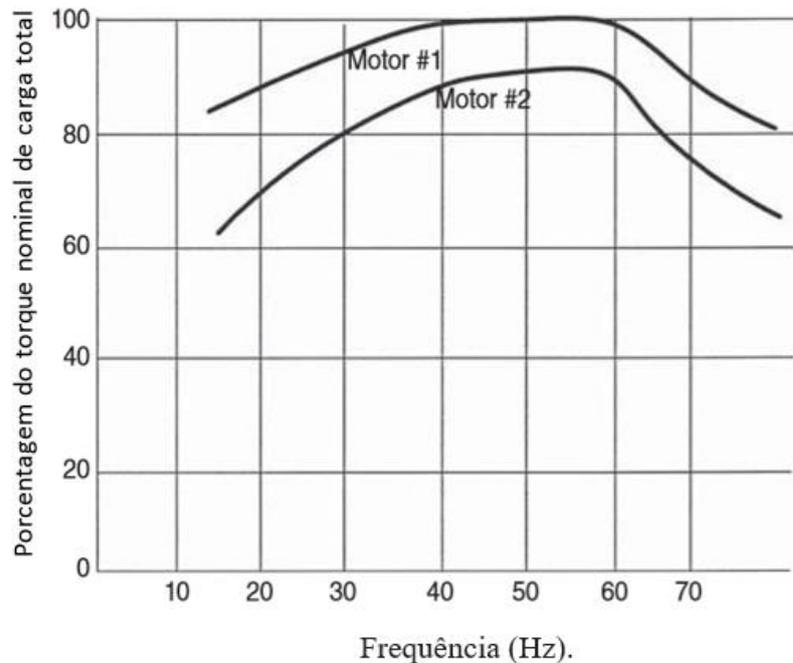
Fonte: NEMA Parte 30 (NEMA, 1993).

### 2.11.2 Redução de torque

Quando o motor é operado abaixo da velocidade nominal, a redução do torque ocorre devido à redução do resfriamento e a NEMA fornece as curvas de desclassificação. Em caso de operação do inversor, o torque é reduzido devido ao aumento adicional de temperatura devido a perdas harmônicas e também devido às características de frequência de tensão de alguns inversores. Ao determinar a redução da reserva térmica do motor é importante, e o fator de redução na frequência nominal pode variar de 0% a 20%. NEMA (NEMA, 1003) afirma que não existe um método estabelecido para determinar a curva de desclassificação de um determinado motor. O método preferido é testar amostras representativas dos projetos de motores sob carga enquanto opera a partir de um protótipo representativo do projeto do inversor e mede a elevação de temperatura dos enrolamentos. A Figura 2.5 é reproduzida da NEMA (NEMA, 1003). Para operação acima de 90 Hz em um nível de Hp necessário, pode ser necessário utilizar um motor com uma classificação maior de 60 Hz. Motores de 1,15 fatores de serviço são uma escolha melhor. As curvas de desclassificação na Figura 2.5 não são

específicas; duas curvas são fornecidas e rotuladas como "design # 1" e "design # 2". Isso indica que a redução do torque sob as mesmas condições operacionais é ditada pelo projeto do motor.

Figura 2.5: Exemplos de redução de torque dos motores NEMA quando usados com inversores.



Fonte: NEMA, parte 30 (NEMA, 1993).

### 2.11.3 Campos Pulsantes e Estresses Dinâmicos

Em uma máquina síncrona, a frequência induzida no rotor é a diferença rotacional líquida entre a frequência fundamental e a frequência harmônica. A quinta harmônica gira em sentido inverso em relação ao estator e em relação ao rotor, a frequência induzida é a do sexto harmônico. Similarmente, o sétimo harmônico giratório para a frente em relação ao estator produz o sexto harmônico no rotor.

A interação desses campos produz uma pulsação de 360 Hz e resulta nas oscilações do eixo. Da mesma forma, o par harmônico 11 e 13 produz um rotor harmônico de 12°. Se a frequência da ressonância mecânica existir perto desses harmônicos durante a partida, grandes forças mecânicas podem ocorrer. Os mesmos fenômenos ocorrem nos motores de indução. Considerando o deslizamento dos motores de indução, os harmônicos de sequência positiva,  $h = 1, 4, 7, 10, 13, \dots$ , produzem um torque de  $(h - 1 + s)\omega$  no sentido de rotação, e os harmônicos de sequência negativa,  $h = 2, 5, 8, 11, 14, \dots$ , produzem um torque de  $-(h + 1 - s)\omega$  oposto ao da rotação. Aqui,  $s$  é o deslize do motor de indução.

É possível que os torques harmônicos sejam ampliados devido a certas combinações de ranhuras do estator e do rotor, e os rotores da gaiola são mais propensos à circulação de correntes harmônicas quando comparados aos rotores que contém lesões.

Os harmônicos de sequência zero ( $h = 3, 6, \dots$ ) não produzem uma densidade de fluxo líquido. Estes produzem perdas ôhmicas. O campo harmônico sobre o fluxo principal pode causar a saturação do laser, e gera uma corrente magnética desequilibrada que se move ao redor do rotor. Como resultado, o eixo do rotor pode ser girado e tracionado com uma resistência mecânica significativa que amplifica as pulsações. Ondulações de torque podem existir em várias frequências. Se o inversor for do tipo de seis pulsos, é criada uma ondulação de torque de sexto harmônico, que varia de 36 a 360 Hz, quando o motor é operado na faixa de frequência de 6 a 60 Hz.

Em baixas velocidades, essa oscilação de torque pode ser aparente como oscilações observáveis da velocidade do eixo ou como pulsações de torque e velocidade, geralmente denominadas de *cogging*. Também é possível que algumas velocidades dentro da faixa operacional possam corresponder às frequências mecânicas naturais da carga ou da estrutura de suporte. Em tais frequências, a amplificação pode ocorrer, dando origem a grandes tensões dinâmicas. Operação diferente de momentânea, isto é, durante a partida, deve ser evitada nessas velocidades. Os osciloscópios em geradores síncronos permitem estimular o gerador a um modo acoplado complexo de vibração que resulta em oscilações de torção dos elementos do rotor e flexão dos baldes da turbina. Se a frequência de um harmônico coincide com a frequência de torção do gerador de turbina, ele pode ser amplificado pela oscilação do rotor. Um caso documentado de falha de um grande gerador é descrito na Ref. (IEEE. WORKING GROUP J5 OF ROTATING MACHINERY PROTECTION SUBCOMMITTEE, POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2000).

Um circuito de controle dentro de uma unidade SVC em uma usina siderúrgica próxima resultou em modulação da forma de onda de 60 Hz. Isso criou bandas laterais superiores e inferiores, produzindo componentes atuais de 55 e 65 Hz. A rotação de fase reversa manifestou-se como uma frequência de estimulação de 115 Hz no rotor, que oscilou entre 114 e 118 Hz. Esta frequência natural do sexto modo excitada do eixo do rotor, criando grandes tensões de torção.

#### ***2.11.4 Efeito do tipo e comprimento do cabo***

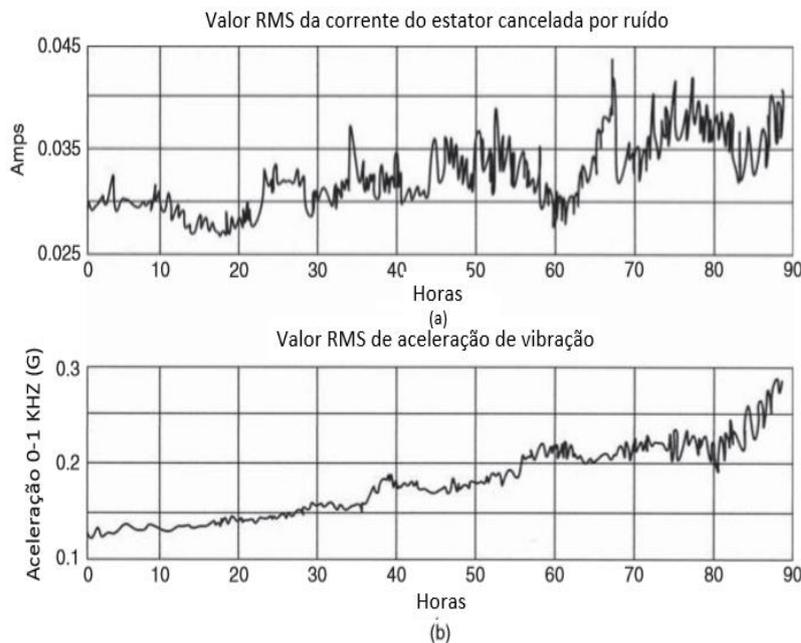
Quando o motor é conectado através de cabos longos, os altos pulsos  $dv/dt$  gerados pelos inversores PWM dão origem a fenômenos de onda viajantes nos cabos, resultando no reforço de ondas incidentes e refletidas devido à descontinuidade da impedância nos terminais do motor. As tensões podem atingir o dobro da tensão de saída do inversor. A relação de impedância cabo-a-motor e o comprimento de passagem do cabo são fatores importantes em relação aos coeficientes de reflexão. Uma analogia pode ser desenhada com longas linhas de transmissão e fenômenos de ondas viajantes. A onda viajante incidente é refletida nos terminais do motor, e ocorre o reforço de ondas incidentes e refletidas.

A presença de raios-coletores ópticos e a resistência ao balão, o amortecimento ocorre quando a onda é refletida de uma extremidade do cabo para a outra. A frequência de toque é uma função do comprimento do cabo e da velocidade de propagação da onda e é da ordem de 50 kHz a 2 MHz (BENTLEY & LINK, 1997).

Uma verificação aproximada da possibilidade de duplicação de tensão pode ser feita pelo seguinte cálculo:

$$L_c = \frac{vt_r}{2} \quad (2.43)$$

Figura 2.6 (a) O valor *rms* da corrente do estator com cancelamento de ruído aumenta à medida que a falta se desenvolve; o rolamento está. (ZHOU, HABETLER & HARLEY, 2009).



Fonte: (ZHOU, HABETLER & HARLEY, 2009).

Onde:

$L_c$  é o comprimento crítico do cabo

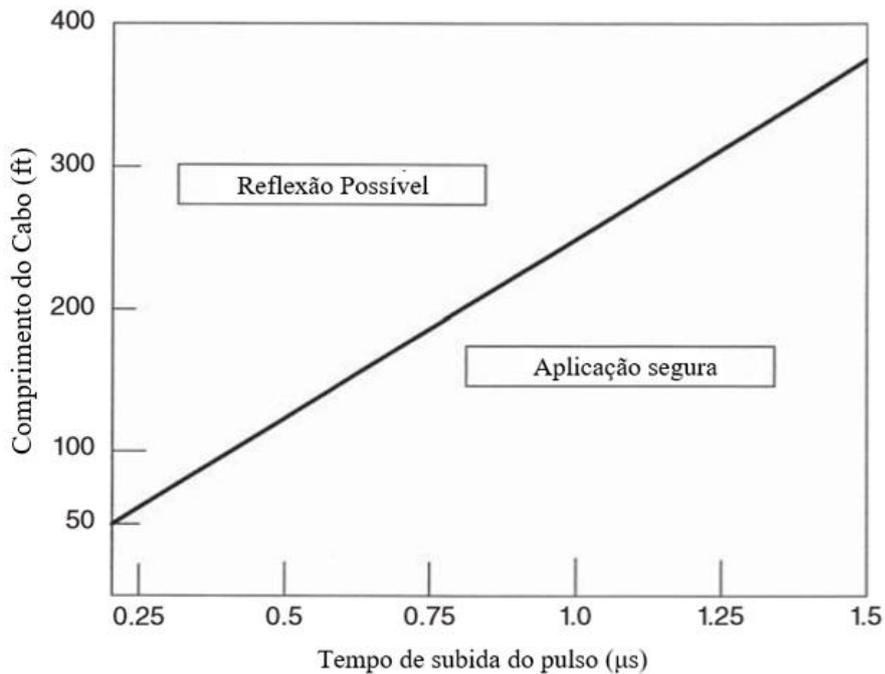
$v$  é a velocidade de propagação no cabo, que pode ser tomada como 50% da velocidade da luz  
 $= 150\text{m}/\mu\text{s}$

$t_r$  é o tempo de subida do pulso em microssegundos.

Para o mais rápido IGBT,  $t_r = 0.1\mu\text{s}$ . Isso dá comprimento de cabo crítico de 7.5m, e para o aumento de pulso mais lento de  $4.0\mu\text{s}$ ,  $L_c = 360\text{m}$ .

A Figura 2.7 é construída nessa base; veja também a Tabela 2.4.

Figure 2.7: Cable length versus pulse rise time that is likely to cause reflection.



Fonte: (BENTLEY & LINK, 1997).

Tabela 2.4: Comprimento Mínimo do Cabo e Tempo de Elevação do PWM

PWM do Tempo de Subida	Comprimento do Cabo Mínimo
0,1	19
0,5	97
1.0	195
2.0	390
3.0	585
4.0	780

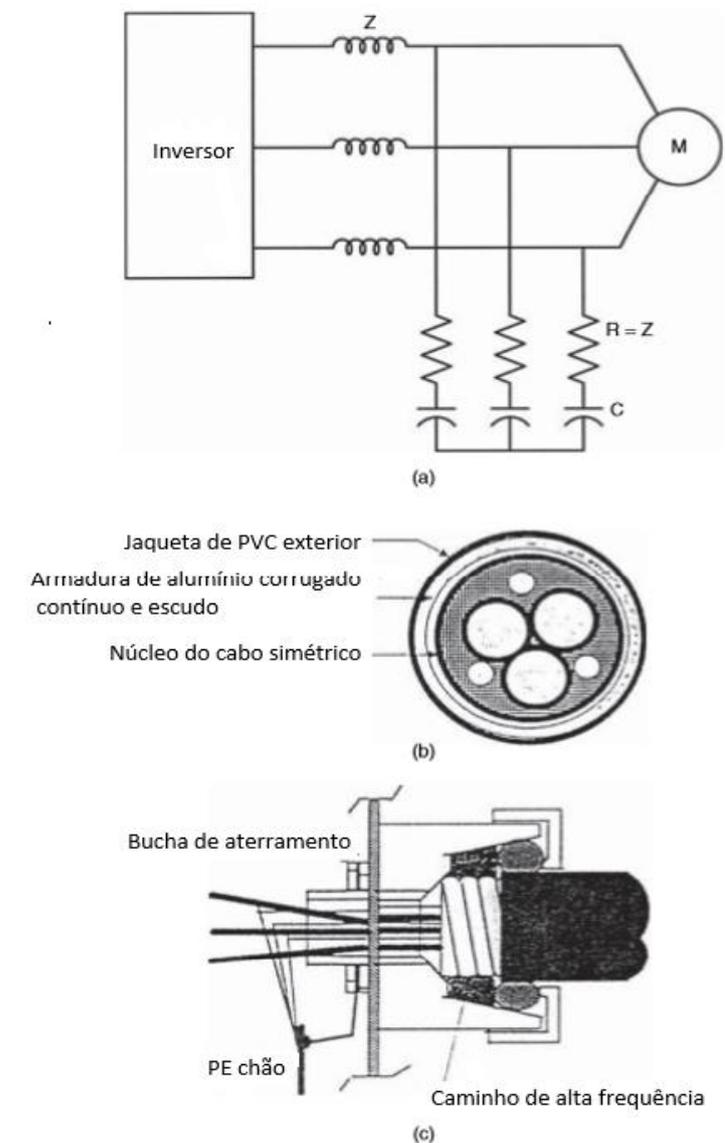
Fonte: (BENTLEY & LINK, 1997).

Correntes nos circuitos de aterramento dos equipamentos do National Electric Code (NEC):

- Corrente de modo comum • Tensão do quadro do motor para PE (Terra de proteção, uma terminologia IEC) aterrada no motor.

- Conversão entre circuitos de motor adjacentes. Recomenda-se que a blindagem elétrica esteja conectada corretamente à terra e que um condicionador simétrico (condutores de três planos), e um cabo de aço inoxidável revestido contínuo, NEC tipo cabo-metal-clad, seja usado (ver Figura 2.8 (b) e (c)). no motor). Por meio de filtros de saída, o carregamento simultâneo, bem como as tensões elétricas no isolamento do motor, pode ser reduzido. Os tipos de filtro comuns são os seguintes:

Figure 2.8: (a) Output filter at motor terminal stop to prevent reflections, (b) cable construction for ASDs, and (c) cable termination.



Fonte: NEC, (1998).

Um filtro RC de primeira ordem (consistindo de uma resistência e capacitância em série conectada à terra nos terminais do motor) pode ser adicionado nos terminais do motor para

limitar as tensões de tensão (JOUANNE, ENJETI & GRAY, 1996). Se limitarmos a onda invertida nos terminais do motor a não mais de 0,2 vezes a onda incidente, então a tensão do terminal no motor é limitada a 20% acima da tensão do DC do inversor. Faça  $R =$  impedância de surto do cabo  $= Z$ , e o valor de  $C$  é dado pela expressão:

$$C = \frac{l_c C_c}{0.22314} \quad (2.44)$$

Onde:

$l_c$  é o comprimento do cabo em pés e  $C_c$  sua capacitância por pé (Fig. 8.9 (a)). O tipo de cabos entre o motor e o sistema de acionamento é importante. Para (BENTLEY & LINK, 1997) relata os resultados dos testes de vários tipos de cabos no que diz respeito às seguintes questões:

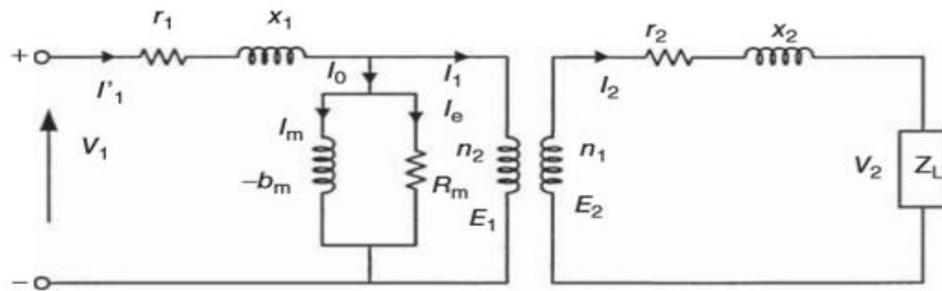
## 2. 12 Transformadores

Um transformador que fornece carga não linear pode ter que ser reduzido. O limite superior do fator de distorção atual é de 5% da corrente de carga, e o transformador deve ser capaz de suportar 5% de carga livre de sobrecarga e 10% na carga. As correntes harmônicas na tensão aplicada não devem exceder esses limites (AHUJA, 1997; SHORT, 2018).

Além de reduzir as correntes harmônicas e evitar a perda de corrente, um transformador do sistema de acionamento pode ser submetido a qualquer demanda atual de ciclagem e carga, dependendo do sistema de acionamento (FUCHS & MASOUM, 2011; DE KOCK & STRAUSS, 2004).

O modelo linear de um transformador de dois enrolamentos e seu circuito equivalente e diagrama fasorial foram desenvolvidos nas Figuras. 2.9 e 2.10.

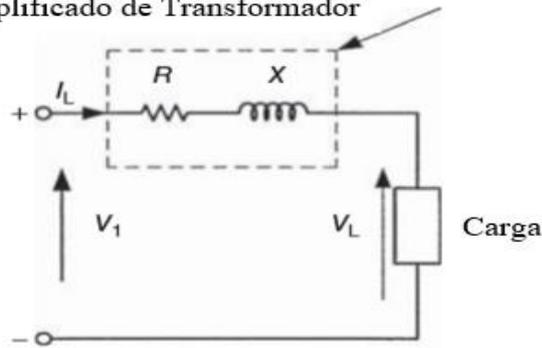
Figura 2.9 (a) Circuito equivalente de um transformador de dois enrolamentos, (b) circuito equivalente simplificado.



Transformador ideal

(a) Razão =  $n_1/n_2$

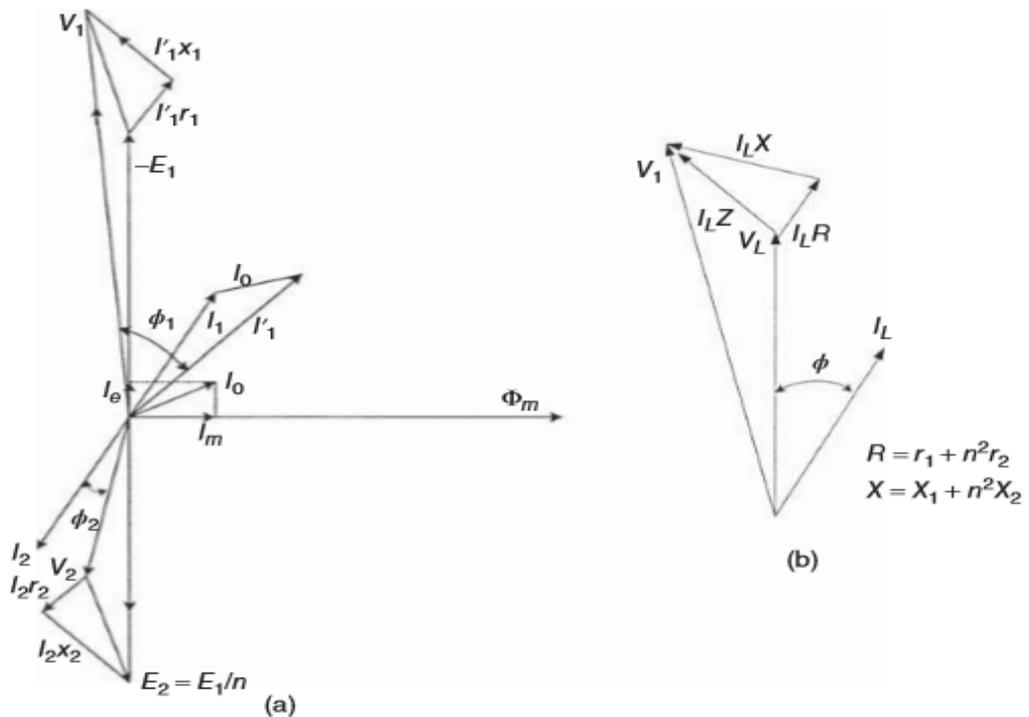
Modelo Simplificado de Transformador



(b)

Fonte: DAS, (2015).

Figura 2.10 (a) Diagrama fasorial correspondente ao circuito equivalente da Fig. 2:10 (a), (b) diagrama fasorial correspondente à Figura 2.9 (b).



Fonte: DAS, (2015).

As expressões para histerese e perda de corrente parasita são dadas nas equações (2.45) e (2.46). Em uma base simplificada, o modelo de sequência positiva ou sequência negativa do transformador é dado pela sua porcentagem de reatância especificada pelo fabricante, geralmente na base de classificação MVA do transformador natural resfriado, Oil Natural Air Natural (ONAN), essa reatância permanece relativamente constante e é obtida por um teste de curto-circuito no transformador. Os componentes do circuito de magnetização são obtidos por um teste de circuito aberto.

A expressão para perda de histerese é

$$P_h = K_h f B_m^s \quad (2.45)$$

Onde:

$K_h$  é uma constante e  $s$  é o expoente de Steinmetz, que varia de 1,5 a 2,5, dependendo do material do núcleo; geralmente, é igual a 1.6.

A perda de corrente parasita é:

$$P_e = K_e f^2 B_m^2 \quad (2.46)$$

Onde:

$K_e$  é uma constante. Perda de corrente parasita ocorre em laminações de núcleo, condutores, tanques e placas de fixação.

A perda do núcleo é a soma da perda de corrente parasita e histerese. Na Figura 2.10 (a), o ângulo do fator de potência primário  $\phi_1$  e  $>\phi_2$ .

As perdas por histerese e corrente parasita constituem perdas sem carga, e estas podem ser determinadas pelo teste de circuito aberto. O teste é realizado com tensão secundária de circuito aberto e tensão nominal aplicada ao enrolamento primário. Para transformadores de alta voltagem, a ligação secundária pode ser citada e a torção primária aberta. Na frequência aplicada constante, o  $B_m$  é diretamente proporcional à tensão aplicada e a perda do núcleo é aproximadamente proporcional a  $B_m^2$ . A corrente de magnetização sobe abruptamente em baixas densidades de fluxo, e depois mais baixa do que o normal, atingindo a máxima permeabilidade e, a partir de então, novamente acentuadamente, à medida que a saturação se instala.

Da Figura 2.9 (a), a admitância de circuito aberto é:

$$YOC = g_m - jb_m \quad (2.47)$$

Isso negligência a pequena queda de tensão entre  $r_l$  e  $x_l$ . Então:

$$g_m = \frac{P_0}{V_1^2} \quad (2.48)$$

Onde:

$P_0$  é a potência medida e  $V_1$  é a tensão aplicada. Além disso:

$$b_m = \frac{Q_0}{V_1^2} = \sqrt{\frac{S_0^2 - P_0^2}{V_1^2}} \quad (2.49)$$

Onde:

$P_0$ ,  $Q_0$  e  $S_0$  são a potência ativa medida, potência reativa e volt-ampères em circuito aberto. Observe que a tensão de excitação  $E_1$  (Figura 2.10 (a)) não é igual a  $V_1$  devido a queda de tensão que a corrente sem carga produz através de  $r_1$  e  $x_1$ . Correções podem ser feitas para esta queda. Quando o secundário não tem carga e está em circuito aberto, alguma pequena quantidade de corrente flui através de  $r_1$ , o que dá alguma perda de cobre, pode ser contabilizado nos cálculos.

O teste de curto-circuito é realizado em a corrente nominal do enrolamento, que é em curto e uma tensão reduzida é aplicada ao outro enrolamento para circular um atual:

$$P_{SC} = I_{SC}^2 R_1 = I_{SC}^2 (r_1 + n^2 r_2) \quad (2.50)$$

Onde:

$P_{sc}$  é a potência ativa medida em curto-circuito e é o representante de Perda de cobre, e  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito:

$$Q_{SC} = I_{SC}^2 X_1 = I_{SC}^2 (x_1 + n^2 x_2) \quad (2.51)$$

- **Perdas Fixas:** Consistem de perda de corrente parasita e histerese (perda de núcleo e perdas dielétricas), dadas pelo teste sem carga e corrigidas pela perda sem carga do I<sup>2</sup>R. A perda por histerese é responsável por 75% a 80% da perda do núcleo.
- **Perda Direta:** Perda de cobre nos enrolamentos primário e secundário, que dependerá da corrente de carga e seu fator de potência.
- **Perda de carga por atropelamento:** A perda de carga por extravio inclui perdas por correntes parasitas em condutores e outras partes dos transformadores, como paredes de tanques e peças de construção.

- **Perdas do sistema de resfriamento:** Essas perdas são responsáveis pelos ventiladores para resfriamento forçado e bombas de óleo forçado. Um fabricante pode especificar as perdas conforme mostrado na Tabela 2.5.

Observe que a perda não é especificada separadamente na Tabela 2.5, mas pode ser calculada.

É essencial obter os dados reais da perda do transformador antes dos cálculos para desclassificação do transformador para cargas não lineares pode prosseguir.

A Figura 2.11 da Ref. (IEEE STANDARD C57.110, 2008) mostra o campo eletromagnético produzido pela corrente em um transformador tipo núcleo. Cada condutor metálico induziu tensões que produzir correntes parasitas. A perda de corrente parasita é dissipada na forma de calor. A perda de corrente pode ser dividida em duas partes: a que ocorre no enrolamento chamada “perda atual”, e a parte externa dos enrolamentos é chamada de “outra perda perdida”.

