

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRIO LUIZ DA SILVA

O PROBLEMA DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM PRÉDIOS COMERCIAIS

Porto Alegre

2014

MARIO LUIZ DA SILVA

O PROBLEMA DAS DISTORÇÕES HARMONICAS EM PRÉDIOS COMERCIAIS

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne

Porto Alegre

2014

MARIO LUIZ DA SILVA

O PROBLEMA DAS DISTORÇÕES HARMONICAS EM PRÉDIOS COMERCIAIS

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gothenburg - Suécia

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Gothenburg, Suécia.

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

Msc Daphne Schwanz, UFRGS

Mestra pela UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Dedico este trabalho à minha família e meus amigos, em especial aos meus pais, por terem dado todo o suporte ao longo destes anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne pela atenção a mim na orientação deste projeto.

Agradeço aos meus pais e minha família, pelo suporte e por toda a dedicação que tiveram ao longo dos anos.

Agradeço a todos meus amigos e colegas de graduação pelos bons momentos e auxílio nos estudos.

Agradeço à UFRGS de um modo geral pela estrutura e oportunidades oferecidas.

Agradeço à JFRS e meu supervisor de estágio, Eng. João Batista de Souza, por terem me acolhido durante o período de estágio, proporcionado condições para que este projeto pudesse ser realizado.

Agradeço aos membros da banca avaliadora por aceitarem o convite.

RESUMO

O interesse pelo tema “qualidade de energia elétrica” por parte, não apenas das empresas responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, mas também por parte dos consumidores, tem apresentado significativa ascensão. Dentre os distúrbios dos quais a energia elétrica é susceptível, destacam-se os problemas envolvendo a distorção harmônica da rede. Dentro deste contexto, este projeto apresenta os principais conceitos e definições acerca deste fenômeno. Fundamentando-se nesses conceitos, um estudo de caso é desenvolvido, no qual se propõe analisar o nível de distorção harmônica causada principalmente por micro-computadores, em um prédio comercial de nove andares, aplicando a metodologia contida no IEEE 519 e em seguida são propostos diferentes modos de solucionar o problema.

Palavras chave: Distorção harmônica. Instalações elétricas. Sistema elétrico de potência.

ABSTRACT

The interest about power quality has shown a meaningful increase not only for the utilities but also for end users. Among the power quality disturbances, this diploma work focus is the harmonic distortion and his consequences. In this context, the main concepts and definitions about harmonics are presented. Based on these concepts, a case-study is developed, which proposes to analyze the level of harmonic distortion caused mainly by microcomputers, on a nine floor office building, applying the methodology contained in the IEEE 519. Then mitigation approaches to reduce the problem are suggested.

Keywords: Harmonic distortion. Electrical installations. Electrical power system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distúrbios inerentes à QEE.....	17
Figura 2 - Distorção de corrente causada por resistência não linear	20
Figura 3 - Representação da série de Fourier para uma onda distorcida.....	21
Figura 4 - Correntes harmônicas atravessando a impedância do sistema, resultando em tensões harmônicas na carga	23
Figura 5 – Relação entre P Q e S em condição senoidal	27
Figura 6 – Relação entre as componentes da potência aparente.....	28
Figura 7 – Altas correntes de neutro pelo circuito, alimentando cargas monofásicas não lineares.....	31
Figura 8 – Fluxo de corrente de terceira harmônica em transformadores trifásicos	32
Figura 9 – Forno de arco operando em modo desequilibrado permite que harmônicas múltiplas de 3 alcancem o sistema de energia, embora esteja conectado em delta ao transformador.....	34
Figura 10 – Variação de DHT em uma subestação, durante uma semana.	36
Figura 11 – Modelo simplificado de fonte de alimentação chaveada	38
Figura 12 – Forma de onda típica da corrente ao alimentar equipamentos com fonte chaveada	39
Figura 13 – Espectro harmônico típico da corrente ao alimentar equipamentos com fonte chaveada	40
Figura 14 – Lâmpada fluorescente com reator magnético (a) forma de onda da corrente e (b) espectro harmônico.....	41
Figura 15 – Circuitos equivalentes para análise de ressonância da linha com capacitor de correção do fator de potência.	44
Figura 16 – Formas de onda relativas aos circuitos da Figura 15: (a) - superior; (b) - intermediário; (c) - inferior.....	44
Figura 17 – Corrente típica em um capacitor com ressonância em 11ª Harmonica.....	45
Figura 18 – Fluxo de Sequência zero em transformador de três pernas fluindo pelo tanque	49
Figura 19 – Acoplamento indutivo de corrente residual de um sistema de potência em circuito telefônico.	52
Figura 20 – Queda tensão em um cabo blindado, resultando em diferenças de potencial em referências nas terminações do cabo.	53
Figura 21 – Acoplamento condutivo por uma malha de aterramento comum.	53