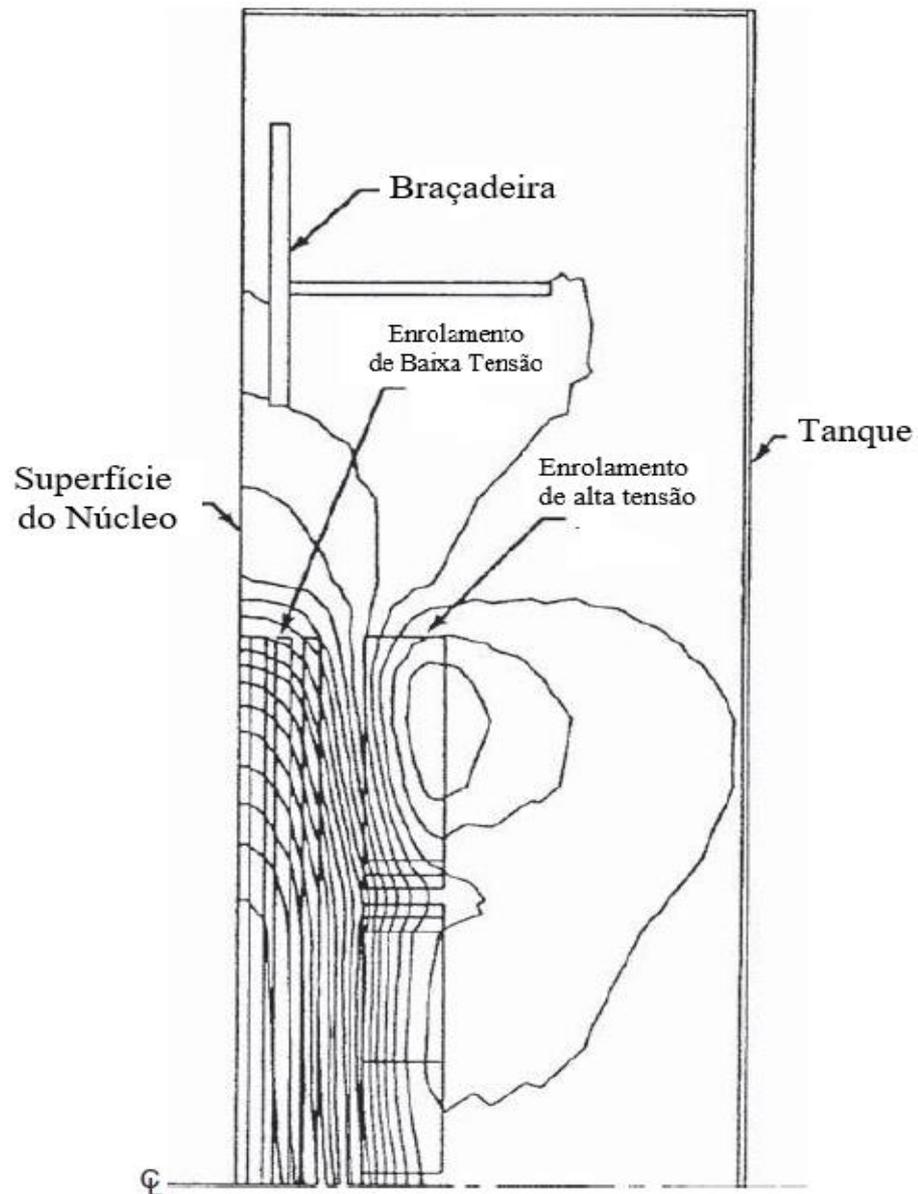
Enrolamento interno de um transformador tipo núcleo tem maior perda porque o fluxo eletromagnético tem tendência a franja em direção ao caminho de baixa relutância da perna central. Também o mais alto redemoinho perdas atuais ocorrem nos condutores finais do enrolamento interno, uma vez que esta região tem densidade de fluxo eletromagnético radial. O padrão (IEEE STANDARD C57.110, 2008) simplifica hipóteses sobre as proporções relativas de perda de corrente parasita no interior e enrolamentos externos para cálculos de redução do transformador.

Tabela 2.5: Dados do teste do transformador.

Teste/Parâmetros	Resultados/Testes	Observações
Resistência do enrolamento	Medido entre H1-H2, H1 – H3 e H2 – H3 Medido entre X1 – X2, X1 – X3 e X2 – X3	Variação entre medições, temperatura de medição e valores médios são indicados. As medições são fornecidas em todas as torneiras
Perda do núcleo	Teste de tensão e frequência, tensão média, amperes e watts.	Fornecido em 90%, 100%, e 110% da voltagem na saída nominal.
Perda de enrolamento (perda de cobre mais perda de carga perdida)	Média de amperes, watts tensão <i>rms</i> , frequência, temperatura de teste e tensão em MVA nominal.	Fornecido em vários primários tap voltagens e Correspondente impedâncias do transformador corrigido a 75°C.

Fonte: (IEEE STANDARD C57.110, 2008).

Figura 2.11: Fluxo eletromagnético em um transformador tipo de núcleo em carregando, ver texto.



Fonte: (IEEE STANDARD C57.110, 2008).

## CAPÍTULO 3

### QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E NORMAS

#### 3.1 - Introdução

A qualidade do fornecimento de energia elétrica tem ocupado cada vez mais importância tanto para as distribuidoras quanto para os consumidores desta energia, neste capítulo discutiremos sobre qualidade de energia elétrica (QEE) e normas técnicas nacionais e internacionais que estabelecem os limites de qualidade que o sistema elétrico deve cumprir para oferecer um bom serviço elétrico aos consumidores (LIN & JIANG, 2011; PÉREZ-LOMBARD, 2011).

Atualmente o sistema elétrico vem experimentando um aumento da sua capacidade de geração, transmissão e distribuição (DUGAN & MCDERMOTT, 2002). Os avanços da tecnologia ocorridos nas últimas décadas propiciaram a obtenção de grandes desenvolvimentos na área da eletrônica, o aumento da utilização de cargas não lineares por consumidores residenciais, comerciais e industriais, tem exigido das concessionárias de energia uma preocupação cada vez maior em relação à qualidade da energia elétrica nos sistemas elétricos de potência (KISHOR, SAINI, & SINGH, 2007; KUSKO & THOMPSON, 2007). Tais cargas conhecidas como “Não-lineares” ou “Cargas Elétricas Especiais” provocam distorções de tensão e/ou corrente nas redes elétricas (FAURI, 1997).

As normas nacionais e internacionais definidas para o controle da distorção das formas de onda de tensão (THD<sub>v</sub>) e corrente (THD<sub>i</sub>), são recomendadas por normas onde se destacam: a IEEE Std. 519-2014 (Revisão da IEEE Std 519-1992) e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEC 61000-4-7 Ed. 2.1 (2009-10), IEC 61000-4-30 Ed. 2.0 (2008-10) (LEITE, 2013). No Brasil, a ANEEL, dispõe dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST – Módulo 8 - Revisão 10, Resolução Normativa nº 794/2017, data de vigência 01/01/2018).

#### 3.2 Conceitos Gerais de Qualidade de Energia

Qualidade de energia elétrica é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permitem os equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil (WRIGHT & CHRISTOPOULOS, 2012; MARIANI & MURTHY, 2012). A expressão é usada para descrever a energia elétrica que aciona uma carga elétrica, fazendo-a operar corretamente. Sem uma alimentação adequada,

com certo padrão de qualidade, a carga pode operar inadequadamente ou incorretamente, falhar prematuramente ou simplesmente não funcionar (LAKERVI e HOLMES, 1995; BOLLEN & GU, 2006).

As concessionárias de energia elétrica e usuários finais de energia elétrica estão se tornando cada vez mais preocupados com a qualidade da energia elétrica. O termo qualidade de energia tornou-se um dos chavões mais prolíficos da indústria de energia desde o final da década de 1980. É um conceito genérico para uma infinidade de diversos tipos de distúrbios do sistema de potência. As questões que recaem sob esse assunto não são necessariamente novos. O que é novo, é que os engenheiros estão agora tentando lidar com estas questões, utilizando uma abordagem do sistema, em vez de lidar com eles como problemas individuais (DUGAN *et al.*, 2004).

Em (DUGAN *et al.*, 2004), define qualidade de energia como sendo qualquer problema manifestado no desvio da corrente, tensão ou de frequência que resulte em falhas ou falhas de operação dos equipamentos dos clientes. Não pode haver definições completamente diferentes para qualidade de energia, dependendo em um de quadro de referência. Por exemplo, um utilitário pode definir a qualidade de energia com confiabilidade e demonstrando estatísticas de que o seu sistema é 99,98 por cento confiáveis. Os Critérios estabelecidos pelas agências reguladoras são geralmente nesse sentido. O fabricante de equipamentos de carga pode definir a qualidade de energia como as características do fornecimento de energia que permitem que o equipamento funcione adequadamente. Essas características podem ser muito diferentes para diferentes critérios (GREBE, 1995; SINGH, CHANDRA & AL-HADDAD, 2014; VEDAM & SARMA, 2008).

### **3.3 Distorções Harmônicas**

Harmônicos são correntes ou tensões senoidais de frequências múltiplas (de inteiros) da frequência que o sistema é designado a operar (ARRILLAGA & WATSON, 2004). Os componentes harmônicos, combinados com a tensão ou corrente fundamentais, produzem alterações na forma de onda. A distorção harmônica existe devido a características não lineares de dispositivos e cargas do sistema elétrico. A distorção de tensão resulta da queda de tensão provocada pela passagem de corrente (injetada por uma carga não linear) pela impedância do sistema (FUCHS & MASOUM, 2011).

É importante ressaltar que a distorção harmônica é um fenômeno que deve ser tratado como sendo de regime permanente. A distorção de forma de onda, provocada pelos componentes harmônicos, deve estar presente, continuamente, por pelo menos alguns segundos (ARRILLAGA, SMITH, WATSON AND WOOD, 1997).

Segundo Duganet *al* (2004), com a presença dos harmônicos nos sistemas elétricos, os mesmos passam a não operar mais em condições senoidais, logo as simplificações realizadas por engenheiros nas análises para a frequência fundamental não são mais aplicáveis.

A presença de harmônicos num sistema elétrico provoca distorções na forma de onda da tensão e da corrente, uma vez que os mesmos se somam à componente fundamental. Além disso, os harmônicos são gerados por equipamentos ou cargas que apresentam características não lineares entre tensão e corrente (SINGH, 2009).

O IEEE 519-2014, aplicam-se os seguintes termos e definições. O 3<sup>a</sup>. harmônico (componente): Um componente de ordem maior que uma das séries de Fourier de uma quantidade periódica. Por exemplo, em um sistema de 60 Hz, a harmônica 3<sup>a</sup>. ordem, também conhecida como "terceira harmônica", é 180 Hz (JAIN, JAIN & SINGH, 2017).

### 3.3.1 Ordem Frequência e Sequências das Harmônicas

Os sinais harmônicos são classificados quanto a sua ordem, frequência e sequência conforme tabela 1 a seguir. Em se tratando de sistemas elétricos trifásicos equilibrados, quando a decomposição de uma forma de onda de tensão ou corrente distorcida, as ordens harmônicas advindas desta decomposição em termos de componentes simétricos. Em uma situação ideal, onde somente existisse um sinal de frequência 60 Hz, apenas existiria a harmônica de ordem 1, chamada de fundamental (ARRILLAGA & WATSON, 2004; FUCHS & MASOUM, 2011).

A tabela 1 a seguir, veremos dois tipos de harmônica: as ímpares e pares. As ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral e as harmônicas pares existem nos casos de haver assimetrias do sinal devido a presença de componentes contínuas. A sequência pode ser positiva, negativa ou nula (zero). Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico alimentado por quatro condutores (3F+ N), as harmônicas de sequência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando assim, uma sobre corrente nos seus enrolamentos, que provocaria um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor. Essas harmônicas de sequência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores, etc. (MORENO, 2001).

Tabela 3.1 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
-------	-----------------	-----------

1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
<i>n</i>	<i>n.60</i>	-

Fonte: MORENO, (2001).

Em sistemas significativamente desequilibrados, cada harmônico pode ser decomposto nas três componentes simétricas, ou seja, sequência positiva, sequência negativa e sequência zero. As harmônicas de sequência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de sequência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somasse as correntes algebricamente no condutor neutro, isso implica que podem ocorrer situações em que pelo condutor neutro pode circular uma corrente de terceira ordem que é três vezes maior que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase. Com isso, ocorrem aquecimento excessivo do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores, etc. (MORENO, 2001).

A natureza e a intensidade dos harmônicos gerados por cargas não lineares dependem de cada carga especificamente, mas três aspectos devem ser considerados gerais: – É um fenômeno contínuo, ou seja, de longa duração; – Devido ao comportamento similar no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da quase totalidade das cargas, os harmônicos de ordem ímpar são mais frequentes e com maior intensidade e, por isso, geralmente são os causadores de problemas; – Quanto maior a ordem ou frequência do harmônico menor sua intensidade. Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, utilizam-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda (RUOTOLO, *et al.* 1996; RAO, 2013).

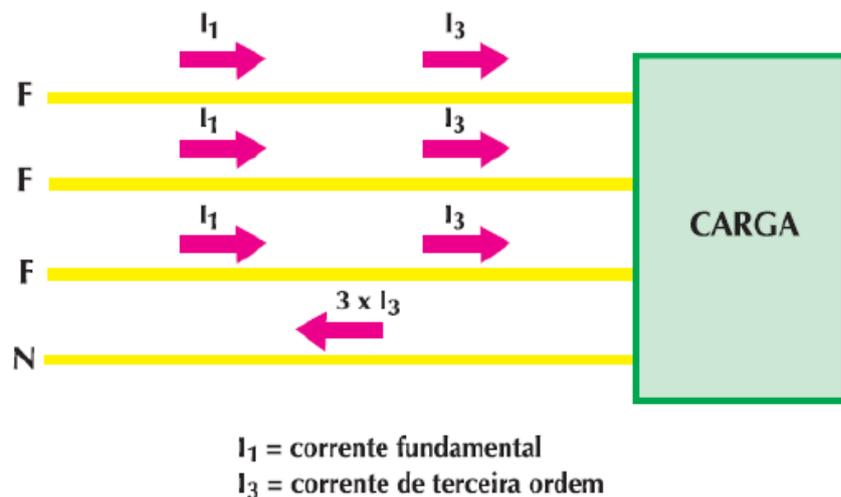
A natureza e a intensidade dos harmônicos gerados por cargas não lineares dependem de cada carga especificamente, mas três aspectos devem ser considerados gerais:

- É um fenômeno contínuo, ou seja, de longa duração;

- Devido ao comportamento similar no semiciclo positivo e no semiciclo negativo da quase totalidade das cargas, os harmônicos de ordem ímpar são mais frequentes e com maior intensidade e, por isso, geralmente são os causadores de problemas;
- Quanto maior a ordem ou frequência do harmônico menor sua intensidade.

Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, utilizam-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda. Um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como para correntes (MORENO, (2001).

*Figura 3.1 - Harmônico de sequência zero.*



Fonte: MORENO, (2001).

Normalmente, quando a análise de componentes harmônicos de tensão e/ou corrente é realizada sobre os sistemas de eletrônicos de potências, não levasse em consideração a extração das frequências harmônicas acima da 63ª ordem, pois os equipamentos necessitariam de maior precisão, a qual viria acompanhada por um alto custo associado ao equipamento de inferência. (DUGAN *et al.*, 2004).

### 3.3.2 Cargas não-lineares

Carga não-lineares é aquela que, quando alimentada com tensão senoidal, absorve uma corrente não senoidal, ou seja, a carga não linear tem a característica de deformar a forma de onda da corrente absorvida. Nesta definição está implícito que se trata de um regime permanente senoidal, por isso, se diz que uma carga linear é aquela onde existe uma proporcionalidade entre tensão e corrente através de uma impedância  $Z$  qual afeta a amplitude e a fase da corrente mantendo a forma de onda senoidal; o mesmo não acontece com as cargas não lineares que deformam a forma de onda e por isso também são chamadas de cargas deformantes (VERTIGAN, 2017; SUWANAPINGKARL, 2012).

Cargas não lineares causam correntes distorcidas mesmo quando alimentadas por uma fonte com tensão não distorcida (senoidal). Se uma tensão distorcida é aplicada sobre uma carga linear, a forma de onda da corrente na carga será distorcida como a tensão. Entretanto, se uma carga não linear é alimentada por uma tensão não senoidal, a forma de onda da corrente será distorcida por causa da tensão distorcida e da não linearidade da carga (BLANCO, 2015). Em quaisquer desses casos, a relação entre a tensão e a corrente não é constante (MUSCAS, 1998).

Os dispositivos geradores de harmônicas estão presentes em todos os sectores industriais, terciários e domésticos. As harmônicas são o efeito de cargas não lineares. Uma carga é dita não linear quando a corrente que ela absorve não tem a mesma forma que a tensão que a alimenta. Tipicamente, as cargas que utilizam electrónica de potência são não lineares (MACHOWSKI, 1997; NADERI, *et al.* 2018).

Exemplos de cargas não lineares: informática, pontes retificadoras, variadores de velocidade, fornos a arco, iluminação fluorescente (PHIPPS, NELSON & SEN, 1994; EMANUEL & MCNEILL, 1997; SONI & SONI, 2014).

Estas são cargas nas quais a corrente que por ela circula não é diretamente proporcional á tensão fornecida. Por conseguinte, qualquer carga que requisita uma corrente não senoidal de uma tensão senoidal é não linear (XIA & HEYDT, 1992; CHAPMAN, 2001).

### **3.4 Normas de Qualidade de Energia**

A preocupação com a qualidade da energia eléctrica fornecida aos consumidores nasceu junto com as primeiras experiências comerciais relacionadas com a geração, a transmissão e a distribuição de energia, no século XIX. Já em 1934 a legislação brasileira estabelecia, em seu Código de Águas, os primeiros indicadores de controle sobre esta qualidade (DE OLIVEIRA, 2003).

É decorrente em parte da reformulação que o setor elétrico vem experimentando, para viabilizar a implantação de um mercado consumidor, no qual o produto comercializado passa a ser a própria energia elétrica (VISCUSI *et al.*, 2005; ANTONOVA, 2015).

As normas de qualidade de energia compreendem um conjunto de regulações que estabelecem os limites de qualidade que o sistema elétrico deve cumprir para oferecer um bom serviço elétrico aos consumidores.

As normas e recomendações internacionais também são usadas como referência para a avaliação da qualidade da energia elétrica. São elas:

Padrões do IEEE mais comuns usados em QE:

- IEEE 446 - *Emergency and Standby Power*
- IEEE 519 - *Harmonic Control*
- IEEE 1001 - *Interface with Dispersed Generation*
- IEEE 1100 - *Power and Grounding Electronics*
- IEEE 1159 - *Monitoring Power Quality*
- IEEE 1250 - *Service to Critical Loads*
- IEEE 1346 - *System Compatibility in Industrial Environments*
- IEEE 1366 - *Electric Utility Reliability Indices*

Padrões do IEC mais comuns usados em Qualidade de Energia:

- IEC 61000-2-2 - *General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto*
- IEC 61000-2-4 - *Compatibility levels in industrial plants low frequency conducted disturbances*
- IEC 61000-4-7 - *Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling public low-voltage power supply systems*
- IEC 61000-4-11 - *Voltage dips/interruptions/variation immunity*
- IEC 61000-4-14 - *Voltage fluctuation immunity*
- IEC 61000-4-13 - *Harmonics/interharmonics immunity*
- IEC 61000-4-15 - *Flicker meter*
- IEC 61000-4-16 - *Test for immunity to conducted common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz*
- IEC 61000-4-17 - *Ripple on d.c. input power port, immunity test*

- IEC 61000-4-27 - *Unbalance, immunity test*
- IEC 61000-4-28 - *Variation of power frequency, immunity test*
- IEC 61000-4-29 - *Voltage dips, short interruptions and voltage variations on D.C. input power port, immunity tests*
- IEC 61000-4-30 - *Power quality measurements methods*

No Brasil a ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica, autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foi criada para regular o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997.

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST Módulo 8 trata da Qualidade da Energia Elétrica a versão vigente, revisão 10 tem como data de vigência, o período a partir de 01/01/2018.

O PRODIST estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço.

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição.

### **3.4.1 Norma IEC 61000-3-6 de Compatibilidade Eletromagnética**

A série 61000 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) compreende um amplo conjunto de regulações sobre a qualidade de energia. Em particular, a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 61000-3-6, 2008) estabelece os limites de emissão de harmônicos para as instalações conectadas a sistemas elétricos de potência. Para a tensão elétrica esta norma define:

1) A Distorção Harmônica Total de Tensão (%THDV). Calculada como a relação entre a tensão *rms* dos harmônicos superiores considerados e a tensão fundamental (V<sub>1</sub>), apresentado em (1) (LEITE, 2013).

$$\%THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (1).$$

2) A Distorção Harmônica Individual de tensão de ordem  $h$  (%IHDV $_h$ ). Calculada como a relação entre a tensão de um harmônico individual ( $V_h$ ) e a tensão fundamental de acordo com (2) (LEITE, 2013).

$$\%IHDV_h = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (2).$$

A referência norma estabelece dois tipos de limites: (1) níveis de compatibilidade como é mostrado na Tabela 2 e (2) níveis de planejamento, como apresentado na Tabela 3. Quando as emissões de harmônicos das cargas não lineares não superam os níveis de compatibilidade estabelecidos, assegura-se uma boa qualidade de energia. Por outro lado, os níveis de planejamento (mais restritivos que os de compatibilidade) são seguidos como guias para o planejamento do sistema e os mesmos asseguram o cumprimento dos níveis de compatibilidade (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

*Tabela 3.1 - Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa (BT) e média tensão (MT).*

Ímpares não múltiplas de 3		Ímpares múltiplas de 3		Pares	
Ordem de Harmônico $h$	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico $h$	Tensão Harmônica %	Ordem de Harmônico $h$	Tensão Harmônica %
5	6	3	2	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
$17 \leq h \leq 49$	$2.27(17/h) - 0.27$	$21 \leq h \leq 45$	0.2	$10 \leq h \leq 50$	$0.25(10/h) + 0.25$

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008; LEITE, 2013).

Os limites de harmônicos de tensão são estabelecidos para evitar os efeitos nocivos dos harmônicos em regime permanente e em curto prazo que se define como:

1) Efeitos de regime permanente são relacionados fundamentalmente a efeitos térmicos em capacitores, cabos, transformadores, motores e outros, e são medidos em média a intervalo de 10 minutos.

2) Efeitos a curto prazo que se manifestam em equipamentos eletrônicos sensíveis a níveis de harmônicos tendo como intervalo de interesse para registro a faixa de 3 segundos ou menos.

O nível de compatibilidade do THDV para média e baixa tensão é de 8% para harmônicos de regime permanente (intervalos de 10 minutos) e de 11% para harmônicos de curta duração (intervalos menores que 3 segundos). Os limites de compatibilidade da Tabela 2 e de planejamento da Tabela 3 para as tensões harmônicas individuais são válidos para harmônicos estacionários. Estes limites devem ser modificados pelo fator  $K_{hvs}$  para ser utilizados com harmônicos de curta duração conforme (3) (LEITE, 2013).

$$K_{hvs} = 1.3 + 0.7 \frac{h - 5}{45} \quad (3)$$

Tabela .3.2 - Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média.

Ímpares não múltiplas de 3			Ímpares múltiplas de 3			Pares		
Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %		Ordem de harmônico h	Tensão Harmônica %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica %	
	MT	AT-EHT		MT	AT-EHT		MT	AT-EHT
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17 ≤ h ≤ 49	1.9(17/h)-0.2	1.2(17/h)	21 ≤ h ≤ 45	0.2	0.2	0.25 ≤ 10/h ≤ 50	0.25(10/h)+0.22	0.19(10/h)+0.16

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008; (IEC/TR 61000-3-6, 2008).

A referida norma não estabelece limites explícitos para a distorção da corrente no PCC, no entanto, a mesma contempla a possibilidade de converter os limites de distorção para a tensão em limites de distorção para a corrente ao utilizar a impedância em frequências harmônicas do sistema externo de energia.

### 3.4.2 Norma IEEE 519-2014 Prática Recomendada IEEE e Requisitos para Controle Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência

A norma IEEE 519-1992, que sofreu alterações e atualmente é chamada IEEE 519-2014. É um documento largamente adotado para controle dos harmônicos no ponto de acoplamento elétrico entre a indústria e a concessionária. A filosofia desta norma é não se preocupar com o

que ocorre no interior da instalação e sim com o que a instalação pode injetar na rede e, portanto, atingir outros consumidores (IEEE 519-20-14).

A referida norma, propõe um compartilhamento de responsabilidade para a manutenção das harmônicas no PAC, onde os consumidores devem garantir que as correntes harmônicas estejam limitadas e as concessionárias, por sua vez, garantam os limites das harmônicas de tensão. Esta recomendação propõe a avaliação das harmônicas no PAC, pois assim, pode-se determinar como um consumidor afeta tanto a concessionária quanto outro consumidor conectado ao mesmo alimentador (IEEE 519-2014).

No PAC, os proprietários ou operadores de sistemas devem limitar harmônicos de tensão de linha a neutro da seguinte maneira (IEEE 519-2014):

– Período diário de 99º percentil, valores de tempo muito curto (3s) devem ser inferiores a 1,5 vezes os valores dados na Tabela 4 (IEEE 519-2014).

– Os valores de percentil 95º, percentil semanal (10 min) deve ser inferiores aos valores indicados na Tabela 4 (IEEE 519-2014).

Todos os valores devem estar em porcentagem da tensão de frequência de potência nominal no PAC. A Tabela 4 aplica-se a harmônicos de tensão cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência de energia (IEEE 519-2014).

Todos os valores devem estar em percentual da tensão de frequência de potência nominal no PAC. Tabela 4 aplica-se a tensão harmônicos cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência de alimentação (IEEE 519-2014).

*Tabela 3.3 - Limites de distorção de tensão.*

Tensão do barramento V no PCC	Harmônico individual (%)	Distorção harmônica total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

Fonte IEEE 519-2014, (2014; LEITE, 2013).

Os sistemas de alta tensão podem ter até 2,0% de THD onde a causa é um terminal HVDC cujos efeitos terão atenuado em pontos na rede onde futuros usuários podem estar conectados.

Tabela 3.4 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120 V a 69 KV.

<b>Distorção máxima da corrente harmônica em porcentagem de <math>I_L</math></b>						
<b>Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares) <sup>a, b</sup></b>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte IEEE 519-2014, (2014; LEITE, 2013).

- a. As harmônicas estão limitadas a 25% dos limites harmônicos ímpares acima.
- b. As distorções atuais que resultam em um deslocamento em dc, por exemplo, conversores de meia-onda, não são permitidas.
- b. Todo o equipamento de geração de energia está limitado a esses valores de distorção atual, independentemente da  $I_{sc}/I_L$  real.

Onde:

$I_{sc}$  = corrente máxima de curto-circuito no PAC

$I_L$  = corrente máxima de carga da demanda (componente de frequência fundamental) no PAC sob condições normais de operação da carga.

*Tabela 3.5 - Limites de distorção de corrente para sistemas com classificação acima de 69 kV até*

<b>Distorção máxima da corrente harmônica em porcentagem de <math>I_L</math></b>						
<b>Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares) <sup>a, b</sup></b>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
$> 1000$	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Fonte IEEE 519-2014, (2014; LEITE, 2013).

- a. Mesmo os harmônicos são limitados a 25% dos limites harmônicos ímpares acima.
- b. As distorções de corrente que resultam em um deslocamento em dc, por exemplo, conversores de meia-onda, não são permitidas.
- c. Todo o equipamento de geração de energia está limitado a esses valores de distorção atual, independentemente de  $I_{sc}/I_L$  real.

Onde

$I_{sc}$  = corrente máxima de curto-circuito no PAC.

$I_L$  = corrente de carga de demanda máxima (componente de frequência fundamental) no PAC em condições normais de operação de carga.

Tabela 3.6 - Limites de distorção de corrente para sistemas classificados > 161 Kv.

<b>Distorção máxima da corrente harmônica em porcentagem de <math>I_L</math></b>						
<b>Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares) <sup>a, b</sup></b>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 25^c$	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Fonte IEEE 519-2014, (2014).

a. As harmônicas estão limitadas a 25% dos limites harmônicos ímpares acima.

b. As distorções atuais que resultam em um deslocamento em dc, por exemplo, conversores de meia-onda, não são permitidas.

c. Todo o equipamento de geração de energia está limitado a esses valores de distorção atual, independentemente da  $I_{sc} / I_L$  real.

Onde

$I_{sc}$  = corrente máxima de curto-circuito no PAC

$I_L$  = corrente máxima de carga da demanda (componente de frequência fundamental) no PAC sob condições normais de operação da carga

### **3.4.3 Norma ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8**

O módulo 8 aborda tanto a qualidade do serviço quanto a do produto, neste trabalho estamos interessados na qualidade do produto. Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade da energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição (ANEEL/PRODIST,2018).

Os procedimentos de qualidade da energia elétrica definidos neste módulo devem ser observados por (ANEEL/PRODIST,2018):

a) consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;

- b) centrais geradoras;
- c) distribuidoras;
- d) agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS.

O PRODIST módulo 8 define as terminologias, caracteriza os fenômenos e estabelece os indicadores e limites ou valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão. Aborda os seguintes fenômenos da qualidade do produto em regime permanente:

- i. tensão em regime permanente;
- ii. fator de potência;
- iii. harmônicos;
- iv. desequilíbrio de tensão;
- v. flutuação de tensão;
- vi. variação de frequência.

Existem muitos outros fatores relevantes além da Qualidade do Produto definido e padronizados através do PRODIST Módulo 8 Revisão Dez (10) 2018, porém o aspecto que será tratado com maior relevância no atual trabalho, será as distorções harmônicas, as quais nos servirão como as principais variáveis de análise na tomada de decisão. As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de ondas das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (PRODIST, 2018).

A Tabela 3.8 mostra as terminologias aplicáveis ao cálculo das distorções harmônicas.

Tabela 3.7 - Terminologia.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	DTTP%

Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTTi%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT <sub>3</sub> %
Tensão harmônica de ordem h	V <sub>h</sub>
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	hmáx
Ordem harmônica mínima	hmin
Tensão fundamental medida	V <sub>1</sub>
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>p</sub> 95%
Valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>i</sub> 95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT <sub>3</sub> 95%

Fonte (ANEEL/PRODIST, (2018).

Tabela 3.8 - Expressões para o cálculo das grandezas DIT<sub>h</sub>%, DTT%, DTT<sub>p</sub>%, DTT<sub>i</sub>% e DTT<sub>3</sub>% são.

Sendo: h = ordem harmônica individual.	$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} X100$
Sendo: h = todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx. hmáx = conforme a classe A ou S.	$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{máx}} V_h^2}}{V_1} X100$
sendo: h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26,28, 32, 34, 38, ...). hp = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.	$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} X100$
sendo: h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37,...). hi = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.	$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_{pet}} V_h^2}}{V_1} X100$
sendo: h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36,39,...) h3 = máxima ordem harmônica múltipla de 3.	$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} X100$

Fonte: (CHAUDHURI, 2002; QUEIROZ, 2018).

Tabela 3.9 - Os limites para as distorções harmônicas totais.

Indicador	Tensão nominal		
	V <sub>n</sub> ≤ 1,0 kV	1,0 kV <V <sub>n</sub> < 69 kV	69 kV <V <sub>n</sub> < 230 kV
DTT95%	10,0 %	8,0 %	5,0 %

DTT <sub>p</sub> 95%	2,5 %	2,0 %	1,0 %
DTT <sub>i</sub> 95%	7,5 %	6,0 %	4,0 %
DTT <sub>3</sub> 95%	6,5 %	5,0 %	3,0 %

Fonte: ANEEL/PRODIST, 2018).

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição. No caso de medições realizadas utilizando-se TPs com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador DTT<sub>3</sub>95% deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 8. Os acessantes da Rede Básica deverão seguir o determinado nos Procedimentos de Rede ou em regulamentação específica.

## CAPÍTULO 5

### FILTROS PASSIVOS DE HARMÔNICOS

#### 4.1 Introdução

Os filtros passivos usam componentes passivos, como indutores, capacitores e resistores. Estes não podem aumentar a energia do sinal; a faixa de frequência para harmônicos filtros é limitado a aproximadamente 3000 Hz. É comum caracterizar os filtros seletivos de frequência em relação às suas bandas de passagem (DAS, 2015).

Quando se projeta uma instalação industrial, contendo grandes cargas não lineares, geralmente são violados os limites recomendados por norma de distorção harmônica. Diante dessa premissa, devem-se tomar medidas para assegurar o cumprimento desses limites e, desta forma, reduzir os efeitos indesejáveis dos harmônicos no sistema elétrico industrial, evitando assim a extensão dos problemas de qualidade de energia ao sistema de fornecimento externo. Os meios de compensação da distorção harmônica por excelência são os filtros de harmônicos que visam essencialmente restringir a circulação das correntes harmônicas pela rede, a fim de evitar a distorção da tensão nas barras (ARRILLAGA & WATSON, 2003).

Para o princípio de operação, os filtros harmônicos podem ser: passivos, ativos ou híbridos (quando se utiliza uma mistura dos dois primeiros). Apesar dos filtros ativos terem mostrado vantagens nos sistemas de baixa tensão, os filtros passivos são ainda os mais atraentes nos sistemas de média e alta tensão (NASSIF & XU, 2007); (JAKKAPONG, 2011).

Os filtros harmônicos passivos podem ser do tipo: série ou paralelo, sendo este último o mais utilizado, uma vez que apresenta a vantagem adicional, de também serem eficazes compensadores da potência reativa e podem funcionar simultaneamente nas funções de filtragem e compensação da potência reativa em sistemas elétricos industriais com a presença de cargas não lineares e de baixo fator de potência (LEITE, 2012).

De forma geral, o filtro passivo paralelo apresentado na Figura 4.1 está composto por um capacitor de potência reativa  $Q_{cnome}$  um circuito passivo formado por indutores, resistores e capacitores, cujo objetivo é formar um percurso de baixa impedância para os harmônicos que se deseja evitar a sua circulação pelo sistema elétrico.

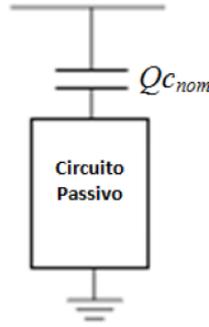


Figura 4.1: Filtro passivo paralelo.  
 Fonte: (DUGAN *et al.*, 2004; LEITE, 2013).

Este arranjo de filtro tem a função tanto de compensar a potência reativa na frequência fundamental, como diminuir a circulação dos harmônicos indesejáveis. Em ambos os casos, os componentes são selecionados para que a impedância do filtro seja mínima, a frequência de sintonia ( $n$ ) e com um fator de qualidade ( $Q$ ) que garanta um bom desempenho do filtro.

Existem diversas tipologias de filtros passivos paralelos que podem ser classificados em filtros sintonizados e filtros amortecidos (ARRILLAGA & WATSON, 2003); (NASSIF, XU & FREITAS, 2009) e (LI ZENG, LIU, LUO & ZHANG, 2012).

#### 4.2 Tipos de Filtros

Um filtro passa-baixa (LP) passa os componentes de baixa frequência e suprime os componentes de alta frequência.

Sua característica de perda é dada por:

$$A(\omega) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega < \omega_c \\ \infty, & \omega_c < \omega < \infty \end{cases} \quad (4.1)$$

A frequência de 0 a  $\omega_c$  é a banda de passagem e de  $\omega_c$  até a faixa de parada. O limite entre a banda de passagem e a banda de parada =  $\omega_c$  é a frequência de corte. No entanto, não pode haver uma transição repentina da banda passante para a banda parada. Praticamente, passe banda a perda não é zero e a perda da banda de parada não é infinita. Há uma transição gradual entre a banda passante e a banda de parada. Então, para o filtro LP, a característica de perda:

$$A(\omega) \begin{cases} \leq A_p, & 0 \leq \omega < \omega_p \\ \geq A_p, & \omega_\alpha \leq \omega \leq \infty \end{cases} \quad (4.2)$$

Um filtro passa-alta atua de maneira inversa, suprime a baixa frequência e passa a alta frequência. Para um filtro ideal:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \infty, & 0 \leq \omega < \omega_c \\ &= 0, & \omega_c < \omega < \infty \end{aligned} \quad (4.3)$$

Para um filtro prático, a característica de perda é

$$\begin{aligned} A(\omega) &\geq A_a, & 0 \leq \omega < \omega_a \\ &\leq A_p, & \omega_p \leq \omega \leq \infty \end{aligned} \quad (4.4)$$

O filtro passa-bandas passa frequências dentro de uma determinada banda e bloqueia as frequências baixas e altas. Idealmente:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \infty, & 0 \leq \omega < \omega_{c1} \\ &= 0, & \omega_{c1} < \omega < \omega_{c2} \\ &= \infty, & \omega_{c2} \leq \omega < \infty \end{aligned} \quad (4.5)$$

Para um filtro prático, a característica de perda é

$$\begin{aligned} A(\omega) &\geq A_a, & 0 \leq \omega < \omega_{a1} \\ &\geq A_p, & \omega_{p1} \leq \omega < \omega_{p2} \\ &\geq A_a, & \omega_{a2} \leq \omega < \infty \end{aligned} \quad (4.6)$$

Um filtro de parada de banda possui características reversas de um filtro de passagem de banda. Se a faixa de parada for estreita, ela é chamada de filtro de entalhe. Idealmente

$$\begin{aligned} A(\omega) &= 0, & 0 \leq \omega < \omega_{c1} \\ &= \infty, & \omega_{c1} < \omega < \omega_{c2} \\ &= 0, & \omega_{c2} \leq \omega < \infty \end{aligned} \quad (4.7)$$

Para um filtro prático, a característica de perda é

$$\begin{aligned} A(\omega) &\leq A_p, & 0 \leq \omega \leq \omega_{p1} \\ &\geq A_a, & \omega_{a1} \leq \omega \leq \omega_{a2} \\ &\geq A_p, & \omega_{p2} \leq \omega \leq \infty \end{aligned} \quad (4.8)$$

A função de perda mencionada anteriormente pode ser determinada da seguinte maneira:

Um filtro representado pela função de transferência de tensão:

$$\frac{V_o(S)}{V_i(S)} = H(S) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (4.9)$$

Onde:

$V_i(s)$  e  $V_o(s)$  são transformadas de Laplace das tensões de entrada e saída e  $N(s)$  e  $D(s)$  são polinômios em  $s$ .

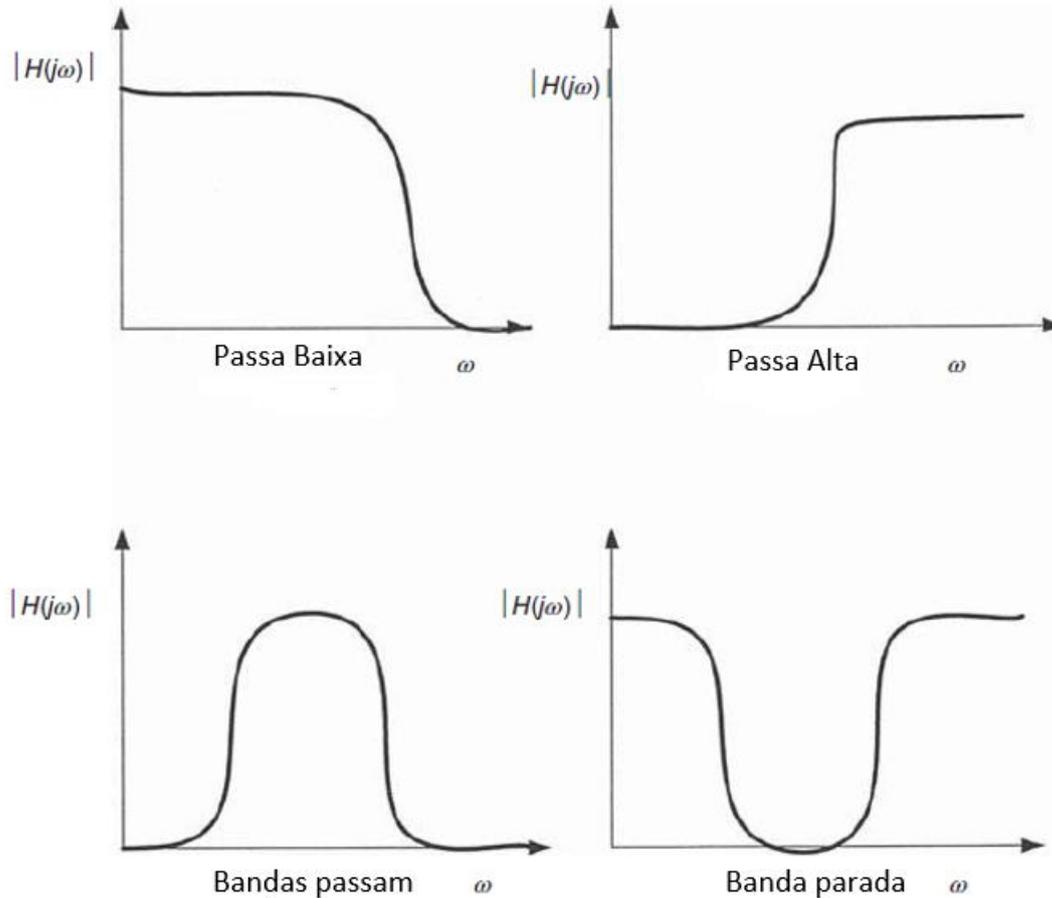


Figura 4.2: Resposta de frequência de passa baixa, passa alta, passagem de banda e banda de parada (entalhe) filtros.

Fonte: (DAS, 2015).

A perda ou atenuação é em decibéis:

$$A(\omega) = 20 \log \left| \frac{V_i(j\omega)}{V_o(j\omega)} \right| = 20 \log \frac{1}{|H(j\omega)|} \quad (4.10)$$

A Figura 4.3.1 mostra as características de magnitude desses tipos de filtro.

A Figura 4.3.2 (a) mostra as características do filtro LP, e a Figura 4.3.2 (b) mostra suas especificações de atenuação.

Suas características de atenuação são mostradas na Figura 4.3.3 (c), que é dependente da ordem do filtro. Conforme o pedido aumenta, o filtro se torna mais complexo. A função de magnitude ao quadrado para um filtro é:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + k^2(\omega/\omega_c)^2} \quad (4.11)$$

Onde:

$k$  é uma constante que determina variações na banda de passagem  $0 - \omega_c$ .

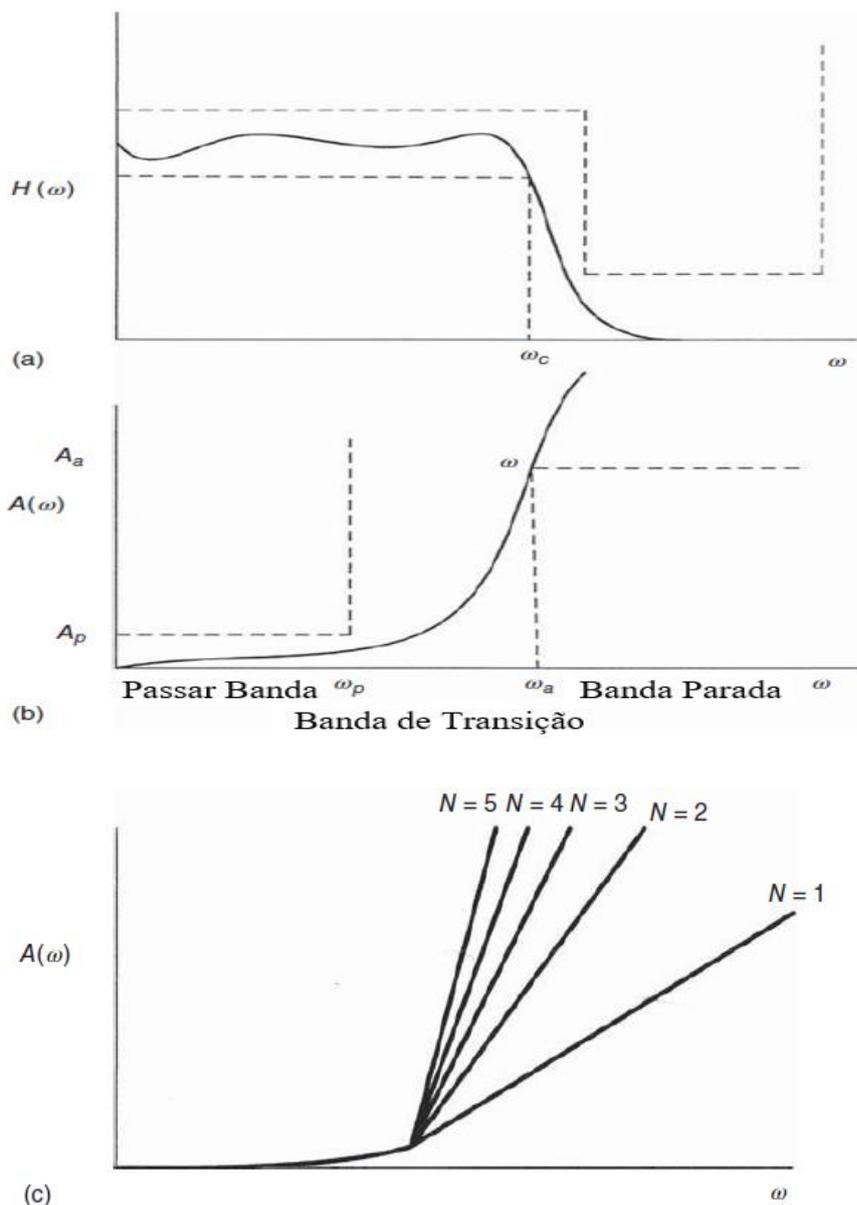


Figura 4.3 (a) e (b) Especificações de resposta e atenuação de frequência de um passa-baixa filtro, (c) resposta de atenuação de um filtro Butterworth de ordens diferentes.

A atenuação é escrita como:

$$A_{dB} = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{f_{stop}}{f_c} \right)^{2N} \right] \quad (4.12)$$

Onde:

$N$  é um inteiro positivo que define a ordem do filtro.

Geralmente, a função de transferência do filtro LP contém apenas os pólos:

$$H(S) = \frac{1}{S^n + a_{n-1}S^{n-1} + \dots + a_1S + 1} \quad (4.13)$$

Para (KHUN, TARATEERASETH, KHAN-NGERN & KANDO, 2007) descreve uma função Butterworth para o ruído de modo comum mitigação associada a motores de indução.

### **4.3 Filtros de derivação e série**

Os filtros para mitigação harmônica são geralmente do tipo shunt para oferecer um caminho de baixa impedância a um certo harmônico ou harmônico para que estes sejam passados para o filtro e seu fluxo seja minimizado no sistema (MERHEJ & NICHOLS, 1994; CHAPMAN, 2001; NASSIF, XU & FREITAS, 2009). Estes podem usar ressonância nos componentes do filtro para oferecer impedância a um determinado harmônico ou banda de harmônicos. Isso não significa que não utilizemos filtros em série, ou seja, filtros conectados em série com o conversor para impedir o fluxo de um certo harmônico (RASTOGI, MOHAN, & EDRIS, 1995; ARRILLAGA & ARRILLAGA, 1998; ENSLIN, 1998; ARRILLAGA & WATSON, 2004).

### **4.4 Localização dos filtros harmônicos**

Os filtros passivos em locais adequados, de preferência próximos à fonte de geração harmônica, podem ser fornecidos de modo que grande parte das correntes harmônicas sejam retidas na fonte e os harmônicos propagados até o ponto de acoplamento comum (PCC) sejam reduzidos (BAGGINI & HANZELKA, 2008). Filtros ativos, combinação híbrida de filtros ativos e passivos e multiplicação de fase para reduzir a emissão harmônica na fonte (DAS, 2015; CHENG, BHATTACHARYA & DIVAN, 1998; DAS, 2015).

Pela redução de harmônicos na fonte, o equipamento elétrico não precisa ser superdimensionado, as perdas são minimizadas, as distorções de tensão são reduzidas, os filtros podem ser dimensionados especificamente para as cargas, e controles de chaveamento dependentes da carga podem ser fornecidos (BOUZID *et al.*, 2015).

Por outro lado, quando os filtros estão localizados longe das cargas de produção harmônicas, os harmônicos devem fluir para o filtro através das impedâncias do sistema com a resultante redução de capacidade do equipamento elétrico. No entanto, pode não ser prático ou

econômico fornecerem filtros em cada fonte de emissão harmônica (SINGH, 2009; ALEMAM & ALI MOHAMMEDNOOR ALI *et al.* 2018).

As principais considerações são as seguintes:

- As limitações harmônicas no PCC devem atender aos requisitos do IEEE 519-2014, mas é desejável limitar as distorções harmônicas em todos os sistemas de energia.
- A compensação de potência reativa pode ser requerida simultaneamente.
- Condições normais e de contingência da operação da usina, juntamente com harmônicos ambientais, devem ser consideradas.
- Condições normais e de filtro de contingência devem ser consideradas.
- A emissão de harmônicas deve ser estimada corretamente sob várias condições operacionais.
- A interação do sistema com emissões harmônicas deve ser considerada.
- Uma modelagem trifásica pode ser necessária onde existam grandes desequilíbrios.

#### 4.5 Filtros Sintonizados

Os filtros de ajuste único (sintonizado) são filtros eficientes e ignoram um determinado harmônico ao qual eles são ajustados. Estes são os filtros mais utilizados em todas as aplicações de harmonização. No entanto, é necessário ter cuidado em seu projeto, para que os componentes não sejam sobrecarregados e as sobretensões causadas por suas aplicações sejam controladas. Muitas vezes, um grupo de filtros sintonizados são aplicados, cada um sintonizado em uma frequência específica.

A operação de um filtro shunt sintonizado é explicada com referência à Figura 4.4. (Qualquer outro tipo de filtro conectado na derivação pode ser chamado de filtro de derivação). A Figura 4.4 (a) mostra uma configuração do sistema com carga não linear, e a Figura 4.4 (b) mostra o circuito equivalente. Corrente harmônica injetada da fonte através da impedância  $Z_{cs}$  divide em impedância equivalente do filtro e sistema  $Z_{eq}$ . Esta impedância do sistema pode ser encontrada pela redução do circuito - isto é, de fato, a impedância equivalente ao curto-circuito no barramento 1. A corrente divide-se em três caminhos paralelos: a corrente no PCC é a corrente que flui através da fonte da utilidade e o transformador da utilidade é série:

$$I_h = I_f + I_s \quad (4.14)$$

Onde:

$I_h$  é a corrente harmônica injetada no sistema,  $I_f$  é a corrente através do filtro, e  $I_s$  é a corrente através da impedância do sistema. Além disso:

$$I_f Z_f = I_s Z_s \quad (4.15)$$

ou seja, a tensão harmônica na impedância do filtro ( $Z_f$ ) é igual à tensão harmônica na impedância do sistema de potência equivalente ( $Z_s$ ).

$$I_f = \left[ \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} \right] I_h = p_f I_h \quad (4.16)$$

$$I_s = \left[ \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} \right] I_h = p_s I_h \quad (4.17)$$

Onde:

$\rho_f$  e  $\rho_s$  são quantidades complexas que determinam a distribuição da corrente harmônica no filtro e a impedância do sistema. Essas equações também podem ser escritas em termos de admissão. Um filtro adequadamente projetado terá  $\rho_f$  perto da unidade, tipicamente 0,995, e os correspondentes  $\rho_f$  para o sistema serão 0,05. Os ângulos de impedância de  $\rho_f$  e  $\rho_s$  podem ser da ordem de  $-81^\circ$  e  $-2,6^\circ$ , respectivamente.

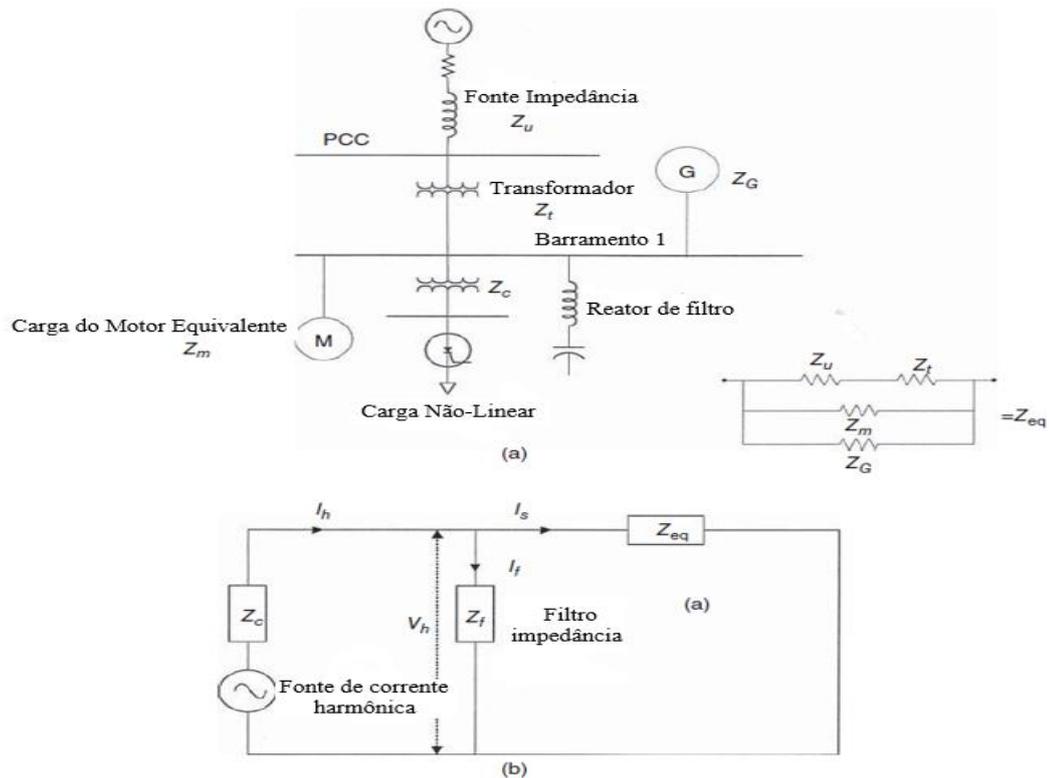


Figura 4.4 (a) Conexões de um filtro ST, fonte harmônica em um sistema de distribuição; (b) circuito equivalente olhando da injeção harmônica como a fonte. Fonte: DAS, (2015).

As tensões harmônicas devem ser as mais baixas possíveis. O circuito equivalente da Figura 4.4 (b) mostra que a impedância do sistema desempenha um papel importante na distribuição da corrente harmônica. Para a impedância infinita do sistema, ou seja, um sistema

com baixa potência de curto-circuito, a filtragem é perfeita, pois nenhuma corrente harmônica flui através da impedância do sistema. Por outro lado, para um sistema de impedância harmônica zero, isto é, uma fonte de alta potência de curto-circuito, toda a corrente harmônica fluirá para o sistema e nenhuma no filtro. No caso em que não há filtração, toda a corrente harmônica passa para o sistema. Quanto menor a impedância do sistema, ou seja, quanto maior a corrente de curto-circuito, menor a distorção de tensão, desde que o filtro, a impedância é reduzida para absorver a maior parte da corrente harmônica.

Em conexão com filtros ativos, os limites harmônicos IEEE de TDD (IEEE 519-2014, Revisão do IEEE 519-1992) são baseados neste conceito. Quanto maior a potência de curto-circuito da fonte, maior é o TDD permissível. Em um filtro sintonizado, como as impedâncias indutiva e capacitiva são iguais na frequência de ressonância, a impedância é dada pela resistência R:

$$Z = R + j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} \quad (4.18)$$

Na frequência de ressonância,  $\omega_n$ ,  $Z = R$ .

Os seguintes parâmetros podem ser definidos:  $\omega_n$  é a frequência angular sintonizada em radianos e é dada por:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.19)$$

$X_0$  é a reatância do indutor ou capacitor na frequência angular sintonizada. Aqui,  $n = f_n/f$ , onde  $f_n$  é a frequência sintonizada por filtro e  $f$  é a frequência do sistema de potência.