Figura 22 – Direção nominal de corrente harmônica em (a) carga não linear e (b) carga linear (com tensão distorcida).....	54
Figura 23 – Sistema de dupla conversão com frequências distintas de entrada e saída	56
Figura 24 – Forma de onda e espectro em sistema monofásico com dupla conversão (60/50 Hz). Acima: corrente na rede. Abaixo: Saída do inversor PWM	57
Figura 25 – Envelope da corrente de entrada que definia um equipamento como classe D (Anteriormente a emenda 14)	59
Figura 22 – Notching característico de comutação	64
Figura 27 – Local do PAC, dependendo onde os clientes recebem o fornecimento	69
Figura 28 – Prédio-Sede da JFRS.....	75
Figura 29 – QGBT de baixa tensão da subestação do prédio.....	76
Figura 30 – Analisador IMS P-600.....	77
Figura 31 – a) Quadro de distribuição do terceiro andar b) Ligação do analisador no quadro	77
Figura 32 – Modo de ligação a 4 fios	78
Figura 33 – Níveis de tensão no QGBT	78
Figura 34 – Níveis de corrente no QGBT.....	79
Figura 35 – Níveis de DHT de tensão no QGBT	79
Figura 36 – Níveis de DHT de tensão na Fase 1	80
Figura 37 – Níveis de DHT de tensão na Fase 2	80
Figura 38 – Níveis de DHT de tensão na Fase 3	81
Figura 39 – Níveis de DHT de corrente no QGBT.....	81
Figura 40 – Níveis de DHT de corrente na Fase 1 do QGBT	82
Figura 41 – Níveis de DHT de corrente na Fase 2 do QGBT	82
Figura 42 – Níveis de DHT de corrente na Fase 3 do QGBT	83
Figura 43 – a) e b) Centrais de Medição Digital c) Dispositivo de detecção ligado ao disjuntor	85
Figura 44 – Redução harmônica para um AVV tpo PWM, em função do tamanho do reator utilizado	90
Figura 45 – Modelos de reatores trifásicos para aplicações com AVVs	90
Figura 46 – Efeito de reatores CA em harmônicas de corrente em um AVV	91
Figura 47 – Configuração de 12 pulsos como um método de controle harmônico em dois AVVs.....	92
Figura 48 – Configurações comuns de filtros passivos	93
Figura 49 – Uma fase de um filtro encapsulado trifásico.....	94

Figura 50 – Filtro para aplicações de sistemas de potência industriais	95
Figura 51 – Implementação de um filtro de corte de quinta harmônica e seu efeito na resposta do sistema	96
Figura 52 – Modelo de filtro passivo em série	98
Figura 53 – Configuração de filtro passa-baixas	99
Figura 54 – Arranjo de filtro passa baixa em sistema de potência industrial	100
Figura 55 – Aplicação de um filtro passa-baixa em um sistema industrial	100
Figura 56 – Filtro banda larga passa-baixa comercial trifásico de 600V	101
Figura 57 – Configuração típica de um filtro C e sua respectiva resposta em frequência para impedância.....	103
Figura 58 – Circuito equivalente para especificações derivadas de um filtro C	103
Figura 59 – Aplicação de um filtro ativo na carga	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de <i>PEC – R</i>	47
Tabela 2 – Limites para os harmônicos de corrente, segundo IEC 61000-3-2.....	60
Tabela 3 – Limites de distorção de tensão.....	62
Tabela 4 – Limites de distorção de corrente.....	62
Tabela 5 – Limites para notching oriundo de comutação.....	64
Tabela 6 - Terminologia aplicável ao fenômeno de distorção harmônica segundo Prodist	66
Tabela 7 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVV	Acionador de Velocidade Variável
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronics Engineers</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
P.U.	Por Unidade
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
JFRS	Justiça Federal do Rio Grande do Sul
DHT	Distorção Harmônica Total
DTD	Distorção Total de Demanda
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	MOTIVAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	CARACTERIZAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	17
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (QEE).....	17
2.2	DEFINIÇÃO.....	18
2.3	ORIGEM.....	20
2.4	DISTORÇÃO DE CORRENTE E DISTORÇÃO DE TENSÃO.....	22
2.5	GRANDEZAS ELÉTRICAS EM CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS.....	24
2.5.1	Potência Ativa, Reativa e Aparente.....	24
2.5.2	Fator de Potência.....	28
2.5.3	Sequências de Fase Harmônicas.....	30
2.5.4	Harmônicos de Ordem Múltipla de Três.....	30
2.5.5	Índices Harmônicos.....	34
2.5.5.1	Distorção Harmônica Total.....	34
2.5.5.2	Distorção de Demanda Total.....	36
2.6	FONTES DE HARMÔNICOS EM CARGAS COMERCIAIS.....	37
2.6.1	Fontes de Alimentação Chaveadas.....	38
2.6.2	Iluminação Fluorescente.....	40
2.6.3	Módulos de Velocidade Ajustável para Elevadores e Climatização.....	42
2.7	EFEITOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	43
2.7.1	Impacto em Capacitores.....	43
2.7.2	Impacto em Transformadores.....	46
2.7.3	Impacto em Motores.....	50
2.7.4	Impacto em Sistemas de Telecomunicação.....	51
2.7.5	Impacto em Sistemas de Medição de Demanda e Energia.....	53
2.7.6	Impacto em Equipamentos Eletrônicos.....	56
2.7.7	Impacto em Relés de Proteção e Fusíveis.....	56
2.8	INTER-HARMÔNICOS.....	56

3	METODOLOGIA.....	58
3.1	NORMAS E RECOMENDAÇÕES.....	58
3.1.1	Norma IEC 61000-3-2: Limites para emissão de harmônicas de corrente (<16 A por fase).....	58
3.1.2	Recomendação IEEE para Práticas e Requisitos para Controle de Harmônicas no Sistema Elétrico de Potência: IEEE-519 (2004).....	61
3.1.3	PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional	65
3.2	AVALIANDO A DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	67
3.2.1	Conceito de Ponto de Acoplamento Comum (PAC).....	69
3.2.2	Métodos Para Avaliação Harmônica no Sistema de Potência	70
3.2.2.1	Avaliações Harmônicas No Sistema Da Concessionária.....	70
3.2.2.2	Avaliações harmônicas em Instalações de Usuário Final.....	70
3.2.2.3	Procedimento De Avaliação Do Limite De Corrente.....	71
3.2.3	Princípios para Controlar os Harmônicos	71
3.2.3.1	Reduzir As Correntes Harmônicas Nas Cargas	72
3.2.3.2	Filtragem.....	72
3.2.3.3	Modificar a Resposta do Sistema	73
3.2.4	Procedimentos em Usuários Finais	73
4	ESTUDO DE CASO	75
4.1	LOCAL REALIZADO	75
4.2	INSTRUMENTOS UTILIZADOS	76
4.3	PROCEDIMENTO ADOTADO	77
4.4	RESULTADOS	78
5	CONCLUSÕES.....	84
5.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISTORÇÃO HARMÔNICA.....	84
5.2	SUGESTÕES	84
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A	
1	DISPOSITIVOS PARA CONTROLE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA	89