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ and } \omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4.20)$$

O fator de qualidade do reator de sintonia é definido como:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \quad (4.21)$$

Determina a nitidez da sintonização, a banda de passagem é limitada por frequências nas quais:

$$|Z_f| = \sqrt{2R} \quad (4.22)$$

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n}$$

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \quad (4.23)$$

Nessas frequências, a reatância líquida é igual à resistência, capacitiva de um lado e indutiva do outro lado. Se for definido como o desvio por unidade da frequência sintonizada, então, para pequenos desvios de frequência, a impedância é aproximadamente dada por

$$|Z_f| = R\sqrt{1 + 4\delta^2 Q^2} = X_0\sqrt{Q^{-2} + 4\delta^2} \quad (4.24)$$

Para minimizar a tensão harmônica, o  $Z_f$  deve ser reduzido ou a entrada do filtro deve ser alta em comparação com a admitância do sistema.

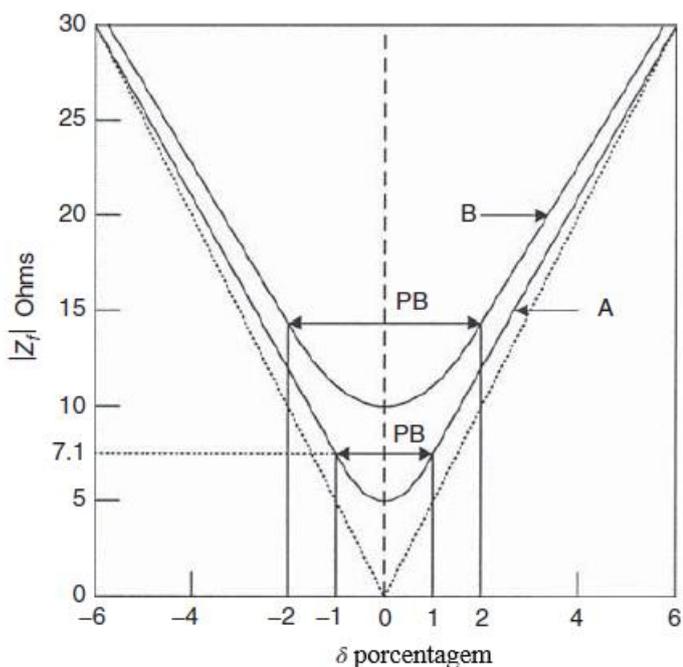


Figura 4.5: Resposta de um filtro shunt sintonizado onde mostra a banda de passagem e assíntotas.

Fonte: DAS, (2015).

O gráfico da impedância é mostrado na Figura 4.5 (KIMBARK, 1971). A nitidez do ajuste depende tanto de  $R$  quanto de  $X_0$ , e a impedância do filtro em sua frequência de ressonância pode ser reduzida com a redução destes. As assíntotas estão em:

$$|X_f| = \pm 2X_0|\delta| \quad (4.25)$$

As bordas da banda de passagem estão em  $\delta = \pm 1/2Q$  e largura =  $1/Q$ . Na Figura 4.5. A curva A é para  $R = 5$  ohms,  $X_0 = 500$  ohms e  $Q = 100$ , com assíntotas e banda de passagem,

como mostrado. A curva B é para  $R = 10$  ohms,  $X_0 = 500$  ohms e  $Q = 50$ . As duas curvas têm as mesmas assíntotas. A resistência, portanto, afeta a nitidez do ajuste.

Em termos de admissões:

$$Y_f = G_f + jB_f = \frac{Q}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)} - \frac{2\delta Q^2}{X(1 + 4\delta^2 Q^2)} \quad (4.26)$$

A tensão harmônica no barramento do filtro é

$$V_h = \frac{I_h}{Y_h} \quad (4.27)$$

Para uma distorção de tensão mínima, a admitância geral do filtro deve ser aumentada. Os loci de impedância indicam que geralmente as impedâncias harmônicas podem ser definidas em uma região de  $R, jX$ , determinada por duas linhas retas e um círculo passando pela origem como mostra as Figuras 4.6 a 4.8).

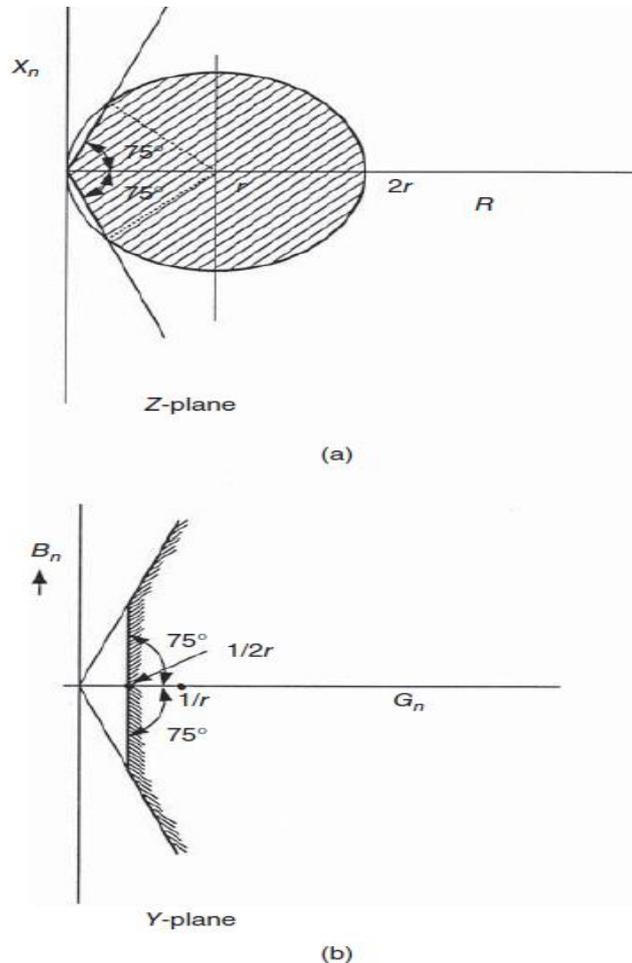


Figura 4.6 - Gráfico de impedância generalizada, (a) plano R – X e plano Y.

Fonte: DAS, (2015).

A Figura 4.7 é uma matriz de loci de impedância e impedância mútua de um sistema de teste (N.R. WATSON & J. ARRILLAGA, 1988). A resposta de freqüência deve incluir assimetria de rede e acoplamento mútuo. Esses locais são convertidos em circuitos equivalentes.

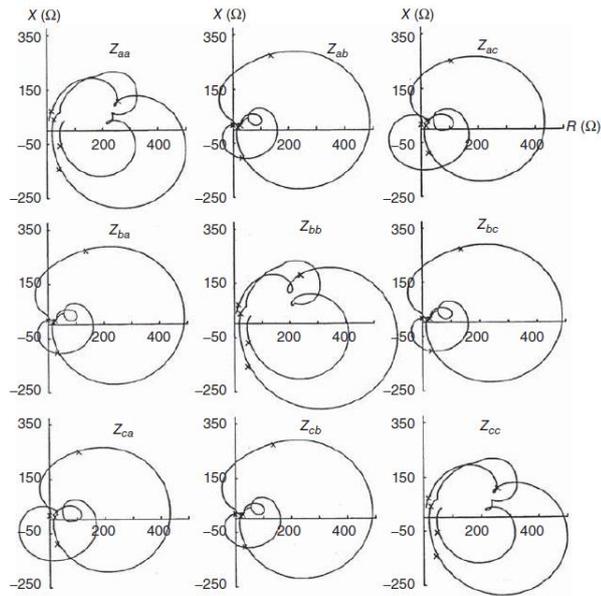


Figura 4.7: Gráficos de matriz de impedância de auto-impedância e impedância mútua.  
 Fonte: (J.D. GREEN & C.A. GROSS, 1988)

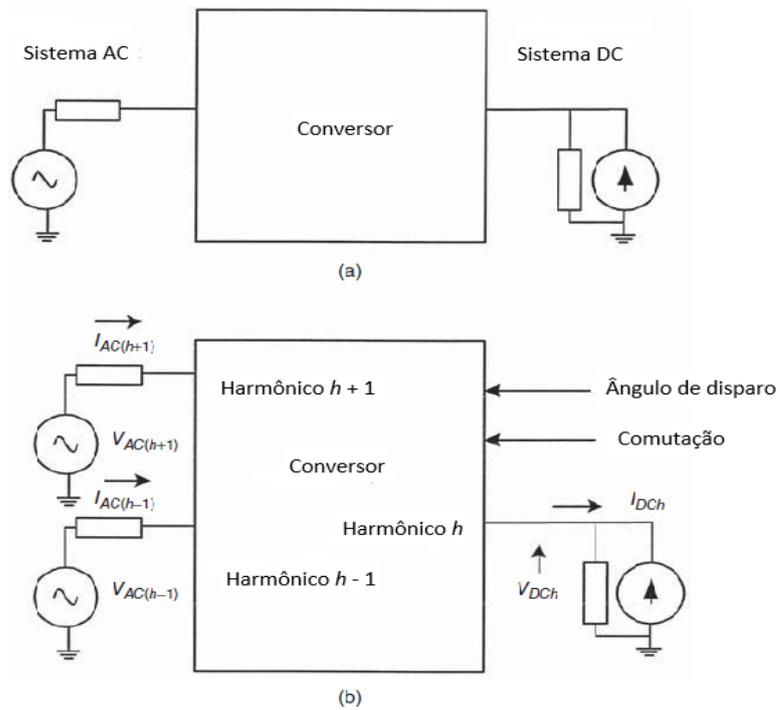


Figura 4.8: (a) Conversor interligando os sistemas AC e DC e (b) não característico interações de frequência.  
 Fonte: DAS, (2015).

#### 4.6 - Frequência de Sintonia

O filtro não está sintonizado exatamente com a frequência do harmônico que pretende suprimir:

- A frequência do sistema pode mudar, fazendo com que a frequência harmônica mude. A tolerância nos reatores de filtro e capacitores pode mudar devido a efeitos de envelhecimento ou temperatura.

- A tolerância em unidades capacitivas comerciais é de  $\pm 20\%$  e em reatores  $\pm 5\%$ . Para aplicações de filtro, é necessário especificar tolerâncias mais próximas em capacitores e reatores. Quando uns números de unidades capacitivas são conectados em série ou em paralelo, estas são cuidadosamente formadas com valores testados da capacitância para que não ocorram grandes desequilíbrios de fase. Quaisquer desequilíbrios desse tipo entre as fases

Resultar em estresse de sobretensão; além disso, o neutro não estará em potencial de aterramento em bancos conectados em estrela. Uma tolerância de  $\pm 2.0\%$  em reatores e  $+ 5\%$  em capacitores (sem tolerância negativa) em ambiente industrial é prática.

Tolerâncias mais próximas podem ser necessárias para aplicações de corrente contínua de alta tensão (HVDC).

- O ajuste para a harmônica exata, que se destina a ser contornado, pode atrair harmônicos das instalações adjacentes e sobrecarregar os filtros.

Uma mudança em  $L$  ou  $C$  de  $2\%$  provoca a mesma desafinação que uma mudança na frequência do sistema em  $1\%$  (KIMBARK, 1971):

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (4.28)$$

A impedância do filtro também pode ser escrita como:

$$Z = R \left( 1 + jQ\delta \frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \quad (4.29)$$

#### 4.7 - Filtro Mínimo

Um filtro projetado para controlar apenas a distorção harmônica, sem a limitação de atender a uma determinada demanda de potência reativa, é denominado filtro mínimo. Mais frequentemente, os filtros também são necessários para atender a uma determinada demanda de potência reativa para melhoria do fator de potência (FP). Pode acontecer que:

- O filtro mínimo pode ter que ser maior do que os requisitos da reunião a demanda de potência reativa apenas.
- Por outro lado, também é verdade que os requisitos para atender às necessidades reativas

exigência de energia pode aumentar o tamanho do filtro mínimo.

- Ambas as situações devem ser consideradas simultaneamente.

A Figura 4.9 mostra os gráficos  $R - X$ ,  $Z - \omega$  e ângulo de fase dos filtros ST isolados e em paralelo.

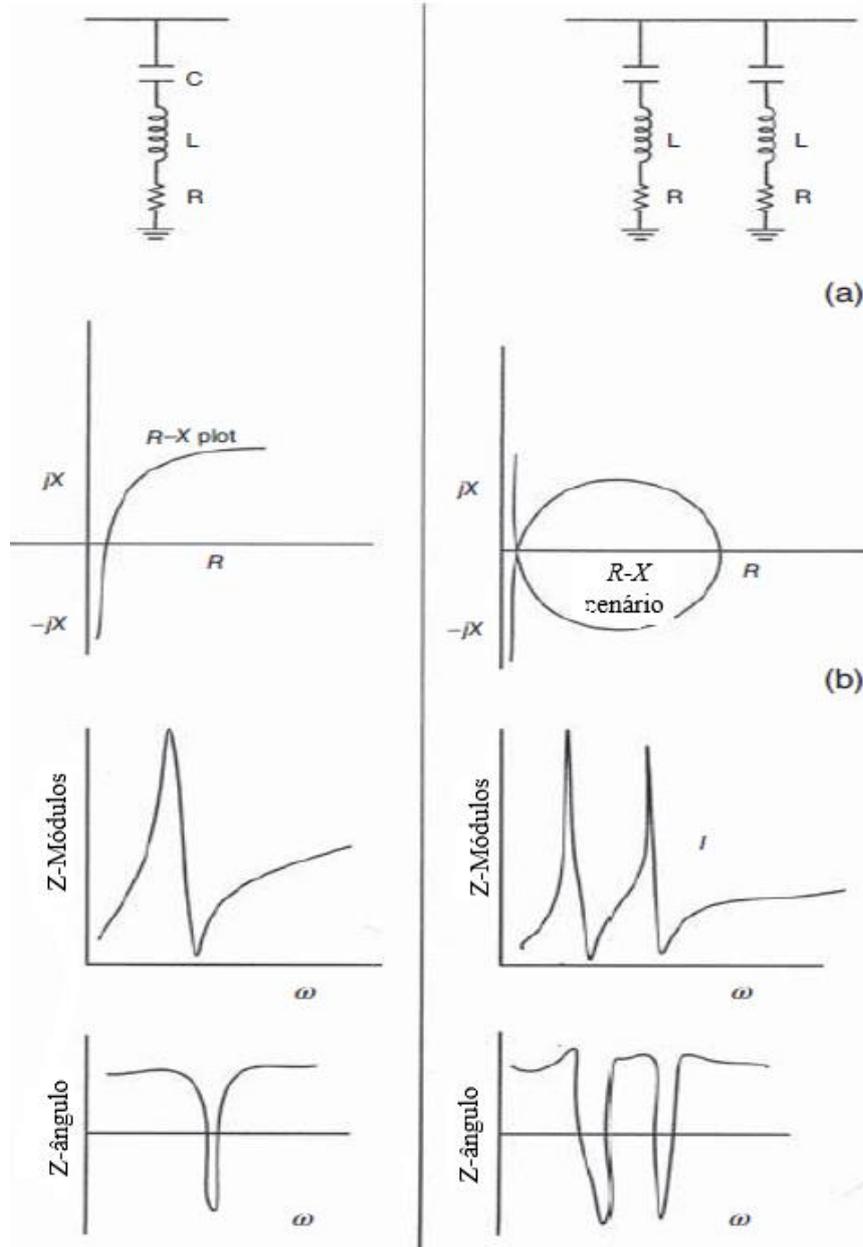


Figura 4.9 - (a) Conexões, (b) Gráficos  $R - X$ , (c)  $Z - \omega$  e (d) gráficos angulares de filtros sintonizados.

Fonte: DAS, (2015).

#### 4.8 - Frequências ressonantes deslocadas

- Com a aplicação de um filtro ST, a ressonância não é eliminada. Será sempre mude para uma frequência menor que a frequência selecionada. Isto é dado por

$$f_{11} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_S+L)C}} \quad (4.30)$$

Onde:

$L_S$  é a reatância do sistema.

- O pico de ressonância tem seu próprio valor de Q dado por

$$Q = \frac{\sqrt{(L_S+L)/C}}{(R_S+R)} \quad (4.31)$$

Onde:

$R_S$  é a resistência do sistema.

- Cada filtro ST paralelo dá origem a uma frequência ressonante deslocada, abaixo da sua própria frequência sintonizada, ver também a Figura 4.10 9.25. Se a frequência de ressonância deslocada coincidir com uma das características, harmônicos não característicos ou *triplen* presentes no sistema, a ampliação de corrente nessas frequências ocorrerá. A corrente de energização de comutação de um transformador é rica em harmônicos pares e terceiros. À medida que os transformadores são ligados e desligados, injeções harmônicas de corrente no sistema e os filtros aumentarão, embora isso dure pela duração de comutação dos transformadores. É possível que estas correntes sejam suficientemente ampliadas para dar origem a grandes tensões harmônicas.

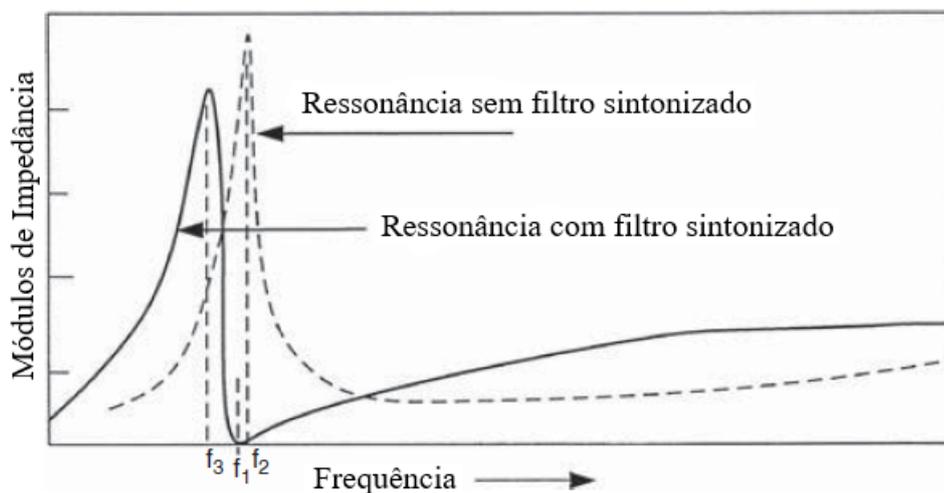


Figura 4.10: Frequência de ressonância deslocada, filtro sintonizado.

Fonte: DAS, (2015).

- Altas sobretensões podem ocorrer se o sistema estiver nitidamente ajustado ao harmônico que está sendo excitado pela corrente de energização do transformador (segundo, terceiro, quarto e harmônicos pares). Os bancos de

capacitores também podem falhar prematuramente. Isso coloca uma restrição no design dos filtros sintonizados. Ao projetar filtros para instalações de fornos, o transformador do forno pode ser ligado e desligado com muita frequência, e essas frequências devem ser contabilizadas.

- Quando os capacitores e transformadores são ligados juntos, eles aumentam o tempo de decaimento do transiente de comutação e a ressonância harmônica pode ocorrer (Figura 4.11).

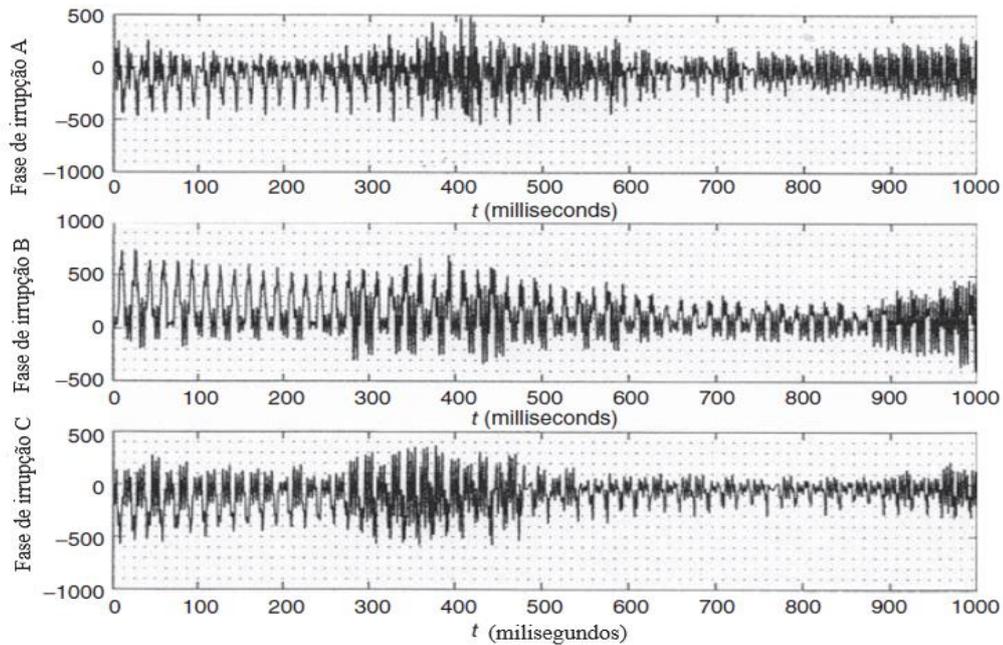


Figure 4.11: Simulação EMTP de transientes de comutação na Figura 4.12.  
Fonte: DAS, (2015).

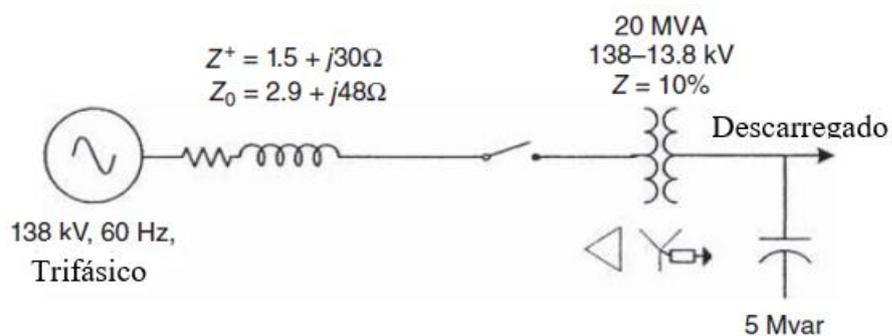


Figura 4.12 Configuração do sistema de um transformador de 20 MVA com um banco de capacitores de 5 Mvar nos enrolamentos secundários comutados juntos.  
Fonte: DAS, (2015).

As frequências de ressonância deslocadas devem ter pelo menos 30 ciclos de diferença entre harmônicos adjacentes e ímpares ou pares. Esta recomendação é baseada em aplicações

práticas de projetos de filtros. Mesmo assim, ocorrerá alguma amplificação da corrente de energização de comutação do transformador.

#### 4.9 - Efeito de tolerâncias em componentes de filtro

As tolerâncias nos capacitores e reatores resultarão em desafinação. Considere que os componentes das seguintes tolerâncias são selecionados:

*Capacitores: + 5%*

*Reatores: ± 2%*

Deixe a capacitância do quinto e sétimo filtros aumentar em 5% e a indutância em 2%. Essa é uma suposição bastante conservadora para verificar o efeito de desintonização e a distribuição atual resultante. As frequências sintonizadas em série do quinto e sétimo filtros mudarão para um valor menor. Um efeito das tolerâncias na frequência de sintonização é mostrado na seguinte equação [4]:

$$f_{tuned} = f_{nominal} \left[ \frac{1}{\sqrt{(1+t_r)(1+t_c)}} \right] \quad (4.32)$$

Onde:

$f_{tuned}$  = frequência de sintonização real

$f_{nominal}$  = frequência ajustada especificada

$t_r$  = reator de tolerância por unidade

$t_c$  = tolerância do capacitor por unidade

#### 4.10 Interrupção de um dos filtros paralelos

Considere que temos filtros sintonizados de três etapas para os 5º, 7º e 11º harmônicos. Um dos filtros sintonizados paralelos deve ser considerado. Terá os seguintes efeitos:

- O carregamento atual dos filtros restantes em serviço pode aumentar substancialmente e os capacitores e reatores podem estar sobrecarregados.
- As frequências de ressonância mudam e podem resultar em amplificação de corrente harmônica.
- A distorção harmônica aumentará.

Pode ser necessário que os filtros paralelos restantes também sejam removidos do serviço. O esquema de proteção e comutação do filtro é projetado de forma que, com a interrupção de um dos filtros de capacitor paralelos, o sistema completo é desligado. Isso traz outra consideração, isto é, a redundância nas aplicações de filtro, de modo que o harmônico a emissão no PCC é controlado dentro dos limites do IEEE (IEEE 519-2014, REVISÃO IEEE 519-1992). Alternativamente, o suficiente de reposição peças e serviços devem estar disponíveis para trazer a unidade defeituosa em serviço em um curto espaço de tempo.

#### ***4.11 Operação com cargas variadas***

Quando a comutação dependente de carga é necessária para a compensação de potência reativa, bancos de capacitores são trocados em ordem crescente, isto é, 5°, 7° e 11°. Geralmente, isso ocorrerá durante as condições de inicialização; no entanto, se a operação sustentada cargas reduzidas é necessária, é necessário controlar a distorção harmônica em cada as cargas de operação e os passos de comutação. As cargas harmônicas podem ou não diminuir proporcionalmente à carga total da planta. Isso adiciona outro passo no projeto de um esquema de filtragem passiva para atender aos requisitos do TDD.

#### ***4.12 Divisão de reativo (kvar) entre bancos de filtros paralelos***

Quando vários filtros paralelos são necessários e os requisitos totais de kvar também são conhecidos, resta descobrir a distribuição mais útil de kvar entre os paralelos filtros. Suponha que precisamos de filtros de 5, 7 e 11 harmônicos, dimensionando todos eles com kvar igual é uma abordagem muito simplista, raramente implementada. Como os filtros devem ser dimensionados para lidar com o carregamento harmônico, uma abordagem seria dividir o kvar necessário com base na porcentagem de corrente harmônica que cada filtro carregará. Isso não vai ser conhecido antecipadamente. O outro método é proporcionar os filtros em relação a geração de corrente harmônica, ou seja, os harmônicos de ordem mais baixa são de maior magnitude, então mais *kvar* são alocados para um filtro de ordem inferior. Novamente, alguma iteração ser necessário para otimizar os tamanhos inicialmente escolhidos com base na fundamental cargas fundamental real de corrente harmônica e a compensação de potência reativa desejada.

#### ***4.13 Perdas nos capacitores***

Os capacitores de energia têm algum componente ativo de perda de energia, embora pequeno. A Figura 4.13 mostra as perdas médias em relação à temperatura ambiente para capacitores com base nos dados publicados de um fabricante para seus capacitores especiais com enchimento dielétrico. A uma temperatura de operação de 40 °C, a perda é de aproximadamente 0,10 W/kvar e aumenta para 0,28 W/kvar a -40 °C. Essa perda deve ser considerada no projeto do filtro por uma resistência de série equivalente inserida no circuito.

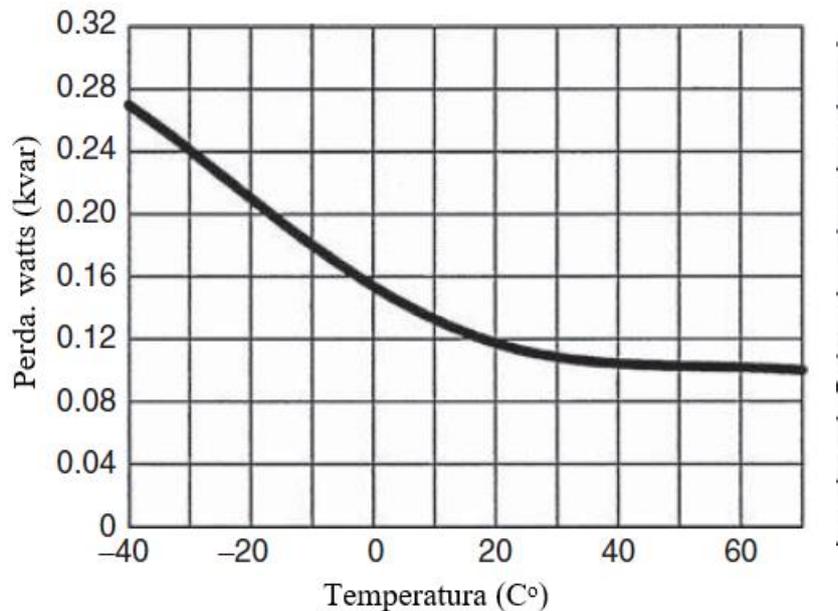


Figura 4.13: Perdas médias em capacitores de filme-folha, com variação de temperatura, dados de um elemento capacitor específico tipo, e um específico fabricante.