1.1.1	Reatores em Linha ou Afogadores	89
1.1.2	Transformador Zigue-zague.....	92
1.1.3	Filtros Passivos.....	93
1.1.4	Filtros Passa-Baixa.	98
1.1.5	Filtros C.	102
1.1.6	Filtros Ativos	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Há algumas décadas atrás não existia grande preocupação na questão "Qualidade de Energia Elétrica" (QEE), por parte de usuários e também das concessionárias de energia elétrica. Um grande avanço ocorreu nos anos 80, quando se intensificou o estudo sobre os diversos distúrbios de sistemas elétricos, com metodologia científica, e percebeu-se que a causa destes distúrbios provinha de elementos em comum.

Segundo (DUGAN, 2004), existem quatro razões principais para o aumento da preocupação quanto a QEE:

1. os usuários finais de energia elétrica estão sendo mais conscientes quanto às questões da variação na QEE. Estes usuários estão se tornando melhor informados quanto aos problemas causados por distúrbios como interrupções no serviço e transientes de chaveamento, e vêm exigindo melhor qualidade na energia recebida;

2. muitos equipamentos e sistemas vêm sendo interligados em redes. Processos integrados significam que a falha de um componente pode trazer consequências maiores.

3. os equipamentos mais recentes, providos de controles microprocessados, são mais sensíveis às variações na QEE que os equipamentos usados no passado;

4. a busca por melhor eficiência em um sistema de potência resultou num crescimento contínuo da aplicação de dispositivos, como acionadores de motor de velocidade ajustável com alta eficiência, fontes chaveadas e também no uso de capacitores shunt para correção de fator de potência, visando redução de perdas.

Este último item é responsável por resultar no aumento dos níveis harmônicos em sistemas de potência e vem trazendo grande preocupação de profissionais de engenharia elétrica quanto aos impactos futuros, pois geralmente os equipamentos que produzem estes problemas na rede, são também os mais sensíveis aos seus efeitos (DUGAN, 2004).

Correntes harmônicas produzidas por cargas não lineares são injetadas de volta no sistema de alimentação. Essas correntes, além de causarem interferências em linhas de telecomunicação e erros em medições de energia elétrica, interagem de forma não desejada com uma variedade de equipamentos, como motores, capacitores e transformadores; podendo também causar superaquecimento nas linhas, gerar acidentes/falhas e inclusive danificar equipamentos devido a estas sobrecargas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste Projeto de Diplomação é realizar o estudo dos efeitos causados pelas distorções harmônicas e buscar técnicas para sua correção. Mais especificamente, realizar um estudo de caso, que será analisar o nível de distorção harmônica em um prédio comercial, no caso a Justiça Federal do Rio Grande do Sul (JFRS), que possui nove andares e uma grande quantidade de computadores do tipo desktop, notebooks, impressoras, plotadoras e extensa rede lógica instalada.

Primeiramente será definido o que é a distorção harmônica, e fundamentar como ela ocorre em um sistema elétrico. Com esta base teórica definida, será feito um estudo em normas nacionais e internacionais e um levantamento da gravidade deste fenômeno, realizando buscas em artigos científicos.

Com todas as informações, será possível mapear uma metodologia adequada para aplicar no estudo de caso, e então comparar os resultados obtidos experimentalmente com o limite imposto pela legislação específica, e finalmente propor métodos para minimizar o problema.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Após breve introdução e motivação, sobre o assunto “Qualidade de Energia Elétrica” (QEE), será desenvolvida a fundamentação teórica sobre distorções harmônicas, baseado no capítulo 5 e 6 de (Dugan, 2004) e também serão apresentados alguns procedimentos recomendados pelos órgãos competentes para se realizar análises desta distorção na rede elétrica. Na mesma seção será abordada de forma sucinta alguns artigos internacionais que demonstrem os vários tipos de problemas que podem ocorrer devido ao fenômeno.

No Capítulo 3, baseando-se nas recomendações IEEE 519 (2004) e em outras normas, será traçada uma metodologia de como proceder para identificar e solucionar o problema dos harmônicos de tensão e corrente.

No Capítulo 4, o estudo de caso será apresentado. Aplicando metodologia é possível determinar a qualidade da rede do prédio da JFRS.

No Capítulo 5, serão expostas as conclusões obtidas com este trabalho. Com a análise dos resultados obtidos pode-se sugerir diversas formas de implementar uma solução e sugerir possíveis melhorias para projetos futuros sobre o assunto.

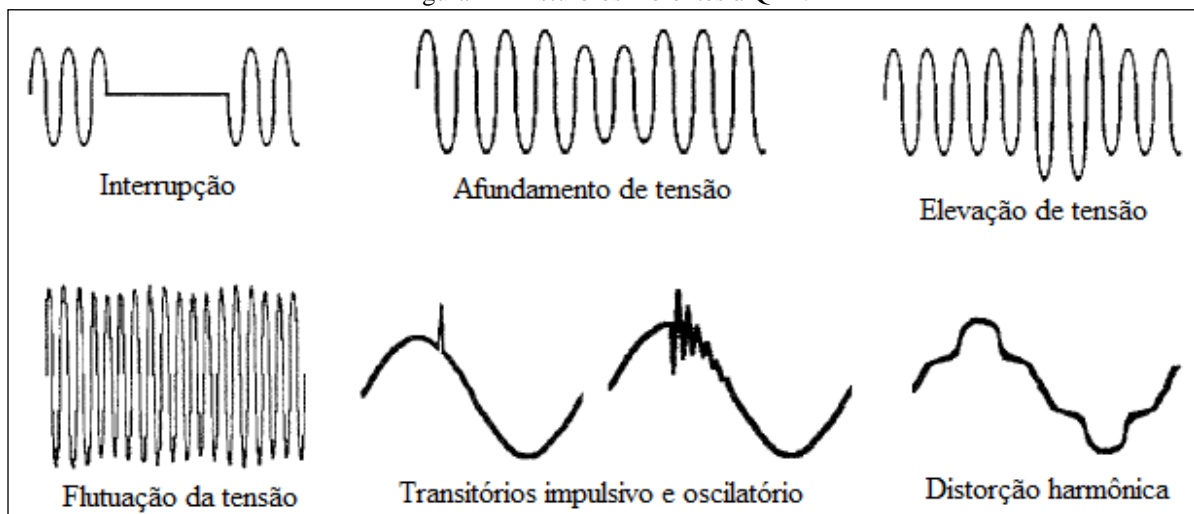
Concluindo o projeto, serão apresentados alguns dispositivos utilizados para controlar e reduzir a distorção harmônica.

2 CARACTERIZAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

Por definição, QEE, ou mais especificamente, os distúrbios que afetam a QEE, são quaisquer alterações na tensão, corrente ou frequência que interfiram na operação normal dos equipamentos elétricos (DOUGHERTY, STEBBINS, 1997). São diversos os distúrbios dos quais a energia elétrica é susceptível. Podem-se citar interrupções, afundamentos e elevações de tensão, transitórios impulsivos e oscilatórios, distorção harmônica, flutuação da tensão, ruído, desequilíbrio de tensão, variações na frequência, dentre outros. A Figura 1 apresenta de forma gráfica alguns dos distúrbios supracitados.

Figura 1 - Distúrbios inerentes à QEE.



Fonte: Adaptado de (DOUGHERTY, STEBBINS, 1997).

Visto a complexidade do sistema elétrico, constituído por unidades geradoras de variadas topologias, linhas aéreas de transmissão e de distribuição susceptíveis às intempéries, unidades transformadoras e cargas de características distintas, a presença desses distúrbios é inerente à sua operação. Tem-se então, como objeto de estudos e pesquisas, a mitigação de tais distúrbios.