Fonte: DAS, (2015).

#### 4.14 - Ajuste e desequilíbrio de filtro harmônico

A operação de um fusível interno ou externo ou o curto-circuito de elementos de um banco de capacitores sem fusível altera a capacitância do filtro e a sujeita a uma sobretensão mais alta. Os sistemas de detecção de desequilíbrio, são aplicados e algumas considerações são as seguintes:

A frequência de ressonância mudará. A operação do fusível em um banco de capacitores conectado em paralelo diminuirá a capacitância e aumentará a frequência de ressonância. Existe a possibilidade de que o curto-circuito dos elementos capacitivos de um banco de capacitores com fusível externo aumente a capacitância e diminua a frequência de ressonância. É desejável determinar a mudança máxima de capacitância positiva / negativa que pode ser tolerada. O de sintonia pode ser uma condição mais rigorosa do que a sobretensão nas unidades restantes.

- Indicações ambíguas são uma possibilidade. Por exemplo, uma corrente insignificante fluirá através de um TC conectando os neutros de um banco não-aterrado-duplo-estrela, e isso não mudará se um número igual de falhas de fusíveis ou de curto-circuitos de elementos ocorrerem nas mesmas fases dos bancos em estrela. Quando tal possibilidade existe, é desejável que seja fornecido um alarme na primeira falha de um fusível ou primeira falha de um elemento no banco sem fusível.

- Uma falta de arco externo a uma unidade de capacitor pode resultar em grandes mudanças na capacitância e na desafinação do filtro. A proteção contra desbalanceamento pode não funcionar sempre dependendo das configurações do filtro. Um esquema de relés de sobrecorrente de fase pode ser projetado de acordo com o padrão IEEE C37.99 (IEEE STANDARD C37.99, 2000).

- Para simular a falha do fusível em uma unidade de capacitor em uma fase e seu efeito na desafinação, são necessárias modelagem e análise de fluxo de carga harmônico trifásico.

#### 4.15 Relações em um filtro sintonizado

A saída de potência reativa de um capacitor na frequência fundamental é  $V^2/X_c$ . Na presença de um reator de filtro, é dado por:

$$S_f = \frac{V^2}{X_L - X_C} \quad (4.33)$$

$$= \frac{V^2}{C_c/n^2 - X_c}$$

$$= \frac{n^2}{n^2 - 1} x (\text{potência reativa sem reator}) \quad (4.34)$$

A saída de potência reativa com um reator de filtro sintonizado para, digamos  $4,85f$ , é aproximadamente 4% maior do que sem o reator. Isto é assim porque a queda de tensão no reator é adicionada à tensão do capacitor, e sua tensão operacional é:

$$V_C = V + V_L = \frac{Vj\omega L}{(j\omega L - \frac{1}{j\omega C})} = \frac{n^2}{n^2 - 1} V \quad (4.35)$$

- Os capacitores em um filtro de quinta harmônica sintonizado em  $4.85f$  operam aproximadamente 4% acima da tensão do sistema.

A tensão de frequência fundamental em estado estacionário pode ser:

$$V_r = V \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h X_{ch} \quad (4.36)$$

Onde:

$V_r$  é a tensão nominal,  $I_h$  é a corrente harmônica,  $V$  é a tensão máxima do sistema através do capacitor excluindo o aumento da tensão através do reator, e  $X_{ch}$  é a reatância capacitiva na ordem harmônica.

A carga fundamental dos capacitores é dada por:

$$\frac{V_C^2}{X_C} = \frac{V^2}{X_C} \left[ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right]^2 = S_f \left[ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right] \quad (4.37)$$

e o carregamento harmônico é:

$$\frac{I_h^2 X_C}{h} = \frac{I_h^2 V^2}{S_f} \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (4.38)$$

Quando as tensões harmônicas e os fluxos de corrente são conhecidos a partir da simulação harmônica, a carga harmônica pode ser encontrada a partir de:

$$\sum_{h=2}^{h=\infty} V_h I_h \quad (4.39)$$

A carga de frequência fundamental do reator de filtro é

$$\frac{V_L^2}{X_L} = \left[ \frac{V_C}{n^2} \right]^2 \left[ \frac{n^2}{X_C} \right] = \frac{V_C^2}{n^2 X_C} = \frac{S_f}{n^2} \left[ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right] \quad (4.40)$$

A carga harmônica para o reator é a mesma que para o capacitor.

#### 4.16 Seleção do Fator de Qualidade ( $Q$ )

A equação (4.21) define o filtro  $Q$  baseado na reatância indutiva ou capacitiva na frequência sintonizada (estas são iguais). Além de seu impacto no desempenho do filtro, o *fator*

$Q$  determina as perdas de frequência fundamental e isso pode ser uma consideração primordial, especialmente quando os reatores em nível de média tensão precisam estar localizados em recintos fechados de metal ou fibra de vidro e o espaço está em um Prêmio.

Considere um segundo filtro harmônico que requer um reator de filtro = 5.1687 ohms. Um  $X/R$  de 50 ( $Q$ ) fornece uma resistência do reator de 0,1032 ohms. Se a corrente *rms* da frequência fundamental for 1280A, ocorrerá uma perda de aproximadamente 507 kWh, (= 4441 MW/ano), o que é muito substancial. Principalmente os reatores de filtro são instalados em ambientes controlados ambientalmente, e a carga de calor deve ser cuidadosamente considerada na concepção de equipamentos de ar condicionado.

As perdas de frequência fundamental e dissipação de calor são uma consideração importante, mas isso não significa que o efeito no desempenho do filtro possa ser ignorado.

Quanto maior o valor de  $Q$ , mais pronunciado é o vale na frequência sintonizada. Para sistemas industriais, o valor de  $R$  pode ser limitado à resistência construída no próprio reator, ou seja, os reatores são especificados para ter um determinado fator  $Q$  - quanto maior o fator  $Q$ , maior o custo do reator. No entanto, existem limitações práticas dos limites de  $Q$  para os reatores.

O  $X/R$  dos reatores de ajuste a 60 Hz é dado por  $3,07 K^{0,377}$ , onde  $K$  é o  $KVA = 3I^2X$  trifásico ( $I$  é a corrente nominal em amperes e  $X$  é a reatância em ohms). A razão  $X/R$  de um reator de 1500-kVA será 50, enquanto o de um reator de 10-MVA será de 100. Reatores  $X$  altos  $R$  altos podem ser adquiridos a um custo premium. Assim, a seleção de  $X/R$  do reator depende de

- investimento de capital inicial;
- perdas de energia ativas;
- eficácia da filtragem.

Para sistemas de energia industriais e comerciais, o  $Q$  do reator de filtro não é tão crítico. Isto não é assim para a transmissão de alta tensão (HV).

A otimização da entrada do filtro e  $Q$  para o ângulo de impedância da rede e  $\delta$  são necessárias para os sistemas de transmissão. O valor ótimo de  $Q$  é dado por (KIMBARK, 1971):

$$Q = \frac{1 + \cos \phi_m}{2\delta_m + \sin \phi_m} \quad (4.41)$$

Onde:

$\phi_m$  é o ângulo de impedância da rede. Considere uma variação de frequência de  $\pm 1\%$ , um coeficiente de temperatura de  $0,02\%$  por grau Celsius, e uma variação de temperatura de  $\pm 30^\circ\text{C}$  nos indutores e capacitores, depois da Equação (4.28),  $\delta = 0,006$ . Para um ângulo de impedância  $\phi_m = 80^\circ$ , o  $Q$  ótimo da Equação (4.41) é  $99,31$ . Quanto maior as tolerâncias em componentes e desvio de frequência, menor é o valor de  $Q$ .

#### 4.17 Filtro com sintonia dupla

Um filtro de sintonização dupla é derivado de dois filtros sintonizados e é mostrado na Figura 4.14. O gráfico  $R - X$  e os gráficos  $Z -$  e são idênticos aos de dois filtros sintonizados em paralelo, como mostra a Figura 4.9. A vantagem em relação a dois filtros sintonizados é que a perda de potência na frequência fundamental é menor e um indutor em vez de dois é submetido à tensão de impulso total. Na Figura 4.14, o BIL (nível básico de isolamento) no reator  $L_2$  é reduzido enquanto o reator  $L_1$  vê a tensão de impulso total.

Essa é uma vantagem em aplicativos de alta tensão. As seguintes equações (ANISWORTH, 1965) transformam dois filtros sintonizados de frequências diferentes em um único filtro de sintonia dupla:

$$C_1 = C_a + C_b \quad (4.42)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \quad (4.43)$$

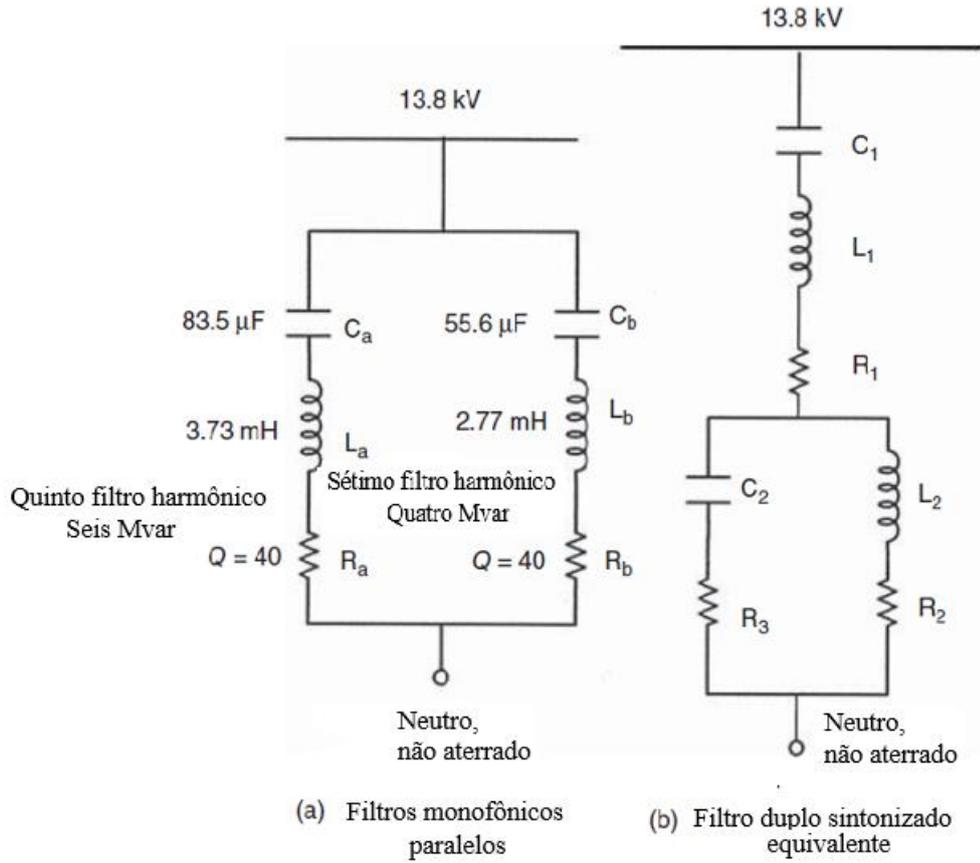


Figura 4.14: (a) Circuitos de dois filtros sintonizados paralelos de 6 Mvar (quinto harmônico) e 4 Mvar (sétimo harmônico) e (b) circuito equivalente de um único filtro duplo afinado.  
 Fonte: DAS, (2015).

$$R_2 = R_a \left[ \frac{a^2(1-x^2)}{(1+a)^2(1+x^2)} \right] - R_b \left[ \frac{1-x^2}{(1+a)^2(1+x^2)} \right]$$

$$+ R_1 = \left[ \frac{a(1-a)(1-x^2)}{(1+a)^2(1+x^2)} \right]$$
(4.44)

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2}$$
(4.45)

$$R_3 = -R_a \left[ \frac{a^2 x^4 (1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_b \left[ \frac{(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right]$$

$$+ R_1 \left[ \frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1-x^2)(1-ax^2)} \right]$$
(4.46)

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b}$$
(4.47)

Onde:

$$a = \frac{c_a}{c_b} \quad x = \sqrt{\frac{L_b c_b}{L_a c_a}} \quad (4.48)$$

Geralmente,  $R_1$  é omitido e  $R_2$  e  $R_3$  são modificados para que a impedância próxima à ressonância seja praticamente a mesma. Note que o indutor  $L_1$  terá alguma resistência, que é considerada nas equações acima.

Esses tipos de filtros são aplicados em todos os níveis de tensão do sistema de potência: sistemas de transmissão, distribuição, industriais e comerciais. Por exemplo, os conversores de transmissão HVDC usam várias seções de filtro sintonizadas em frequências discretas e são conectadas em paralelo nos terminais CA de cada conversor para fornecer energia reativa e suprimir harmônicos. No sistema de distribuição, estes são aplicados para uma desintegração do banco de capacitores para controlar as frequências ressonantes naturais. Um filtro passa-alta de segunda ordem pode ser adicionado para atenuar harmônicos mais altos.

A Figura 4.14 mostra os parâmetros dos quinto e sétimo filtros harmônicos em paralelo. Um leitor pode convertê-los em um filtro de dupla sintonia usando as expressões dadas anteriormente.

#### **4.18 Filtros de passagem de faixa**

O filtro de passagem de banda é uma nova geração de filtros para harmônicos. Referindo-se à Figura 4.15 (a), um circuito  $LC$  simples pode atuar como um filtro de passagem de banda, mas o filtro de passagem da banda é uma nova geração de filtros para harmônicos. Referindo-se à Figura 4.15 (a), um circuito  $LC$  simples pode atuar como um filtro de passagem de banda, mas requer componentes grandes. Ele está livre de problemas de ressonância, mas sem carga a tensão pode ser alta e o fator de potência lidera em todas as cargas (SWAMY & ROSSITER, 1994).

Um filtro  $LLCL$  melhorado é mostrado na Figura 4.15 (b). Os capacitores de filtro estão ligados ao triângulo e os resistores de amortecimento estão conectados. Os terminais de saída do filtro  $V_0$  estão ligados aos terminais do retificador e  $L_0$  é relativamente pequeno, 3-5%. Em harmônicos retificadores dominantes, o principal filtro de entrada  $L_1$  é alta impedância com relação a impedância de filtro de derivação em uma faixa de frequência.

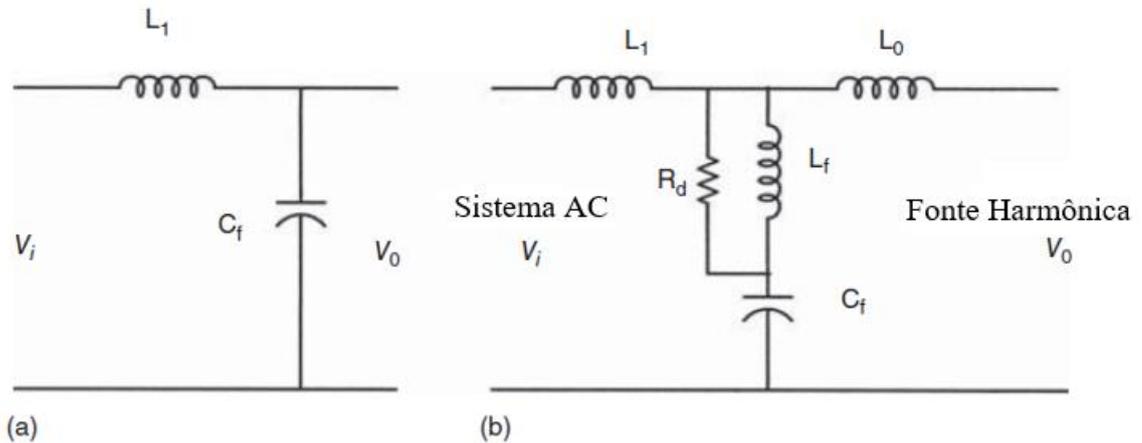


Figura 4.15 (a) Um circuito RC como filtro de passagem de banda e (b) um filtro de banda larga aprimorado para mitigação de harmônicos.

Fonte: DAS, (2015).

Assim, impede o fluxo de correntes harmônicas geradas pelo retificador para as linhas de CA e também minimiza o efeito dos harmônicos de tensão de linha no retificador. A frequência de ressonância paralela do filtro é dada por:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_f)C_f}} \quad (4.49)$$

A frequência de ressonância paralela é selecionada entre a frequência fundamental e a primeira frequência dominante do circuito retificador, quinto harmônico. As tensões são mantidas em uma faixa estreita nas variações de carga. Os componentes  $C_f$  e  $L_f$  fornecem um caminho de baixa impedância para o harmônico retificador dominante, como um filtro sintonizado.

No processo de projeto,  $L_0$  (Figura 4.15 (b)) é selecionado como reator de 4%:

$$L_0 = 0.04 \frac{V^2}{\omega P} \quad (4.50)$$

Onde:

$P$  é a potência nominal e  $V$  é a tensão linha a linha.

Os outros componentes do filtro são selecionados com base na distorção harmônica total (THD), PF e excursões de tensão, sem carga para carga total. Este é um problema matemático

complexo. Para (ZUBI, DUNN, ROBINSON & EL-WERFELLI, 2010) aplica algoritmo genético (GA) para a otimização desses parâmetros usando a função fitness:

$$Fitness = THD + \Delta V_0 + \left(\frac{1}{PF}\right) \quad (4.51)$$

Os parâmetros assim calculados para um conversor de velocidade ajustável de 5,5 kW (ASD) são:

$$\begin{aligned} L_1(mH) &= 10.1 \\ L_f(mH) &= 8.1 \\ C_f(\mu H) &= 21 \end{aligned}$$

O THD é limitado a 6–6,5%, PF 0,98–0,99 e  $\Delta V_0 = 3,0–3,2\%$  para o TEA de 5,5-kW. Os parâmetros devem ser calculados para cada classificação de ASD. O filtro tem limitação quando várias fontes não lineares estão presentes.

#### **4.19 Filtros amortecidos**

A Figura 4.16 mostra quatro tipos de filtros amortecidos. O filtro de primeira ordem não é usado, pois tem perda excessiva na frequência fundamental e requer um capacitor grande. A passagem alta de segunda ordem é geralmente usada em filtros compostos para altas frequências.

O filtro é mais comumente descrito como um filtro passa-alta de segunda ordem. Se fosse para ser usado para o espectro completo de harmônicos, o tamanho do capacitor se tornaria grande e as perdas de frequência fundamental no resistor seriam consideradas. O filtro de terceira ordem tem uma redução substancial nas perdas de frequência fundamental devido à presença de  $C_2$ , o que aumenta a impedância do filtro;  $C_2$  é muito pequeno comparado a  $C_1$ . O desempenho de filtragem dos filtros tipo C está entre os filtros de segunda ordem e terceira ordem.  $C_2$  e  $L_2$  são sintonizados em série na frequência fundamental e a perda de frequência fundamental é reduzida.

Os filtros de passagem de banda dão origem a uma frequência de ressonância deslocada, enquanto os filtros amortecidos não. Esta vantagem de filtros amortecidos pode ser explorada e possíveis ressonâncias em frequências deslocadas podem ser evitadas. Ao contrário dos múltiplos filtros paralelos sintonizados, não há ramificações paralelas, mas o dimensionamento do componente torna-se comparativamente grande e pode não ser possível explorar essa vantagem em todos os projetos do sistema.

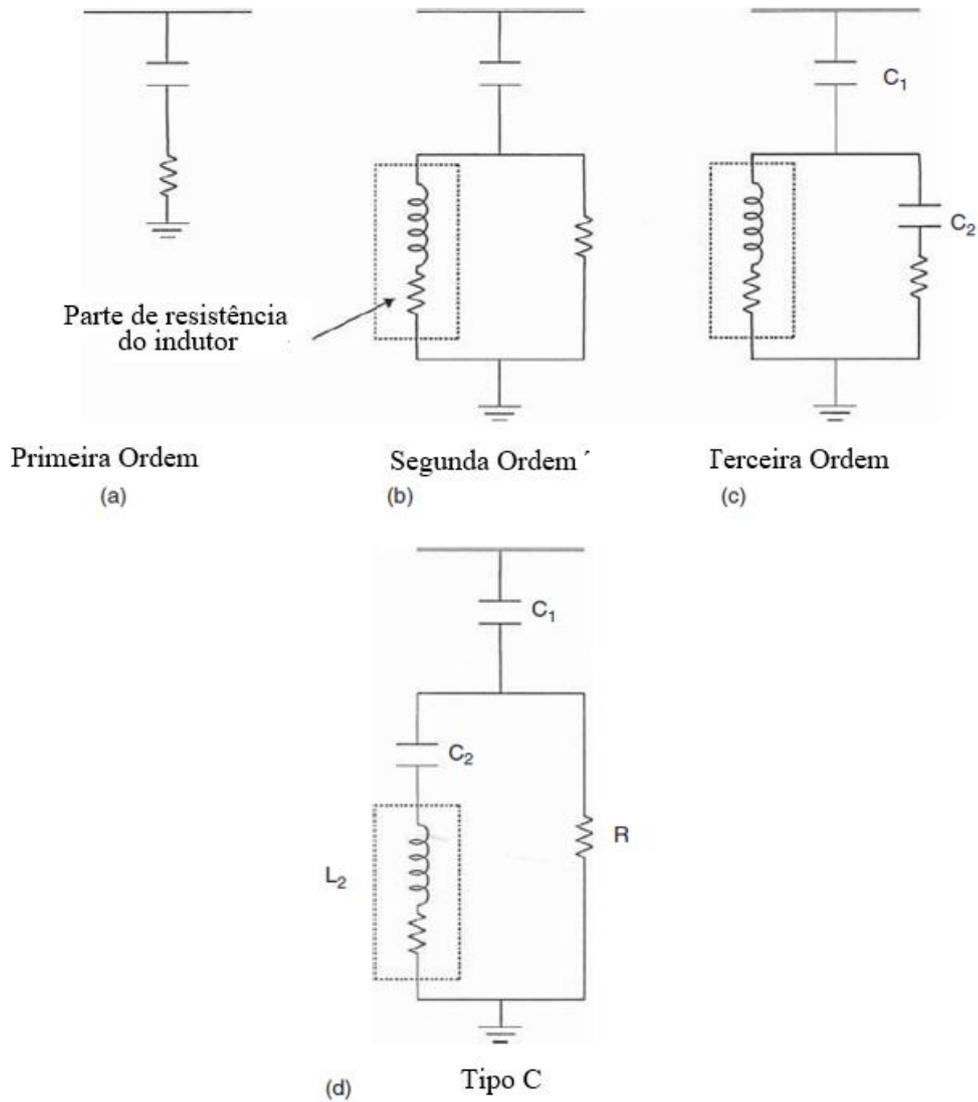


Figura 4.16: Circuitos de filtros amortecidos. (a) Filtro de primeira ordem, (b) filtro de segunda ordem, (c) filtro de terceira ordem e (d) filtro tipo C.

Fonte: DAS, (2015).

O desempenho e o carregamento são menos sensíveis às tolerâncias. O comportamento dos filtros amortecidos pode ser descrito pelos dois parâmetros a seguir (ANISWORTH, 1965), que é o trabalho fundamental nesses tipos de filtros:

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad (4.52)$$

A impedância pode ser expressa na forma equivalente paralela:

$$f_o = \frac{1}{2\pi CR} \quad (4.53)$$

Onde:

$$G_f = \frac{m^2 x^4}{R_1 [(1-mx^2)^2 + m^2 x^2]} \quad (4.54)$$

$$B_f = \frac{x}{R_1} \left[ \frac{1-mx^2+m^2x^2}{(1-mx^2)^2+m^2x^2} \right] \quad (4.55)$$

Onde:

$$X = \frac{f}{f_0} \quad (4.56)$$

Considerando que o filtro está em paralelo com um sistema AC de admitância  $Y_a < \pm \phi_a$  ( $max$ ), então a admitância total mínima como  $\phi_a$  e  $Y$  varia é:

$$Y = B_f \cos \phi_a + G_f \sin \phi_a \quad (4.57)$$

desde que o sinal de cada termo seja tomado como positivo e  $x$  seja menor que o valor que dá:

$$|\cot \phi_f| = \left| \frac{G_f}{B_f} \right| = |\tan \phi_a| \quad (4.58)$$

Para um dado  $C$ , selecione os parâmetros  $f_0$  e  $m$  para obter uma admitância suficientemente alta (baixa impedância) acima da faixa de frequência requerida. Valores de  $m$  são geralmente entre 0,5 e 2.

#### ***4.20 Filtro passa-alta de segunda ordem***

As características de um filtro passa-alta de segunda ordem são mostradas na Figura 4.17, com seus gráficos  $R-X$  e  $I$ . Tem baixa impedância acima de uma frequência de canto; assim, ele desviará uma grande porcentagem de harmônicos na frequência de canto ou acima dela. A nitidez do ajuste nos filtros passa-alta é o recíproco dos filtros sintonizados:

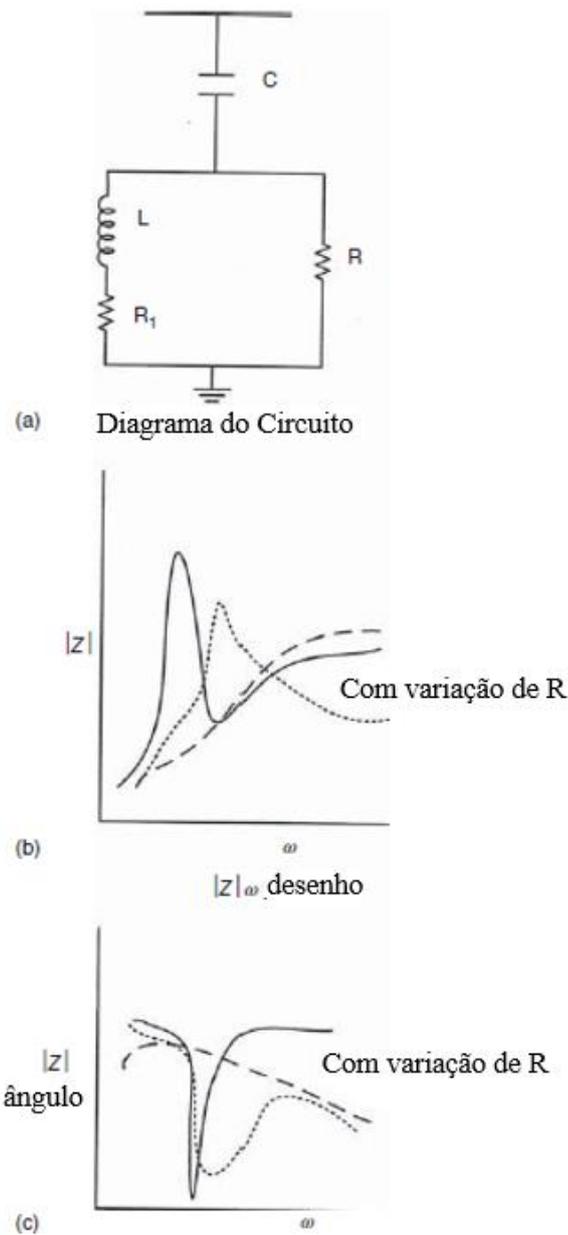


Figura 4.17: Filtro Passa Alta de segunda ordem (a) Circuito, (b) plotagem de  $R - X$  e (c)  $z - \omega$ .

Fonte: DAS, (2015).