Dois são os principais motivadores para estudos acerca dos distúrbios que afetam a QEE: o aumento de cargas sensíveis e a geração distribuída. O aumento de cargas sensíveis

justifica-se pela constante busca por melhor desempenho de processos industriais, fundamentada na modernização de equipamentos, que por sua vez, caracteriza-se pela utilização massiva de equipamentos eletroeletrônicos. A geração distribuída é fator importante visto que tende a modificar a atual característica radial do sistema elétrico incluindo pequenas unidades geradoras onde hoje predominam as cargas. Essas pequenas unidades geradoras devem fornecer energia elétrica de forma a manter a qualidade e a confiabilidade do sistema elétrico, inclusive, os padrões mínimos referentes à QEE (Argenta, 2013).

Conforme o panorama que se apresenta, observa-se a ascendência do tema QEE no âmbito da engenharia elétrica. Dentro desse contexto, o entendimento e a verificação dos fenômenos dos quais a energia elétrica é susceptível se faz imprescindível e os *harmônicos* são um deles.

2.2 DEFINIÇÃO

Em áreas próximas a geração da energia elétrica, a distorção da tensão chega ser menor que 1%, mas esta distorção vai aumentando ao se aproximar da carga. Nos piores casos, a forma de onda não aparenta mais ser uma senóide. Aparelhos como os conversores eletrônicos de potência podem distorcer a corrente em formas de aparência arbitrária.

Embora existam exceções onde a distorção é aleatória, a maior parte das distorções é periódica, ou um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema de potência. Isto é, a forma de onda da corrente é praticamente a mesma, ciclo após ciclo. Este fato fez com que se utilizasse o termo *harmônicos* para descrever esta distorção da forma de onda (DUGAN, 2004).

Quando os conversores de potência eletrônicos se tornaram vastamente utilizados no final dos anos 70, muitos engenheiros e outros profissionais da área ficaram preocupados quanto a capacidade do sistema de potência de suportar esta distorção harmônica. Muitas previsões pessimistas foram feitas sobre o destino dos sistemas de potência se esses dispositivos continuassem existindo. Embora algumas dessas preocupações possam ter sido superestimadas, o campo da análise de qualidade de potência deve muito às pessoas que se preocuparam com este problema.

Alguns profissionais de energia elétrica chegam a considerar a distorção harmônica um dos principais problemas na parte de qualidade de energia, pois os distúrbios harmônicos fogem de regras convencionais de projeto utilizadas para outros distúrbios, onde se considera apenas a frequência fundamental. Além disto, o profissional acaba utilizando ferramentas e equipamentos incomuns por ser um problema relativamente novo.

A distorção harmônica não é um fenômeno novo em sistemas de potência. Preocupações com este fenômeno podem ser encontradas em literaturas das décadas de 1930 e 1940. Nesta época, as fontes primárias da distorção eram os transformadores e o problema principal era interferência indutiva com sistemas telefônicos. Lâmpadas de arco-voltaico também foram introduzidas e estavam causando grande preocupação devido ao seu conteúdo harmônico, da mesma forma que os conversores de potência eletrônicos vêm preocupando em tempos mais recentes.

Felizmente, se o sistema for bem dimensionado para suportar as demandas de potência da carga, existe uma baixa probabilidade de que os harmônicos trarão problemas no sistema de potência, mas ainda assim podem causar problemas com as telecomunicações. Os problemas no sistema de potência ocorrem mais frequentemente quando a capacitância existente no sistema resulta em ressonância na frequência harmônica crítica, que drasticamente aumenta a distorção acima dos níveis normais. Enquanto estes problemas também ocorrem em residências, os casos mais severos são encontrados em sistemas de potência industriais, devido ao alto grau de ressonância alcançado.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é quem regulamenta e define os padrões de qualidade do produto (energia elétrica) e da prestação de serviços. Através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), especificamente o Módulo 8 (2012), a agência aborda a QEE, e conseqüentemente, as distorções harmônicas. Os procedimentos de QEE definidos neste módulo do PRODIST devem ser observados por consumidores, produtores, distribuidoras, agentes importadores ou exportadores e transmissoras de energia elétrica bem como pelo Operador Nacional do Sistema (ONS).

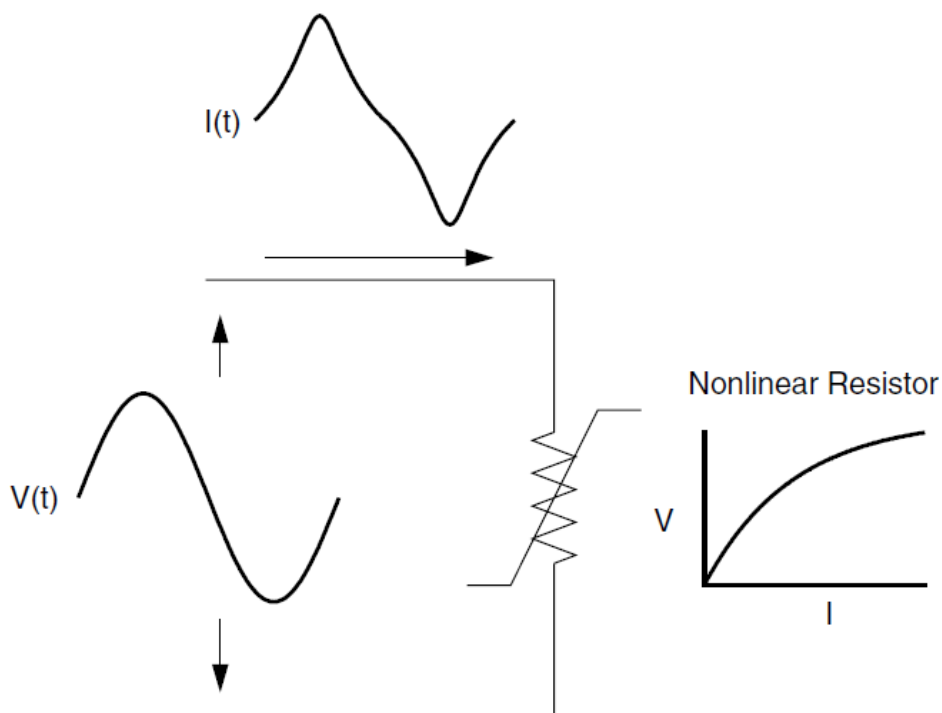
O oitavo módulo do PRODIST, aborda, dentre outros aspectos acerca da QEE, a chamada distorção harmônica na subseção “Harmônicos”. O texto define as distorções harmônicas como “fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”. Este módulo, além de apresentar os cálculos pertinentes ao fenômeno, que serão detalhados na Seção 2.5.5, também sintetiza a terminologia aplicável e classifica os níveis toleráveis de distorção harmônica. Os detalhes são demonstrados na Seção 3.2.

2.3 ORIGEM

A distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares em sistemas de potência. Um dispositivo não linear é definido como aquele que a sua corrente não é proporcional à tensão aplicada.

A Figura 2 ilustra este conceito, no caso de uma tensão em forma senoidal aplicada em um simples resistor não linear, no qual a tensão e corrente variam de acordo com a curva mostrada. Enquanto a tensão aplicada é perfeitamente sinusoidal, a corrente resultante é distorcida. Aumentar a tensão em uma mínima porcentagem pode fazer com que a corrente dobre e tome um formato de onda diferente. Esta é a maior fonte de distorção harmônica em um sistema de potência.

Figura 2 - Distorção de corrente causada por resistência não linear



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Já a Figura 3 ilustra que qualquer forma de onda periódica, distorcida pode ser expressa como uma soma de senóides. Quando uma forma de onda é idêntica entre um ciclo e o próximo, ela pode ser representada como uma soma de puras ondas sinusoidais, nas quais a fre-