$X_{LN} = X_{CN}$  na frequência sintonizada. A impedância do filtro é dada por:

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (4.59)$$

Quanto maior a resistência, maior a nitidez da afinação. O valor de  $Q$  pode variar de 0,5 a 2 e não há  $Q$  ótimo, diferentemente dos filtros de passagem de banda.

A potência reativa do capacitor na frequência fundamental é a mesma que para um filtro. O carregamento na harmônica  $h$  é:

$$I_h^2 \frac{X_c}{h} = \frac{1}{S_f} \frac{I_h^2}{h} V^2 \left[ \frac{n^2}{n^2-1} \right] \quad (4.60)$$

Assim, o carregamento harmônico total é:

$$V^2 \frac{n^2}{S_f(n^2-1)} \sum_{h=\min}^{h=\max} \frac{I_h^2}{h} \quad (4.61)$$

O carregamento do reator na frequência fundamental pode ser calculado assumindo que a corrente através do resistor paralelo é zero, isto é, a corrente através do indutor é a mesma que através do capacitor; então, o carregamento de frequência fundamental é:

$$I_L^2 X_L = I_h^2 \frac{X_c}{n^2} = \frac{S_f}{n^2} \left[ \frac{n^2}{2} - 1 \right] \quad (4.62)$$

Na harmônica  $h$ , a corrente harmônica  $I_h$  se divide em resistência e indutância. O componente indutivo da corrente é:

$$I_{hL} = I_h \frac{R}{R+j\omega L} = I_h \frac{Q}{[Q^2+(h/n)^2]^{1/2}} \quad (4.63)$$

A carga harmônica total é, portanto,

$$= Q^2 \frac{V^2}{S_f} \left[ \frac{n^2}{n^2-1} \right] \sum_{h=\min}^{h=\max} \left[ h \frac{I_h^2}{Q^2 n^2 + h^2} \right] \quad (4.64)$$

A perda no resistor pode ser calculada da seguinte forma:

$$R = QhX_L \quad (4.65)$$

$$|I_R| = \frac{|I_L|X_L}{R} = \frac{I_L}{Qn} \quad (4.66)$$

Assim, a perda de energia é:

$$I_R^2 R = \frac{1}{Qn} I_L^2 X_L \quad (4.67)$$

$$= \frac{1}{Qn} (Mvar \text{ carregando}) \quad (4.68)$$

$$\frac{S_f}{Qn^3} \left[ \frac{n^2}{n^2-1} \right] \quad (4.69)$$

Pode-se mostrar que, geralmente, para harmonizar harmônicos de ordem inferior, é necessário um filtro passa-alta de segunda ordem muito maior. Praticamente, um ou mais filtros sintonizados são usados para harmônicos de ordem mais baixa, e o filtro passa-alta de segunda ordem fornece filtragem de harmônicas de maior ordem e redução de entalhe. Às vezes, filtros sintonizados paralelos, sintonizados para harmônicos de baixa ordem específicos, são fornecidos com um filtro passa-alta de segunda ordem (Figura 4.18). Nesta figura,  $R_l$  são os resistores associados aos reatores de filtro. O efeito da variação da resistência  $R$  na plotagem  $Z-\omega$  de um filtro passa alta de segunda ordem atuando sozinho é mostrado na Figura 4.19. O filtro passa-alta de segunda ordem pode ser efetivamente projetado para as harmônicas de ordem mais alta, enquanto os filtros sintonizados atendem a harmônicos de ordem inferior. Como os filtros amortecidos não originam uma frequência de ressonância deslocada, a aplicação é muito desejável quando existe uma banda de inter-harmônicas.

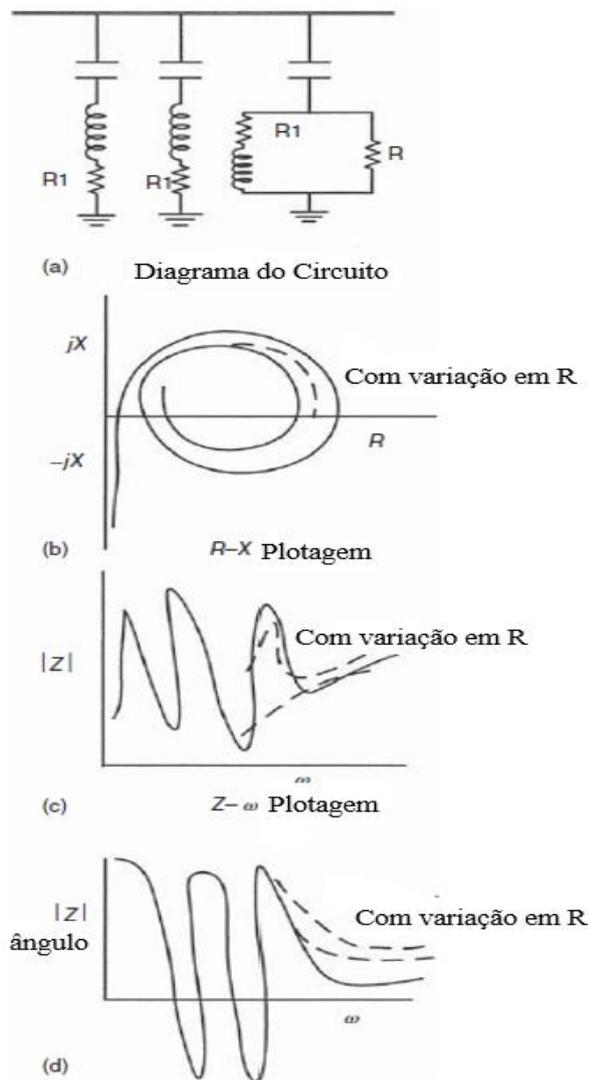


Figura 4.18: (a) Circuito de dois paralelos Filtros sintonizados com uma passa alta de segunda ordem filtro, (b) gráfico  $R - X$ , (c)  $z - \omega$  plotado e (d) plotagem angular.

Fonte: DAS, (2015).

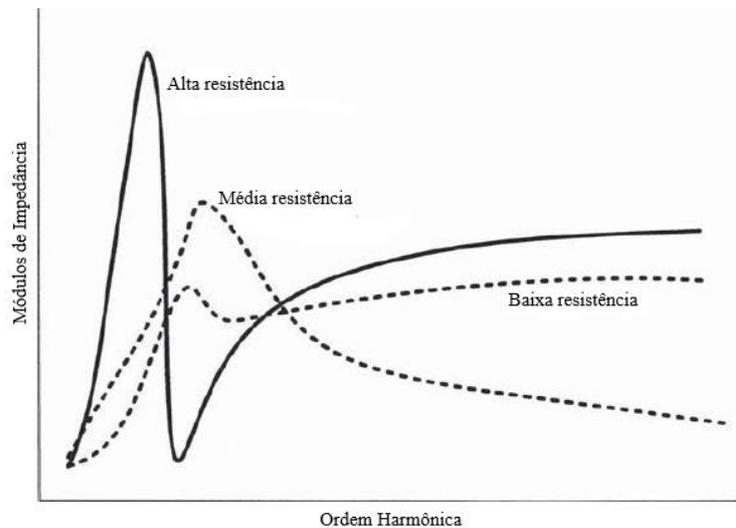


Figura 4.19: Efeito da magnitude da resistência  $R$  nas características de impedância em um filtro passa-alta de segunda ordem.

Fonte: DAS, (2015).

#### 4.21 - Filtro Tipo C

O filtro C foi introduzido pela primeira vez no projeto de interconexão França-Inglaterra HVDC (ABRAMOVICH & BREWER, 1982; ZAMANI, 2008; CIGRE WORKING GROUP 14.0, 1990), e depois nos projetos *Intermountain* e *Quebec – New England* HVDC. Ele pode substituir os filtros ST convencionais de forma eficaz e encontra seu uso em fornos de arco e fornos de panela (GERCEK, 2011; ALEEM, ZOBAA & AZIZ, 2012). A Figura 15.13 (a) mostra o circuito equivalente de um filtro tipo C. Negligenciando a resistência do reator, a impedância de um filtro tipo C é dado por:

$$\begin{aligned}
 Z(\omega) &= \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L + 1/(j\omega C)} \right)^{-1} + \frac{1}{j\omega C_1} \\
 &= \frac{R(\omega^2 LC - 1)^2 + jR^2 \omega C (\omega^2 LC - 1)}{(R\omega C)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} - j \frac{1}{\omega C_1}
 \end{aligned} \tag{4.70}$$

A impedância varia com a frequência. Para evitar perda de potência na frequência fundamental  $f$  no resistor de amortecimento  $R$ , os componentes  $L$  e  $C$  são sintonizados na frequência fundamental:

$$\omega_f^2 LC = 1 \tag{4.71}$$

Portanto, a impedância do filtro na frequência fundamental é determinada por  $C_1$ :

$$Z(\omega_f) = \frac{-j}{\omega_f C_1} = -j \frac{V_s}{Q_f} \quad (4.72)$$

Onde:

$Q_f$  é o requisito de potência reativa na frequência fundamental e  $V_s$  é a tensão nominal do sistema. Isso permite um cálculo direto de  $C_1$ .

À medida que a frequência aumenta,  $L$  começa a ressoar com  $C + C_1$ , o que faz com que o filtro atue como um filtro sintonizado com um resistor de amortecimento.

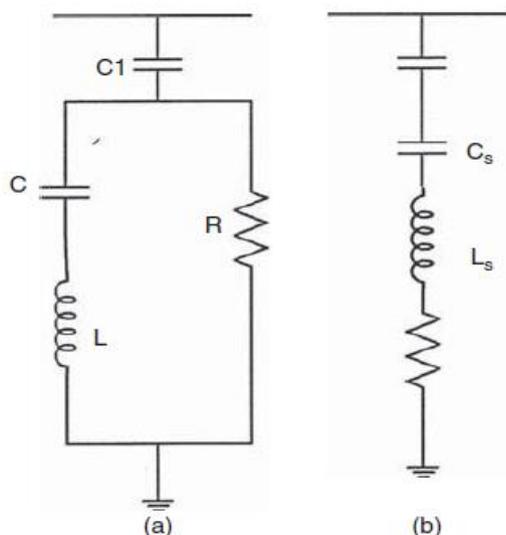


Figura 4.20 - (a) Filtro tipo C e (b) equivalência com um filtro ST.  
Fonte: DAS, (2015).

A impedância varia com a ordem do harmônico:

$$\frac{R[jX(h-1/h)]}{R+[jX(h-1/h)]} - j \frac{X_1}{h} \quad (4.73)$$

Na frequência sintonizada, a reatância total do filtro é zero:

$$\frac{R^2 \omega_0 C (\omega_0^2 LC - 1)}{(R \omega_0 C)^2 + (\omega_0^2 LC - 1)^2} - \frac{1}{\omega_0 C_1} = 0 \quad (4.74)$$

Onde:

$\omega_0$  é a frequência sintonizada em radianos.

E a resistência total do filtro é:

$$r = \frac{R(\omega_0^2 LC - 1)^2}{(R \omega_0 C)^2 + (\omega_0^2 LC - 1)^2} \quad (4.75)$$

O filtro se comporta como uma resistência equivalente na frequência sintonizada.

Das equações acima:

$$\frac{\omega_0 RC}{\omega_0^2 LC - 1} = \frac{1}{r\omega_0 C_1} \quad (4.76)$$

E

$$r = \frac{R}{\frac{1}{(r\omega_0 C_1)^2} + 1} \quad (4.77)$$

Então, na frequência sintonizada:

$$r^2 - Rr + \frac{1}{(\omega_0 C_1)^2} = 0 \quad (4.78)$$

Se  $h_0$  é o harmônico sintonizado, então:

$$h_0 = \omega_0 \sqrt{LC} \quad (4.79)$$

Se introduzirmos um termo:

$$R_0 = \frac{2}{\omega_0 C_1} \quad (4.80)$$

e

$R$  deve ser  $>R_0$ , digamos  $R = mR_0$ , para  $m \geq 1$ , depois Eq. (4.78) torna-se:

$$r^2 - mR_0 r + \frac{R_0^2}{4} = 0 \quad (4.81)$$

Uma raiz positiva é:

$$r = \frac{m - \sqrt{m^2 - 1}}{2} R_0 \quad (4.82)$$

Com base no valor de  $r$ , os parâmetros de filtro  $L$  e  $C$  são os seguintes:

$$C = \frac{h_0^2 - 1}{m^2 - m\sqrt{m^2 - 1}} \frac{Q_f}{2V_S^2 \omega_f}$$

$$L = \frac{m^2 - m\sqrt{m^2 - 1}}{h_0^2 - 1} \frac{2V_S^2}{\omega_f Q_f} \quad (4.83)$$

$L$  e  $C$  podem ser selecionadas supondo  $m > 1$ , mas estes não são os resultados finais ou ótimos. Porque  $L$  e  $C$  estão sintonizados na frequência fundamental, a corrente fundamental  $I_f$  se fluirá inteiramente através dos componentes  $L$  e  $C$ :

$$I_f = \frac{V_s}{\sqrt{3}} \omega_f C_1 \quad (4.84)$$

A potência reativa através de  $L$  e  $C$  deve ser a mesma; isso significa que quanto maior o  $L$  e menor o  $C$  ou vice-versa. Se suas capacidades puderem ser reduzidas a um mínimo, o investimento total no filtro será reduzido.

Examine a função:

$$g(m) = m^2 - m\sqrt{m^2 - 1} \quad (4.85)$$

Sua derivada é sempre negativa e monótona função decrescente. Seu máximo é dado por:

$$g(m) = m^2 - m\sqrt{m^2 - 1} \rightarrow 0.5, \text{ as } m \rightarrow \infty \quad (4.86)$$

Isto dá os parâmetros  $L$  e  $C$  como:

$$\begin{aligned} C &= \frac{(h_0^2 - 1)Q_f}{\omega_f V_s^2} \\ L &= \frac{V_s^2}{(h_0^2 - 1)\omega_f Q_f} \end{aligned} \quad (4.87)$$

Isto é baseado na suposição de que  $m$  é infinito. Isso significa que não há resistência paralela  $R$  no filtro do tipo C. Então, o filtro retorna a um filtro, com equivalência como mostrado na Figura 4.20 ítem (b).

$L_s$  é o mesmo que  $L$  no filtro do tipo C:

$$L_s = \frac{V_s^2}{(h_0^2 - 1)\omega_f Q_f} \quad (4.88)$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C_1} = \frac{0}{h_0^2 \omega_f V_s^2} \quad (4.89)$$

Isso ajuda no cálculo dos parâmetros do filtro C.

Finalmente, para obter  $R$ , o fator de qualidade do filtro  $Q_{\text{filtro}}$  pode ser usado. É dado por:

Praticamente, para muitos projetos de HVDC,  $Q$  varia de 1 a 2. O estudo de caso 2 no mostra a aplicação de um filtro tipo C em uma instalação de forno a arco.

A Tabela 4.1 mostra alguns parâmetros de filtros do tipo C aplicados em projetos HVDC. As características em relação à frequência são mostradas na Figura 4.21.

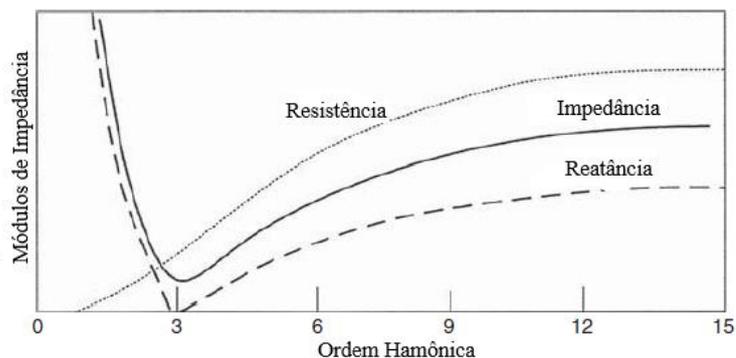


Figura 4.21 - Características do filtro tipo C, resistência, reatância e impedância versus frequência.

Fonte: DAS, (2015).

Tabela 4.1: Parâmetros dos filtros do tipo C em alguns projetos de HVDC.

Projetos ↓Parâmetros→	f	H <sub>0</sub>	kV	Q	Q <sub>filter</sub>	R(ohms)	L (mH)	C (μ F)	C <sub>1</sub> (μ F)
Interconexão França – Inglaterra	50	3	400	130	1.64	666	424	23.89	2.586
Usina elétrica a carvão USA	60	3	345	58	2	1300	658	10.7	1.3
Quebec – New England Radisson	60	3	315	49	2	1349	671	10.48	1.31
Nicolet terminal	60	3	230	38	2	928	462	1524	1.91
Sandy Pond Terminal	60	3	345	88	1	450	450	15.63	1.954
Longqan – Zhenping	60	3	525	118	2.3	1800	929.39	10.929	1.363

Fonte: DAS, (2015).

#### 4.22 - Filtro passa baixa

A configuração básica é mostrada na Figura 4.22. Esse tipo de filtro, quando projetado adequadamente, não deve resultar em problemas de ressonância. O capacitor atua como um caminho de baixa impedância para os harmônicos gerados pela carga. As correntes de alta frequência são absorvidas pelo capacitor. Na frequência fundamental, o capacitor fornece energia reativa e causa um aumento de tensão no reator. Esta tensão pode ser controlada por

um transformador de regulagem para reduzir a tensão para a carga. Se a tensão não for controlada, pode causar sobrecargas como ASDs em sobretensão.

As seguintes equações podem ser escritas como:

$$X_0 = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.90)$$

O tamanho do filtro é:

$$Q_{filter} = \frac{V^2}{X_C - X_L} = \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1} Q_C \quad (4.91)$$

A impedância da série na harmônica  $h$  é:

$$Z_h = R_h + j \left( hX_L - \frac{X_C}{h} \right) \quad (4.92)$$

A tensão na frequência fundamental através do capacitor é:

$$V_{c,f} = V_{busf} \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1} \quad (4.93)$$

Onde:

$V_{barramento, f}$  é a tensão de frequência fundamental no barramento.

E a tensão harmônica no capacitor na frequência sintonizada é:

$$-j \frac{X_n}{R} = -jQ \quad (4.94)$$

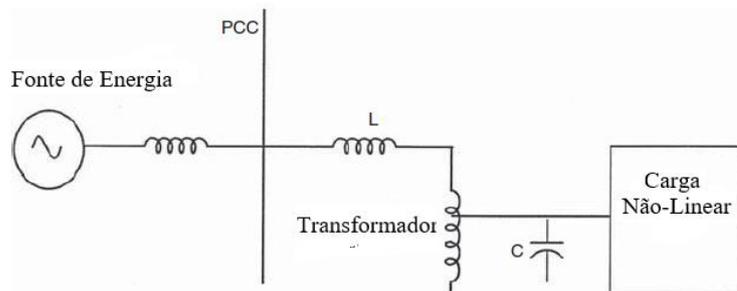


Figura 4.22- Filtro tipo passa baixa.

## **CAPÍTULO 5**

### **APLICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO**

#### **5.1 - Perfil da empresa**

Por motivos éticos a empresa em estudo será denominada de empresa KDW Engenharia. A indústria é destinada para área de fabricação de equipamentos eletrônicos, aparelhos digitais, áreas de telecomunicações e retransmissão de sinais televisivos, construção civil, investimentos imobiliários. Contando com um moderno parque industrial, equipamentos de última geração e profissionais capacitados, a empresa A presta serviços de qualidade superior, terceirizando a produção de placas de circuito para grandes empresas do Pólo Industrial de Manaus. A indústria A é uma empresa local que oferece soluções eficazes e custos competitivos em Contrato de Manufatura (CM) em diversos segmentos tecnológicos como produtos de áudio e vídeo, informática, telecomunicações e outros. Temos a fabricação dos seguintes equipamentos: barebones, celulares, desktop, notebooks, receptores, motherboard.

##### **5.1.1 - Política de qualidade**

A direção da indústria KDW Engenharia, em conformidade com requisitos da norma, NBR ISO 9001: 2015 se comprometem a manter a melhoria continua do seu SGQ(Sistema de Gestão da Qualidade), que significa um conjunto de elementos interligados, integrados na organização, que funciona como uma engrenagem para atender à Política da Qualidade e os objetivos da empresa, tornando visível nos produtos e serviços e atendendo as expectativas dos clientes, através do atendimento em:

- a) Garantir a excelência em atendimento ao cliente por meio do rigoroso controle de qualidade em nossos processos, produtos e serviços;
- b) Atender aos requisitos dos nossos clientes, legais e outros associados;
- c) Gerenciar os riscos e as oportunidades que possam impactar na organização.

Promover os engajamentos de todos os colaboradores, contribuindo para um excelente resultado.

#### **5.2 - Levantamento de dados**

## Relatório técnico preliminar

### Introdução

Este relatório preliminar apresenta um estudo do diagnóstico da qualidade de energia elétrica da empresa KDW DA AMAZÔNIA. Os requisitos para qualidade de energia elétrica analisados foram: Distorções harmônicas de tensão (DHTv), Fator de Potência, Potência Reativa em Regime Permanente, Potência Ativa em Regime Permanente, Análise de Tensão em Regime Permanente e Análise de Corrente em Regime Permanente.

### Campanha de Medição:

Os dados foram obtidos a partir de campanhas de medição realizada na subestação da empresa KDW DA AMAZÔNIA no mês de dezembro de 2017. Na subestação de 13,8 kV foram medidos os módulos das tensões e correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem no consumidor industrial, foram medidos, em cada, os módulos das correntes harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª, respectivamente.

A subestação de energia elétrica da empresa em estudo, está instalada com uma entrada em média tensão de 13.800V por fase, e transformadores de baixa tensão de 1000kva (220v), e outro de 500kva (380v), e um gerador de energia elétrica de 500kva, para alimentação somente nos setores de escritório e sala de TI, conforme esses dados das instalações da empresa foi feito um levantamento de carga de todas as máquinas e equipamentos instalados tais como: máquinas de SMD, compressores, motores eletromecânicos. Devido as diferentes ligações desses equipamentos, foi verificado o consumo de energia reativa, chegando a um fator de potência de 0,75 kVAr, portanto foi desenvolvido um estudo em sua conta de energia elétrica e constatou-se o consumo de reativo acima da média. Conforme a potência instalada criou-se um banco de capacitores na baixa tensão com 2 capacitores de 50 kVAr, para atender as correções de energia reativa conforme os padrões da concessionária de energia elétrica que é de 0,92 FP no mínimo.

Os quadros de alimentação QGBT, são constituídos de disjuntores de baixa tensão com capacidade de 2000A em 220v e outro de 500A em 380v. A subestação está alimentando duas fábricas, cada uma possui dois disjuntores de 1000A, portanto a fatura de energia elétrica é somente uma. Para medir o consumo de energia elétrica foi preciso instalar um medidor powerNET M200 IMS que serve para analisar os principais parâmetros elétricos de qualidade de energia com gerenciamento e softwares SCADA.

O consumo de energia elétrica da empresa em estudo em kWh está em média 280.000 kWh por mês, conforme esse consumo foi feito um levantamento para instalação dos filtros capacitivos. Os filtros automatizados industriais de 380/440v tem uma potência total de 14.000

kW, então  $14.000 \times 20 \text{ filtros} = 280.000 \text{ kW}$ , com este resultado foram instalados 20 filtros automatizados industriais 380/440. Para atender os dois tipos de tensões, foram feitos dois quadros: um quadro com 15 filtros em 220v e outro com cinco filtro capacitivos em 380v, um em cada QGBT existente. Segue os modelos de filtro capacitivo com suas principais informações:

- Filtro monofásico automatizado residencial 380/440v
- Filtro bifásico automatizado residencial 380/440v
- Filtro trifásico automatizado residencial 380/440v
- Filtro trifásico automatizado comercial 380/440v
- Filtro trifásico automatizado industrial 380/440v

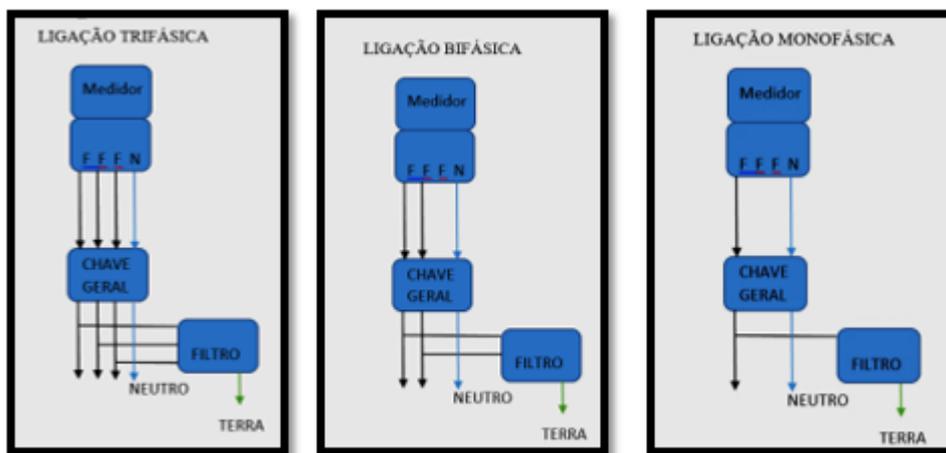


Figura 5.23:As formas de instalações e modelos de filtros.

Os principais danos causados na indústria ‘A’ estudada:

### 1. Falha de Energia

Na indústria estudada foi verificado que a falha no sistema elétrico que ocorria principalmente devido os eventos citados: relâmpagos, linhas de energia derrubadas, super-demanda da rede, acidentes, apagões. Conforme a falha foi instaladom gerador de energia elétrica de 500kva, e dois painéis com 20 filtros e paralelo ao QGBT geral.

### 2. Pico de Tensão ou Surto de Energia

A indústria ‘A’ está situada em uma área com maior índice de descarga atmosféricas, teve uma melhoria nas queimas de equipamentos, devido à presença de DPS- dispositivo de surtos- até 680V de pico de tensão, em conjunto com circuito RLC. A alta tensão em curto prazo condiz que acima de 110% do valor nominal pode ser causado por um relâmpago e pode enviar tensões

de linha para níveis superiores a 6.000 volts. Um surto de curta duração (spike) quase sempre resulta em perda de dados ou danos.

### ***3. Tensão Excessiva ou Sobretenção***

Observou-se que a Tensão de linha aumentava por períodos prolongados, de poucos minutos a alguns dias, que era provocada por uma rápida redução nas cargas de energia, equipamentos pesados sendo desligados ou mudança de rede, sobrecarregando a tensão dos equipamentos que permanecem na rede. Um dos componentes de automação que compõe o sistema RLC dos filtros capacitivos é o varistor, que é um componente responsável pela proteção através do corte e desvio de surtos para o aterramento próprio.

### ***4. Ruído na Linha***

Na indústria 'A' foi observada a interferência magnética gerada por aparelhos de solda, e impressoras SCR, que são ondas de alta frequência. Através destes problemas apontados, identificamos que nos filtros capacitivos são formados por capacitores eletrolíticos, com responsabilidade exclusiva para captação de ruídos, ou seja, evitando desperdício de energia elétrica.

### ***5. Transiente de Comutação***

Tensão instantânea e subtensão (nó) no intervalo de nano segundos Causa: A duração normal é menor do que um surto de curta duração (spike) e geralmente cai na faixa de nano segundos.

### ***6. Distorção Harmônica***

Distorção da forma de onda normal da linha, geralmente transmitida por cargas não lineares Causa: Fontes de energia comutada, motores de velocidade variável e drives, copiadoras e aparelhos de fax são exemplos de cargas não lineares. Podem causar erros de comunicação, superaquecimento e danos ao hardware.

Segue alguns exemplos de aplicações de Filtros para resolução de inúmeros problemas existentes dentro da rede elétrica. Soluções estas denominadas de filtros, seja filtro de linha, filtro de harmônica, filtro de alta tensão, dentre outros. Mas analisando o custo benefício das aplicações chegamos à conclusão de que o Filtro Capacitivo adéqua em todas estas soluções.

#### ***Valores:***

- Eficiência com o melhor funcionamento dos equipamentos.
- Sustentabilidade, pois o equipamento diminui a emissão de CO<sub>2</sub>- aumentando a vida útil de motores e placas eletrônicas.
- Tecnologia usada no processo de produção do filtro capacitivo.

### ***Benefícios de proteção:***

- Proteção na rede elétrica local contra distorções causadas por surtos.
- Proteção quanto a queima de motores e equipamentos até 680V.
- Aumento da vida útil de motores e equipamentos eletroeletrônicos.
- Diminuição na parada de equipamentos, devido a desarme de disjuntores e queimas de fusíveis.

### ***Benefício de eficiência:***

- Maior desempenho e durabilidade de equipamentos.
- Ganhos diretos de 8 a 20% no consumo registrado de energia.

### ***5.3 Diagrama Unifilar para Aplicação dos Filtros***

A figura 10 mostra o diagrama unifilar da empresa onde foram instalados os filtros capacitivos visando melhor desempenho da qualidade de energia elétrica na indústria.

Na alimentação da concessionária de energia elétrica temos os postes de 11/300kg/f – M4/N3 com chave CUC 200A- 15 KVA, interligando 3#1/0 na tensão de 13.8 KV, derivando para alimentação da ‘SE’ da indústria KDW da Amazônia, temos os postes de entrada 11/300 kg/f –N4 na tensão 13.8 KV, com uma proteção de três Para-raios Poliméricos 12KV-10KA com separadores automáticos, do poste interno até a subestação temos as muflas externa, ou seja, (Terminal modular 15KV TM 50/20), com cabos de 25mm<sup>2</sup> 15KV, derivando para o TP (Transformador de potencial) e TC (transformador de corrente) de 500/5, este equipamento é fornecido pela concessionária de energia para suas medições. Continuando na média tensão, seguindo pela bucha passa murro, chegando no dispositivo de manobra a (Chave seccionadora tripolar seca de 400A-15kv comando simultâneo), alimentando o disjuntor tripolar de 350MVA-630A classe 15KV, a óleo de média tensão, este equipamento é responsável pela manobra e proteção de todo o sistema, através do Relé PEXTRON URPE 7104T com sobrecorrente + sub/sobretensão e continuidade de bobina e trip capacitivo, assim derivando para o transformador de 1000KVA, rebaixando para tensão de 220V, até o QGBT de distribuição, onde encontra-se em paralelos o painel com Filtros Capacitivos.

Figura 5.32: descreve o diagrama unifilar da SE, e indica o ponto exato de instalação dos filtros capacitivos.



Regime Permanente, Potência Ativa em Regime Permanente, Análise de Tensão em Regime Permanente e Análise de Corrente em Regime Permanente.

#### 5.4 Medição com analisador HIOKI

Os dados foram obtidos a partir de campanhas de medição realizada na subestação da empresa KDW da Amazônia no mês de novembro de 2018. Na subestação de 13,8 kV foram medidos os módulos das tensões e correntes harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordem no consumidor industrial, foram medidos, em cada, os módulos das correntes harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>, respectivamente. O equipamento utilizado o analisador de qualidade de energia, modelo PW3198 HIOKI com as seguintes características:



Figura 5.25: Analisador de Qualidade de Energia PW 3198-90 HIOKI.  
Fonte: Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica ITEGAM, (2018).

- ❖ 1P2W para 3P4W
- ❖ Medições de 50, 60 e 400 Hz.
- ❖ Sincronismo de relógio GPS (opcional)
- ❖ Fator de potência, SAGS, SWELLS, FLICKER, transientes
- ❖ Harmônicos até a 50a. ordem
- ❖ Captura com precisão transiente de alta velocidade com amostragem de 2MHz
- ❖ Detecção e visualização de forma de onda
- ❖ Quatro canais de tensão e quatro canais de corrente

- ❖ Software avançado para PC
- ❖ Harmônicos de ordem superior

### **Precaução com o sistema elétrico da empresa**

- ❖ Cabeamento
- ❖ Percurso relativo aos cabos de potência e de baixa corrente – sistemas de controle e automação
- ❖ Posicionamento dos equipamentos em relação às fontes de perturbações
- ❖ Sistema de aterramento

### **Alterações na forma de onda**

- ❖ Variação da forma de onda
- ❖ Variação de amplitude e frequência

### **Alteração na forma de onda**

- ❖ Harmônica, Surto, Transiente, Notching, Ruídos.

### **Técnica de mitigação dos distúrbios da energia elétrica**

- Avaliação da instalação elétrica (Subestação, malhas de controle e usuário) - NR-10
- Identificação dos problemas de QEE por instalação de medidores. No PCC – solicitação junto a concessionária.
- Entendimento do processo produtivo (relato de produção, manutenção, qualidade)
- Histórico de ocorrência de problemas com suspeita de distúrbios de QEE
- Relação dos equipamentos e cargas críticas
- Levantamento de dados estatísticos de paradas
- Simulação dos distúrbios em laboratório (se possível), com implementação de soluções e análise de resultados
- Avaliação dos resultados
- Proposição de soluções
- Implantação das soluções propostas
- Avaliação dos resultados

### **ANEEL- PRODIST- Módulo 8**

Os aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório são:

- a) tensão em regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) variação de frequência.

### **Cuidando da qualidade da energia**

- ❖ Segurança
- ❖ Da informação
- ❖ Prevenção de acidentes

#### **1- Análise de Qualidade da Energia da Campanha de Medição na Empresa**

Figura 5.26: Equipamento HIOKI instalado na empresa estudada.



Fonte: Empresa Estudada, (2018).

#### **5.4.1- Análise da Tensão em Regime Permanente**

As Figuras 1 ilustra, respectivamente, os perfis de tensão nas fases A-B-C, , registrados na cabine da subestação no secundário do transformador da Empresa KDW da Amazônia S.A.

Analisando os registros da Figura 1, verificou-se que o valor da tensão RMS violou o nível adequado ( $0,95 TR \leq TL \leq 1,05 TR$ ), conforme estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, tendo em vista que os valores mínimos dos valores RMS da tensão nas fases A B, C foram 1,3178 pu, 1,3093 pu e 1,3206 pu, respectivamente; enquanto que os valores máximos dos valores RMS da tensão foram 1,3930 pu, 1,3773 pu e 1,3896 pu, respectivamente conforme são apresentadas na Tabela 1.

Figura 5.27 – Perfil da tensão nas fases A B e C da Empresa KDW da Amazônia.

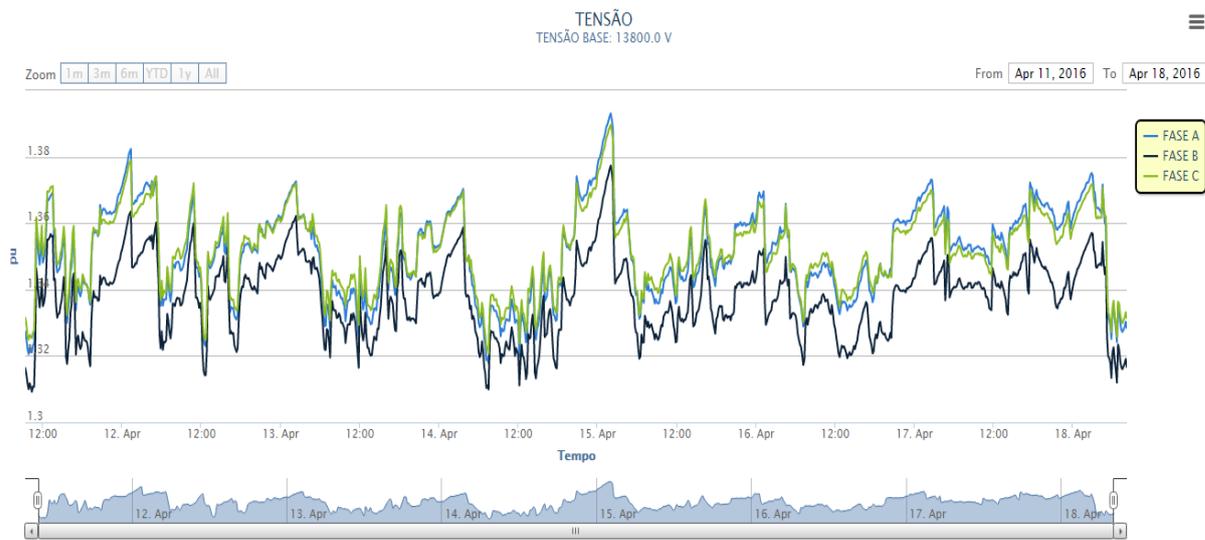


Tabela 5.1 -Valores Mínimos, Máximos e Médios de tensão RMS medidos nas fases A, B, C.

	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios
FASE A	1,3178	1,3930	1,3514
FASE B	1,3093	1,3773	1,3378
FASE C	1,3206	1,3896	1,3518

#### 5.4.2- Análise da Corrente em Regime Permanente

Analisando a Figura 2, pode-se notar que a corrente registrada, apresentou um comportamento na fase C que zerou durante a noite e as fases A e C de corrente zerou no dia, apresentando valores similares em todos os outros períodos, atingindo valores máximos na fase A = 315,6300A, fase B = 317,8100 A e fase C = 312,2100 A

Figura 5.28 – Corrente RMS registra nas fases A, B e C .

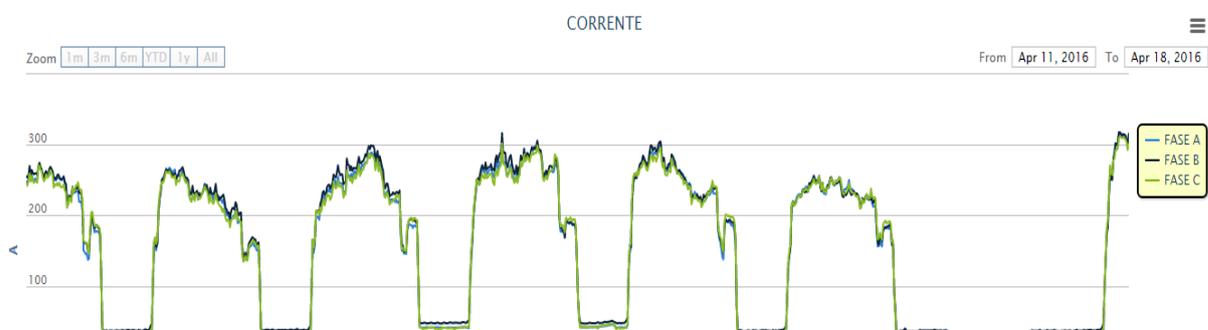


Tabela 5.2 -Valores Mínimos, Máximos e Médios de tensão RMS medidos nas fases A, B, C.

	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios
FASE A	0,0000	315,6300	144,8602
FASE B	30,5000	317,8100	152,5440
FASE C	0,0000	312,2100	146,1779

#### 5.4.3- Análise da Potência Ativa e Potência Reativa em Regime Permanente

A Figura 3, apresenta um ciclo semanal do consumo da Empresa KDW Engenharia. De acordo com essa figura, verificou-se que os dias de semana apresentaram padrões de consumo similares, atingindo valores máximos em torno de 321kW. Durante o final de semana, os registros das medidas mostram que os valores registrados encontrados foram de 0 kW (zero), conforme são apresentados os dados na Tabela 3.

Figura 5.29 – Potência ativa registrada nas fases A B e C da Empresa KDW da Amazônia.



Tabela 5.3 -Valores Mínimos, Máximos e Médios de tensão RMS medidos nas fases A, B, C.

	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios
FASE A	0,0000	3212000,0000	1395213,0739
FASE B	0,0000	3214000,0000	1413372,7545
FASE C	0,0000	3171000,0000	1396921,9062
TOTAL	0,0000	9570000,0000	4205127,2455

Como pode ser visto na Figura 4, onde estão ilustrados os valores registrados de potência reativa,

Como pode ser visto na Figura 4, onde estão ilustrados os valores registrados de potência reativa, pode-se verificar que a fase A B, C apresentou características indutivas durante o período comercial e capacitivas durante os horários da noite. Os dados também são apresentados na Tabela 4 com valores mínimos em torno de -96kVar e valores máximos em torno de 109,6kVar. A Tabela 4 apresentam os dados Valores Mínimos, Máximos e Médios obtidos nas fases A B e C.

Figura 5.30 – Potência reativa registrada nas fases A B e C da Empresa KDW da Amazônia.



	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios
FASE A	-966000,0000	1064000,0000	107647,4551
FASE B	-961000,0000	1096000,0000	30406,4371
FASE C	-950000,0000	1079000,0000	90753,4930
TOTAL	-287000,0000	3240000,0000	225194,6108

#### 5.4.4 – Análise de Fator de Potência

Como pode ser visto na Figura 5.30, onde estão apresentados os valores de fator de potência para o referido ponto de medição, apresentou valores abaixo de 0,92 (indutivo) no período (de) e valores acima de 0,92 (capacitivo) durante o período

Figura 5 - Fator de Potência registrado nas fases A, B e C da Empresa KDW da Amazônia.



Tabela 5.5 – Valores Mínimos, Máximos e Médios obtidos nas fases A B, C.

	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios
FASE A	-0,9980	0,9978	0,4324
FASE B	-0,9985	0,9979	0,3746
FASE C	-0,9983	0,9985	0,4284
TOTAL	-0,9983	0,9974	0,4103

#### 5.4.5 - Análise da Distorção Harmônica da Industria KDW da Amazônia.

Analisando a Figura 6 mostra a taxa de distorção harmônica total de tensão (DHTv) das três fases A, B, C da KDW da Amazônia, observou-se que os valores de DHT de tensão ficaram abaixo do valor limite de 8%, portanto, em conformidade com os valores de referência definidos pelo módulo 8 do PRODIST/ANEEL, uma vez que o valor máximo registrado foi igual a aproximadamente 4,68%.

Figura 5.31 - Valores de DHTv médios obtidos para as fases A-B-C.

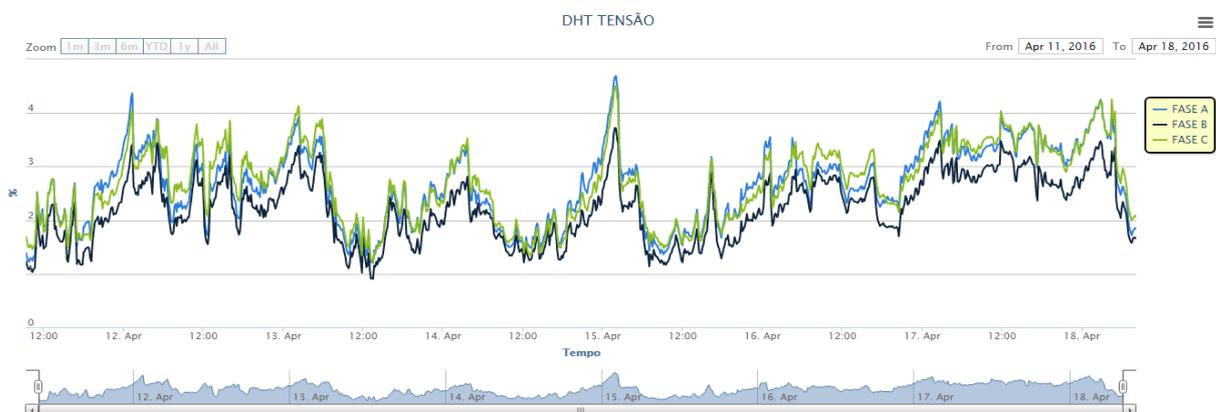


Tabela 5.6 – Valores Mínimos, Máximos e Médios de DHTv obtidos nas fases A,B,C.

	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios	Percentil (0.95)
FASE A	1,2000	4,6870	2,6564	3,7746

FASE B	0,9040	3,7190	2,2249	3,1649
FASE C	1,2180	4,5100	2,6971	3,7897

Analisando a Figura 6, que mostra a taxa de THDi das três fases A, B e C da subestação (13,8 kV) da empresa KDW da Amazônia, observou-se que os valores de THDi obtiveram o máximo na fase A com 50,7460, na fase B com 33,8970 e na fase C com 54,5370).

Verificando os valores médios de THDi, para a razão de ICC/I<sub>o</sub> = 110,4 como estabelecido na recomendação da norma IEEE 519-92, observou-se que as fases A e C foram violadas acima dos limites estabelecidos pela norma acima citada.

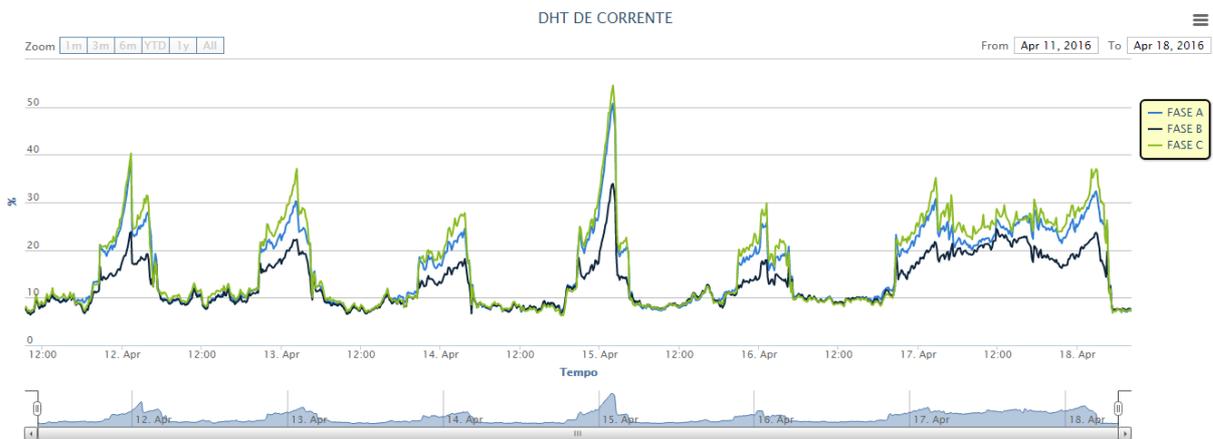


Figura 5.32 - Valores de DHTi médios obtidos para as fases A-B-C.

Tabela 5.7 – Valores Mínimos, Máximos e Médios de DHTi obtidos nas fases A,B,C.

	Valores Mínimos	Valores Máximos	Valores Médios	Percentil (0.95)
FASE A	6,8260	50,7460	15,4909	27,5982
FASE B	6,4130	33,8970	12,9254	21,8608
FASE C	6,2300	54,5370	16,4409	30,7349

Para iniciar uma instalação bem-sucedida primeiramente iniciamos a vistoria técnica que vem com o intuito de fechar o orçamento com os valores referentes à instalação e os materiais a serem utilizados. É de suma importância que em todo e qualquer indústria seja realizada esta vistoria técnica por mais simples que seja a instalação. Já que cada indústria é diferente, ou seja, possui instalações distintas, como aterramento, onde será feita a aplicação e outros detalhes específico em cada caso. É essencial que as equipes de profissionais estejam amparadas dos materiais de EPI. Segue abaixo lista de material utilizado pelos eletricitistas, para instalações elétricas em baixa e alta tensão:

- Capacete de segurança com isolamento para eletricidade com meia e bota isoladas.
- Óculos de segurança incolor e com proteção contra raios ultravioletas.

- Roupas de algodão.
- Luvas de borracha isolantes BT e AT.
- Luvas de pelica para proteção das luvas de borracha.
- Luvas de raspa para trabalhos rústicos.
- Cinturão de segurança com talabarte para trabalhos em grandes alturas.
- Terrômetro modelo Minipa com case, para medição de resistência ôhmica.

#### ***5.4.1 Materiais para instalação***

Em geral as instalações são muito fáceis, pode se dizer que é o mais simples de todo o negócio. Os materiais padronizados para as instalações são: Quadro de comando. Cabos flex 4.0 mm. Disjuntor de 10 amperes (de acordo com a quantidade de filtros que fazem o módulo). Conectores. Espiral ou eletro duto. Eletrocalha (se necessário). Buchas, parafuso e porcas. Haste com conector GTDU para aterramento, cabo de aterramento 50mm<sup>2</sup>, fita isolante convencional e de alta fusão.

Na figura 11 pode-se observar os filtros capacitivos montados, para atuar no QGBT de 220V trifásico, que ficará em paralelo com os disjuntores geral de baixa tensão de 3000A com Aj 0,9 In com os seguintes equipamentos: disjuntores trifásicos de 10A, disjuntor de 50A, trilho para disjuntor din, canaleta de PVC perfurada 50x50, cabos flexíveis de 6mm<sup>2</sup>, isolador espaçador epóxi 40x40x3/8 para barramento de cobre, barra chata de cobre eletrolítico 25,40mm x 12,70mm de 394A, terminal macho isolado 6,3mm para fio de 4mm<sup>2</sup> a 6mm<sup>2</sup>, parafuso auto brocante flangeado 4,2 por 13mm para fixação das canaletas e trilhos, quando de comando de 120cm x 80cm x 35cm.

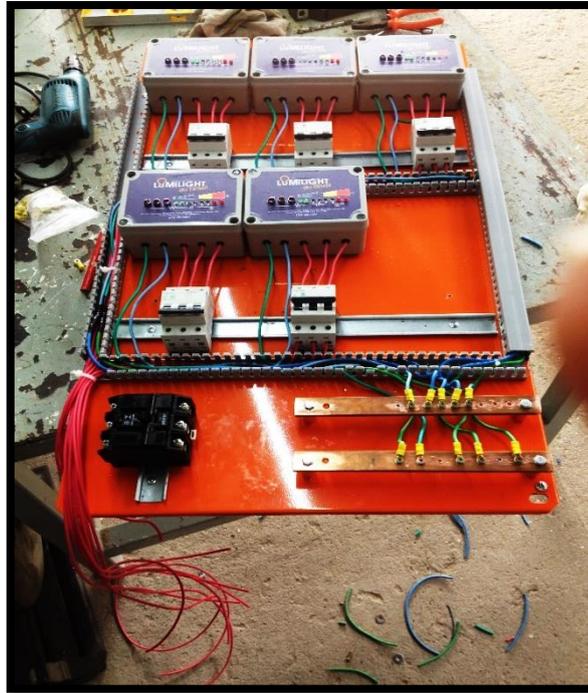
Figura 5.33 - Painel com os 15 filtros Capacitivos Montado para aplicação no QGBT/220V.



De acordo com a figura 12, é o início da montagem do quadro de comando dos filtros capacitivos na tensão de 380V, que ficará em paralelo com disjuntor de baixa tensão de 1000A Aj 0,8 In. São instalados somente 05 unidades, devidos a corrente consumida no QGBT de 380V e inferior da corrente consumida no QGBT de 220V.

Figura K: Painel sendo montado com os 5 Filtros Capacitivos aplicados na QGBT/Subestação/380V.

Figura 5.34 : Instalação de filtros na tensão 380V



Na Figura 5.35 pode-se observar o eletricitista fazendo as pontas dos cabos com solda de estanho, para melhor seu desempenho e passagem de corrente elétrica, sem perdas.

Figura 5.35: Pontos de cabos com solda de estanho do painel.



As figuras 14 e 15, temos o painel dos filtros capacitivos em pleno funcionamento e com seus LEDs todos acionados, informando o bom desempenho dos mesmos. Para as manutenções futuras ou queimas de equipamento.

Figura 5.36 Filtros colocados no QGBT/220V.



Figura 5.37 Filtros colocados no QGBT/380V.



Esta aplicação foi executada conforme as normas vigentes, e com colaboradores qualificados, contudo depois de todos levantamentos dos filtros capacitivos, e a etapa mais importante desta instalação é o aterramento, segue algumas dicas de aterramento para seu melhor desempenho.

De acordo com a NBR-5410 (1990), deve-se conseguir uma resistência de terra da ordem de  $10\Omega$ , visto que mais importante que a própria resistência, é uma perfeita equipotencialização de todos os aterramentos do local, a fim de se evitar diferenças de potenciais, ou seja, todos os sistemas de aterramento devem estar interligados. Assim, o valor recomendado pela norma baseia-se num sistema de aterramento de para-raios, pois, se o mesmo estiver presente, estará conectado ao sistema e será adotado como padrão, uma vez que exige menor valor de resistência de aterramento. Cabe lembrar aqui, que não adianta concentrar muitos eletrodos em uma pequena área, é melhor obter um aterramento com  $20\Omega$  e baixa impedância do que um com  $15\Omega$  e impedância muito elevada, isso sem citar o alto custo do projeto como esse trás.

Diante de todos os tipos de aterramento, a melhor recomendação para instalações dos filtros capacitivos é o esquema de aterramento TT, que comparando as correntes de falta direta, fase-massa são inferiores a uma corrente de curto-circuito, podendo, todavia, ser suficiente para provocar o surgimento de tensões perigosas. O esquema TT possui um ponto de alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodos de aterramento eletricamente distintos do eletrodo de aterramento da alimentação. Assim após os filtros realizarem a dissipação de harmônica para solo, não terá como retornar para o condutor neutro.

### 5.5 Resultados da Aplicação

Neste tópico encontra-se gráficos e tabelas, dos resultados encontrados. Demonstrando todos parâmetros de consumo, sendo uma ligação industrial, grupo A em alta tensão, com contrato na bandeira verde e demanda contratada de 600 KW, e consumo de ponta entre horário de 20:00 a 23:00, aumentando o preço do Kw/h para R\$ 1.197799.

Tabela 5.8 DEMONSTRATIVO DE CONTAS ANTES

Conta de energia antes da instalação dos filtros capacitivos				
Itens faturados	Consumo KW/h	Tarifa por consumo KW/h	Tarifa sem imposto	Valor
Consumo de ponta	31.080	1,197799	0,898350	37.227,59
Demanda	775	9,946664	7,460000	7.708,66
Consumo fora de ponta	273.840	0,488533	0,366400	133.779,87
Energia reativa excedente fora de ponta	2.520	0,347706	0,260780	876,21
Demanda ultrapassada	175	19,893328	14,920000	3.481,33
Contribuição de iluminação pública (COSIP)				5.890,56
Total desta fatura				188.964,22

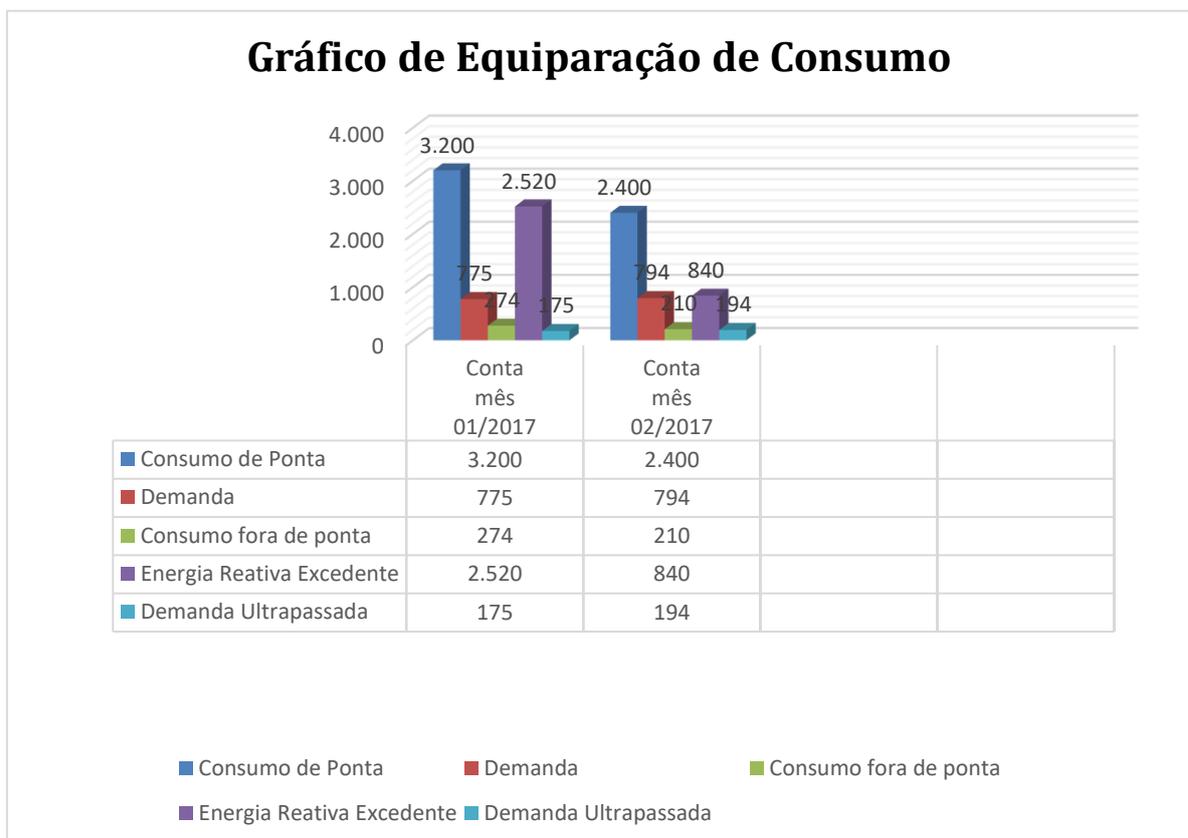
Tabela 5.9 DEMONSTRATIVO DE CONTAS DEPOIS

Conta de energia depois da instalação dos filtros capacitivos				
Itens faturados	Consumo Kw/h	Tarifa por consumo KW/h	Tarifa sem imposto	Valor
Consumo de ponta	24.400	1,197799	0,898350	29.226,29
Demanda contratada 600 KW	794	9,946664	7,460000	7.897,65
Consumo fora de ponta	209.800	0,488533	0,366400	102.494,22
Energia reativa excedente fora de ponta	840	0,347706	0,260780	292,07

Demanda ultrapassada	194	19,893328	14,920000	3.859,30
Contribuição de iluminação pública (COSIP)				5.890,56
Total desta fatura				<b>149.660,09</b>

O gráfico da tabela 5.9, mostra e equiparação do consumo na indústria KDW da Amazônia LTDA, onde foram feitos o levantamento a partir das instalações dos bancos de capacitores, que estava pagando energia reativa excedente, e os filtros capacitivos para poder obter qualidade de energia, assim gerando economia.

Figura 5.38: Gráfico de Equiparação de Consumo na Indústria.



## CAPÍTULO 6

### 6.1 - Conclusão

Num sistema simples, onde as cargas do sistema de acionamento de seis pulsos são 77% da carga total. Quando a carga não linear é superior a 30% da demanda de carga total, uma análise cuidadosa é necessária para o controle da distorção da demanda total (TDD). Os dois barramentos de 115 kV é o ponto de acoplamento comum (PCC).

Na metodologia da aplicação industrial foram analisadas as seguintes situações:

**1. Estimativa de injeção de corrente harmônica** - A estimativa da emissão harmônica correta das cargas não-lineares é importante, o primeiro passo nas análises:

➤ Varia com a operação e a carga do sistema de acionamento, e o nível de curto-circuito na fonte da concessionária tem um efeito profundo. A análise harmônica pode ser realizada com os níveis máximo e mínimo das correntes de curto-circuito.

➤ Neste exemplo, como há apenas uma fonte harmônica, o ângulo de harmônicos não precisa ser considerado. Onde mais de uma fonte estiver presente, o ângulo de cada harmônico deve ser modelado.

➤ O pior cenário do estudo de caso é escolhido para a análise. Para o exemplo, um ângulo de  $\alpha = 15^\circ$  e o ângulo de sobreposição é de  $12,25^\circ$ .

**2. Conduzir o fluxo de carga e estabelecer a necessidade de compensação de potência reativa** - Para conduzir o estudo de fluxo de carga, é necessária uma estimativa do fator de potência das cargas lineares e não lineares. Cálculos de fluxo de carga de frequência fundamental baseados em computador mostram que o fator de potência operacional é 0,82. É necessário controlar o fator de potência no PCC para  $> 0,9$  e também o TDD no PCC dentro dos limites do IEEE 519-2014, Revisão do IEEE 519-1992. O fluxo de carga mostra uma demanda de 5.279MW e 3.676Mvar do Fonte de 115 kV, incluindo perdas do sistema. Um banco de capacitores de 1200 kVAr com barramento de 115 kV reduzirá a entrada de energia reativa da fonte de 115 kV para 2,44Mvar e fornecerá um fator de potência geral de 0,92 estabelecida pela Norma PRODIST/ANEEL.

**3. Determinar o nível de curto-circuito e a demanda de carga no PCC** - Para calcular o TDD permissível, é necessário um nível de curto-circuito no PCC e a demanda de carga durante um período de 15min ou 30min. O nível de curto-circuito no barramento de 4,16 kV, PCC, é de 36,1 kA, a demanda de carga = 800 A, a relação  $I_s / I_r = 45$  e os limites permitidos para o TDD através da norma IEEE 519-2014, Revisão do IEEE 519-1992.

## **6.2 - Algumas sugestões para continuidade deste trabalho**

A partir dos resultados obtidos até o momento, pode-se considerar os seguintes passos futuros:

- 1) Avaliar o comportamento da aplicação para verificar as diferentes dimensões e estabelecer estratégias para seu uso;
- 2) Desenvolver uma prática no setor de manutenção dentro da empresa para determinação automática do conjunto de nós candidatos para a localização da potência reativa e harmônica em grandes redes;
- 3) Continuar trabalhando em modelos de cargas não lineares para determinar mais precisamente os harmônicos gerados e os possíveis efeitos dos filtros passivos na rede;
- 4) Incorporar novos tipos de filtros passivos, tais como tipo C e o filtro de 3ª ordem e avaliar o seu comportamento.

## REFERÊNCIAS

- A. E. Emanuel. "On the assessment of harmonic pollution," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1693–1698, 1995.
- A. van Jouanne, P. Enjeti, and W. Gray. "Application issues for PWM Adjustable speed AC motor drives," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 2, no. 5, pp. 10–18, 1996.
- ACKERMANN, Thomas; KNYAZKIN, Valery. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. IEEE, 2002. p. 1357-1362.
- AHUJA, Anil. Air, Water, and Power Quality and Building Systems. In: Integrated M/E Design. Springer, Boston, MA, 1997. p. 276-303.
- AKAGI, Hirofumi. New trends in active filters for power conditioning. Industry Applications, v. 32, n. 6, p. 1312-1322, 1996.
- AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. John Wiley & Sons, 2017.
- ALEMAM, Ali Mohammednoor Ali et al. Power System Harmonics Sources, Effects and Elimination. 2018. Tese de Doutorado. Sudan University of Science and Technology.
- ANSI/IEEE Standard 446, IEEE recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications, 1987.
- ANTONOVA, Albená. Emerging technologies and organizational transformation. In: Technology, Innovation, and Enterprise Transformation. IGI Global, 2015. p. 20-34.
- ARGYRIS, John H. Energy theorems and structural analysis: a generalized discourse with applications on energy principles of structural analysis including the effects of temperature and non-linear stress-strain relations part I. General theory. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v. 27, n. 2, p. 42-58, 1955.
- ARRILLAGA, BC Smith, NR Watson, [AR Wood](#). Power system harmonic analysis. John Wiley & Sons, 1997.
- ARRILLAGA, J. AND N. R. WATSON. Power Systems Harmonic. 2nd ed. New York: Wiley, 2003.
- ARRILLAGA, Jos; ARRILLAGA, Jos. High voltage direct current transmission. Iet, 1998.
- ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. Power system harmonics. John Wiley & Sons, 2004.
- ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. Power system harmonics. John Wiley & Sons, 2004.
- B.J. Abramovich and G.L. Brewer. "Harmonic filters for Sellindge converter station," GEC Journal of Science and Technology, vol. 48, no. 1, 1982.
- BAGGINI, Angelo; HANZELKA, Zbigniew. Voltage and current harmonics. Handbook of Power Quality, p. 228-229, 2008.

- BARKER, Philip P.; DE MELLO, Robert W. Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems. In: 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134). IEEE, 2000. p. 1645-1656.
- BINNS, K. J.; SCHMID, E. Some concepts involved in the analysis of the magnetic field in cage induction machines. In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1975. p. 169-175.
- BINNS, K. J.; SCHMID, E. Some concepts involved in the analysis of the magnetic field in cage induction machines. In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1975. p. 169-175.
- BLANCO, Ana Maria et al. The impact of supply voltage distortion on the harmonic current emission of non-linear loads. *Dyna*, v. 82, n. 192, p. 150-159, 2015.
- BOLLEN, Math HJ; GU, Irene YH. Signal processing of power quality disturbances. John Wiley & Sons, 2006.
- BOLLEN, Mathias HJ. What is power quality?. *Electric Power Systems Research*, v. 66, n. 1, p. 5-14, 2003.
- BOLLEN, Mathias HJ. What is power quality?. *Electric Power Systems Research*, v. 66, n. 1, p. 5-14, 2003.
- BOUZID, Allal M. et al. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 751-766, 2015.
- BREITUNG, K.; RACKWITZ, R. Nonlinear combination of load processes. *Journal of Structural Mechanics*, v. 10, n. 2, p. 145-166, 1982.
- BUZDUGAN, Mircea Ion; BALAN, Horia. Power system harmonics issues in some end user facilities. In: 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2017. p. 1-6.
- C. KHUN, V. TARATEERASETH, W. KHAN-NGERN AND M. KANDO. "Design procedure for common mode filter for induction motor drive using Butterworth function," IEEE Power Conversion Conference, Nagoya, pp. 417-422, 2007.
- C.O. Gercek, M. Ermis, A. Ertas, K.N. Kose and O. Unsar. "Design implementation and operation of a new C-type 2nd order harmonic filter for electric arc and ladle furnaces," IEEE Transactions of Industry Applications, vol. 47, no. 4, pp. 1545-1557, 2011.
- CAMPBELL, Richard J. Weather-related power outages and electric system resiliency.
- CASE, Michael Garth. Nonlinear transmission lines for picosecond pulse, impulse and millimeter-wave harmonic generation. 1993. Tese de Doutorado. University of California, Santa Barbara.
- CHAPMAN, David. Harmonics causes and effects. *Power Quality Application Guide*, v. 3, p. 4-5, 2001.

- CHAPMAN, David. Harmonics causes and effects. Power Quality Application Guide, v. 3, p. 4-5, 2001.
- CHAPMAN, David. Harmonics causes and effects. Power Quality Application Guide, v. 3, p. 4-5, 2001.
- CHAPMAN, David. Harmonics causes and effects. Power Quality Application Guide, v. 3, p. 4-5, 2001.
- CHAUDHURI, Sarbajit. Tariff structure in a small open economy: A theoretical analysis. 2002.
- CHENG, Po-Tai; BHATTACHARYA, Subhashish; DIVAN, Deepakraj M. Power line harmonic reduction by hybrid parallel active/passive filter system with square wave inverter and DC bus control. U.S. Patent n. 5,731,965, 24 mar. 1998.
- CHIMKLAI, S.; MARTI, J. R. Simplified three-phase transformer model for electromagnetic transient studies. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 3, p. 1316-1325, 1995.
- CIGRE Working Group 14.03. "AC harmonic filters and reactive power compensation for HVDC," CIGRE Report, 1990.
- CIVIDINO, Lorenzo. Power factor, harmonic distortion; causes, effects and considerations. In: [Proceedings] Fourteenth International Telecommunications Energy Conference-INTELEC'92. IEEE, 1992. p. 506-513.
- DAS, J. C. Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics. CRC press, 2016.
- DAS, J. C. Power system harmonics and passive filter designs. John Wiley & Sons, 2015.
- DAS, J. C. Power system harmonics and passive filter designs. John Wiley & Sons, 2015.
- DAVIS, Eric J.; EMANUEL, Alexander E.; PILEGGI, David J. Harmonic pollution metering: Theoretical considerations. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, p. 19-23, 2000.
- DAVIS, J. F.; SUBUDHI, M.; CARROLL, Dennis Patrick. Aging assessment of surge protective devices in nuclear power plants. Nuclear Regulatory Commission, 1996.
- DE BRABANDERE, Karel et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. In: 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551). IEEE, 2004. p. 2501-2507.
- DE KOCK, Jan; STRAUSS, Cobus. Practical power distribution for industry. Elsevier, 2004.
- DE OLIVEIRA, Adilson. The political economy of the Brazilian power industry reform. Program on Energy and Sustainable Development, Stanford University Press, Stanford, CA, 2003.
- DIXIT, Anupam; JAIN, Sanjay K. Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Harmonic Source Identification. 2016.
- DOHERTY, William H. A new high efficiency power amplifier for modulated waves. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, v. 24, n. 9, p. 1163-1182, 1936.

- Dugan, Roger C. McGranaghan, Mark F. Santoso, Surya and Beaty, H. Wayne. Electrical Power Systems Quality. McGrawill. USA. 2004.
- DUGAN, Roger C.; MCDERMOTT, Thomas E. Distributed generation. IEEE industry applications magazine, v. 8, n. 2, p. 19-25, 2002.
- E.W. Kimbark. Direct Current Transmission, Chapter 8. John Wiley, New York, 1971.
- ELMORE, Walter A. Protective relaying: theory and applications. CRC press, 2003.
- EMANUEL AND, Alexander Eigeles; MCNEILL, John A. Electric power quality. Annual review of energy and the environment, v. 22, n. 1, p. 263-303, 1997.
- EMANUEL, Alexander Eigeles. Powers in nonsinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 3, p. 1377-1389, 1990.
- ENSLIN, Johan HR. Unified approach to power quality mitigation. In: IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No. 98TH8357). IEEE, 1998. p. 8-20.
- F. L. Luo and H. Ye. Power Electronics, CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- FAN, Zhenyu; JOHAN, Enslin. Harmonic Impedance Analysis in the Presence of Static Var Compensator (SVC). In: 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2006. p. 1485-1492.
- FAURI, M. Modelagem harmônica de carga não linear por meio de matriz de admitância de frequência cruzada. Transações IEEE em sistemas Power, v. 12, n. 4, p. 1632-1638, 1997.
- FUCHS, Ewald; MASOUM, Mohammad AS. Power quality in power systems and electrical machines. Academic Press, 2011.
- FUCHS, Ewald; MASOUM, Mohammad AS. Power quality in power systems and electrical machines. Academic press, 2011.
- G. O. Calabrese. Symmetrical Components Applied to Electrical Power Networks, Ronald Press Group, New York, 1959.
- GHOSH, Arindam; LEDWICH, Gerard. Power quality enhancement using custom power devices. Springer Science & Business Media, 2012.
- GHOSH, Arindam; LEDWICH, Gerard. Power quality enhancement using custom power devices. Springer Science & Business Media, 2012.
- GHOSH, Arindam; LEDWICH, Gerard. Power quality enhancement using custom power devices. Springer Science & Business Media, 2012.
- GREBE, Thomas E. Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality. In: 1995 Rural Electric Power Conference. IEEE, 1995. p. C3/1-C3/6.

GREBE, Thomas E. Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality. In: 1995 Rural Electric Power Conference. IEEE, 1995. p. C3/1-C3/6.

H.M. Zubi, R.W. Dunn, F.V.P. Robinson and M.H. El-werfelli. "Passive filter design using genetic algorithms for adjustable speed drives," IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, 2010.

HAMDAN, MuhamadIszuan. Impact of rotating machines on harmonic distortion in power distribution systems. 2009. Tese de Doutorado. UMP.

HART, George William. Nonintrusive appliance load monitoring. Proceedings of the IEEE, v. 80, n. 12, p. 1870-1891, 1992.

IEC TR 61000-3-6:2008. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. IEEE Power and Energy Society, 2014. (Revision of IEEE Std 519-1992).

IEEE Standard C37.99. Guide for protection of the capacitor banks, 2000.

IEEE Standard C57.110. IEEE recommended practice for establishing liquid-filled and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents, 2008.

IEEE Working Group on Power System Harmonics. "Power system harmonics: an overview," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS, vol. 102, pp. 2455–2459, 1983.

IEEE Working Group on Power System Harmonics. "Power system harmonics: an overview," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS, vol. 102, pp. 2455–2459, 1983.

IEEE. Areport prepared by Load Characteristics Task Force. "The effects of power system harmonics on power system equipment and loads," IEEE Transactions, vol. PAS 104, pp. 2555–2561, 1985.

IEEE. Working Group J5 of Rotating Machinery Protection subcommittee, Power System Relaying Committee. "The impact of large steel mill loads on power generating units," IEEE Transactions of Power Delivery, vol. 15, pp. 24–30, 2000.

J. C. Das. Power System Analysis, Short Circuit Load Flow and Harmonics, 2nd Edition, CRC Press, 2012.

J. L. Blackburn. Symmetrical Components for Power Systems Engineering, Marcel Dekker, New York, 1993.

J.D. Anisworth. Filters, Damping Circuits and Reactive Voltamperes in HVDC Converters, in High Voltage Direct Current Converters and Systems. Macdonald, London, 1965.

J.D. Green and C.A. Gross. "Non-linear modeling of transformers," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, pp. 434–438, 1988.

J.F.Witte, F.P. De Cesaro, and S.R. Mendis. "Damaging long term overvoltage on industrial capacitor banks due to transformer energization inrush currents," IEEE Transactions of Industry Applications, vol. 30, no. 4, pp. 1107–1115, 1994.

J.M. Bentley and P.J. Link. "Evaluation of motor power cables for PWM AC drives," IEEE Trans Industrial Applications, vol. 33, pp. 342–358, 1997.

JAIN, Sachin K.; JAIN, Preeti; SINGH, Sri Niwas. A fast harmonic phasor measurement method for smart grid applications. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 8, n. 1, p. 493-502, 2017.

JAKKAPONG TUPSA-ARD, CHAIYA CHAMCHOY AND THAVATCHAI TAYJASANANT. **High-Voltage Passive Harmonic Filter Design.** IEEE Electrical Power KHALID, S.; DWIVEDI, Bharti. Power quality issues, problems, standards & their effects in industry with corrective means. International Journal of Advances in Engineering & Technology, v. 1, n. 2, p. 1, 2011.

KIM, Yong-Il; PARK, Gyung-Jin. Nonlinear dynamic response structural optimization using equivalent static loads. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 199, n. 9-12, p. 660-676, 2010.

KISHOR, Nand; SAINI, RP; SINGH, SP Uma revisão sobre modelos e controle de usinas hidrelétricas. Revisões de Energia Renovável e Sustentável, v. 11, n. 5, p. 776-796, 2007.

LAKERVI, Erkki; HOLMES, Edward J. Electricity distribution network design. IET, 1995.

LAWRENSON, P. J. et al. Variable-speed switched reluctance motors. In: IEE Proceedings B (Electric Power Applications). IET Digital Library, 1980. p. 253-265.

LEITE, J.C. ABRIL, I. PEREZ, TOSTES, M. E. DE LIMA, OLIVEIRA, R.C. L. Optimización multiobjetivo de filtros pasivos. Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), Montevideo, Uruguay, 3-5 Septiembre 2012.

LEITE, J.C. Projeto Multicritério de Filtros Harmônicos Passivos para Instalações Industriais utilizando técnicas de inteligência Computacional. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, 2013.

LEONHARD, Werner. Control of electrical drives. Springer Science & Business Media, 2001.

LI, SHENGQING. YONGAN LI, XIAODONG LUO, LILIN ZENG, ZHENGPING HE. Multiobjective Optimal Design for Passive Power Filters in Hybrid Power Filter System Based on Multi-island Particle Swarm Optimization. IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia June 2-5. Harbin, China. 2012.

LIN, Boqiang; JIANG, Zhujun. Estimates of energy subsidies in China and impact of energy subsidy reform. Energy Economics, v. 33, n. 2, p. 273-283, 2011.

M. M. Swamy, S. L. Rossiter, M.C. Spencer and M. Richardson. “Case studies on mitigating harmonics in ASD systems to meet IEEE-519-1992 standards,” IEEE-IAS Conference Record, vol. 1, pp. 685–692, 1994.

M.A. Zamani, M. Moghaddasian, M. Joorabian, S.Gh. Seifossadat and A. Yazdani. “C-type filter design based on power-factor correction for 12-pulse HVDC converters,” IEEE Industrial Electronics, IECON, 34th Annual Conference, pp. 3039–3044, 2008.

MARIANI, Ezio; MURTHY, SurabhiSrinivasa. Despacho de Carga Avançado para Sistemas de Energia: Princípios, Práticas e Economias. Springer Science & Business Media, 2012.

MATHUR, R. Mohan; VARMA, Rajiv K. Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems. John Wiley & Sons, 2002.

MENDIS, S. R.; GONZALEZ, D. A. Harmonic and transient overvoltage analyses in arc furnace power systems. IEEE Transactions on industry applications, v. 28, n. 2, p. 336-342, 1992.

MERHEJ, Saad J.; NICHOLS, William H. Harmonic filtering for the offshore industry. IEEE transactions on industry applications, v. 30, n. 3, p. 533-542, 1994.

MILANOVIC, Jovica V.; ZHANG, Yan. Modeling of FACTS devices for voltage sag mitigation studies in large power systems. IEEE transactions on power delivery, v. 25, n. 4, p. 3044-3052, 2010.

MILLER, Timothy John Eastham. Optimal design of switched reluctance motors. IEEE Transactionson industrial electronics, v. 49, n. 1, p. 15-27, 2002.

MORENO, H. Harmônicas nas Instalações Elétricas: Causas. Efeitos e Soluções, 1st edn, Procobre-Instituto Brasileiro do Cobre, São Paulo, SP, Brasil, 2001.

MUSCAS, Carlo. Assessment of electric power quality: Indices for identifying disturbing loads. European transactions on electrical power, v. 8, n. 4, p. 287-292, 1998.

N.R.Watson and J. Arrillaga. “Frequency-dependent AC system equivalents for harmonic studies and transient converter simulation,” IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1196–1203, 1988.

NADERI, Yahya et al. An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 93, p. 201-214, 2018.

NASSIF, ALEXANDRE B. AND WILSON XU. Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis. IEEE 2007

NASSIF, ALEXANDRE B. WILSON XU AND WALMIR FREITAS. An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 24, No. 3. July.2009.

- NASSIF, Alexandre B.; XU, Wilsun; FREITAS, Walmir. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. *IEEE transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 3, p. 1710-1718, 2009.
- NATARAJAN, Ramasamy. *Computer-aided power system analysis*. CRC Press, 2002.
- NEMA. *Motors and Generators, Parts 30 and 31*, 1993. Standard MG-1.
- PABLA, Amarjit Singh et al. *Electric power distribution*. Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- PAL, Mrinal K. Voltage stability conditions considering load characteristics. *IEEE transactions on power systems*, v. 7, n. 1, p. 243-249, 1992.
- PALENSKY, Peter; DIETRICH, Dietmar. Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE transactions on industrial informatics*, v. 7, n. 3, p. 381-388, 2011.
- PAPATHANASSIOU, Stavros A.; PAPADOPOULOS, Michael P. Harmonic analysis in a power system with wind generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 4, 2006.
- PATIDAR, R. D.; SINGH, S. P. Harmonics estimation and modeling of residential and commercial loads. In: *2009 International Conference on Power Systems*. IEEE, 2009. p. 1-6.
- PÉREZ-LOMBARD, Luis et al. Uma revisão dos requisitos de sistemas de climatização na construção de regulamentações de energia. *Energia e edifícios*, v. 43, n. 2-3, p. 255-268, 2011.
- PHIPPS, James K.; NELSON, John P.; SEN, Pankaj K. Power quality and harmonic distortion on distribution systems. *IEEE transactions on industry applications*, v. 30, n. 2, p. 476-484, 1994.
- QUEIROZ, Taís Machado. *Análise dos indicadores de qualidade da energia em um sistema de geração fotovoltaico do IFMG Campus Formiga*. Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), 2018.
- RAO, RaneruNageswara. *Harmonic Analysis of Small Scale Industrial Loads and Harmonic Mitigation Techniques in Industrial Distribution System*. *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 3, n. 4, p. 1511-1540, 2013.
- RASTOGI, Mukul; MOHAN, Ned; EDRIS, A.-A. Hybrid-active filtering of harmonic currents in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1994-2000, 1995.
- REDL, Richard; TENTI, Paolo; VAN WYK, J. Daan. Power electronics' polluting effects. *IEEE spectrum*, v. 34, n. 5, p. 32-39, 1997.
- RICHARDSON, Ian et al. Domestic lighting: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings*, v. 41, n. 7, p. 781-789, 2009.
- RODRIGUEZ, Jose; LAI, Jih-Sheng; PENG, Fang Zheng. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on industrial electronics*, v. 49, n. 4, p. 724-738, 2002.

RUOTOLO, R. et al. Harmonic analysis of the vibrations of a cantilevered beam with a closing crack. *Computers & structures*, v. 61, n. 6, p. 1057-1074, 1996.

S.H.E.A. Aleem, A.F. Zobaa and M.M.A. Aziz. "Optimal C-type filter based on minimization of voltage harmonic distortion for non-linear loads," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 281–289, 2012.

SALOMONSSON, Daniel; SANNINO, Ambra. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 3, p. 1620-1627, 2007.

SCHWEPPE, Fred C. et al. *Spot pricing of electricity*. Springer Science & Business Media, 2013.

SHORT, Thomas Allen. *Electric power distribution equipment and systems*. CRC press, 2018.

SINGH, Bhim; AL-HADDAD, Kamal; CHANDRA, Amrish. A review of active filters for power quality improvement. *IEEE transactions on industrial electronics*, v. 46, n. 5, p. 960-971, 1999.

SINGH, Bhim; CHANDRA, Amrish; AL-HADDAD, Kamal. *Power quality: problems and mitigation techniques*. John Wiley & Sons, 2014.

SINGH, G. K. Power system harmonics research: a survey. *European Transactions on Electrical Power*, v. 19, n. 2, p. 151-172, 2009.

SONI, Manish Kumar; SONI, Nisheet. Review of causes and effect of harmonics on power system. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, v. 3, n. 2, p. 214-220, 2014.

SUWANAPINGKARL, Pasist. *Power quality analysis of future power networks*. 2012. Tese de Doutorado. NorthumbriaUniversity.

*Systems Power Engineering and Power System*. Paper ID 1178. *Electrical Engineering/Electronics, Computer*. 8th International Conference on Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011.

THANEDAR, P. B. et al. Performance of some SQP algorithms on structural design problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 23, n. 12, p. 2187-2203, 1986.

TONG, Howell. *Threshold models in non-linear time series analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.

TROGER, Hans; STEINDL, Alois. *Nonlinear stability and bifurcation theory: an introduction for engineers and applied scientists*. Springer Science & Business Media, 2012.

TROGER, Hans; STEINDL, Alois. *Nonlinear stability and bifurcation theory: an introduction for engineers and applied scientists*. Springer Science & Business Media, 2012.

- VERTIGAN, Graeme. AC Circuits and Power Systems in Practice. John Wiley & Sons, 2017.
- W. Zhou, B. Lu, T.G. Habetler, and R.G. Harley. "Incipient bearing fault detection via motor stator noise cancellation using Wiener filter," IEEE Transaction of Industry Applications, vol.45,no.4,pp. 1309–1316, 2009.
- WAGNER, V. E. et al. Effects of harmonics on equipment. IEEE transactions on power delivery, v. 8, n. 2, p. 672-680, 1993.
- Westinghouse. Westinghouse Transmission and Distribution Handbook, Fourth Edition, Pittsburgh, 1964.
- WHITE, Joseph F. High frequency techniques: An introduction to rf and microwave design and computer simulation. John Wiley & Sons, 2004.
- WILLIS, H. Lee. Power distribution planning reference book. CRC press, 1997.
- WRIGHT, Arthur; CHRISTOPOULOS, Christos. Proteção do sistema de energia elétrica. Springer Science & Business Media, 2012.
- XIA, Daozhi; HEYDT, G. T. Harmonic power flow studies-part II implementation and practical application. IEEE transactions on power apparatus and systems, n. 6, p. 1266-1270, 1982.
- XIA, Daozhi; HEYDT, Gerald T. Harmonic power flow studies part I-formulation and solution. IEEE Transactions on Power Appa