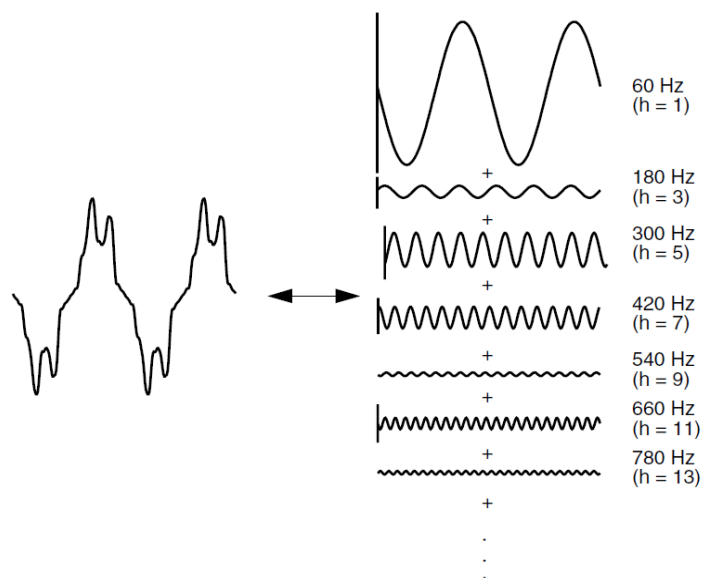
quência de cada senóide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental desta onda distorcida. Este múltiplo é chamado de *harmônico* da fundamental.

A soma dessas senóides é conhecida como uma série de Fourier, nome dado em homenagem ao grande matemático que desenvolveu este conceito.

Devido à propriedade acima, o conceito de série de Fourier é aplicado universalmente na análise de problemas harmônicos. Graças a isto, o sistema pode ser analisado separadamente para cada harmônico. Além disto, encontrar a resposta do sistema para uma senóide individualmente para cada harmônico é muito mais simples, em comparação a toda forma de onda distorcida.

As saídas de cada frequência são combinadas para formar uma nova série de Fourier, a qual a forma de onda da saída pode ser computada. No geral, apenas as magnitudes dos harmônicos são de interesse. Quando os semi-ciclos positivo e negativo de uma forma de onda possuem formatos idênticos, a série de Fourier contém apenas harmônicos ímpares. Isto oferece uma simplificação maior para a maioria dos estudos em sistema de potência, porque os dispositivos mais comuns produtores de harmônicos são idênticos para ambas as polaridades. De fato, a presença de harmônicos pares geralmente é um indício que existe algo errado, seja no equipamento que está como carga ou no transdutor que está sendo utilizado para obter a medida. Existem algumas exceções para este fato, como por exemplo, os retificadores de meia onda e os fornos elétricos a arco que podem gerar harmônicos aleatórios.

Figura 3 - Representação da série de Fourier para uma onda distorcida



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Normalmente, os harmônicos de ordem mais alta (acima do vigésimo quinto ou quinquagésimo harmônico, dependendo do sistema), podem ser desprezados para a análise de sistema de potência (Liew, 1989). Enquanto eles podem causar certa interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, eles não estão danificando o sistema (Dugan, 2004). Também é difícil coletar dados suficientemente precisos para modelar um sistema de potência nestas frequências. Uma exceção comum a isto ocorre quando existe ressonância no sistema ao alcance destas frequências. Essas ressonâncias podem ser excitadas pelo efeito de *notching*, ou transientes de chaveamento em conversores de potência eletrônicos. Isto gera uma forma de onda de tensão com múltiplos cruzamentos por zero, o que causa mau funcionamento em circuitos sincronizados pelo cruzamento por zero.

Essas ressonâncias geralmente ocorrem em sistemas com cabo subterrâneos, sem capacitores de correção de fator de potência.

Se o sistema de energia é descrito com elementos em série e shunt, como é a prática convencional, a grande maioria das não linearidades no sistema encontram-se em elementos shunt (isto é, na carga). A impedância em série do sistema de fornecimento de energia (isto é, a impedância de curto-circuito entre a fonte e a carga) é notavelmente linear. Em transformadores, também, a fonte de harmônicas é o ramo shunt (impedância de magnetização) do modelo comum "T"; enquanto a impedância de dispersão é linear. Assim, a principal fonte de distorção harmônica serão as cargas do usuário final. Isto não quer dizer que todos os usuários finais que apresentam distorção harmônica terão fontes de harmônicos significativas, mas que a distorção harmônica geralmente se origina com a carga de algum usuário final ou a combinação destas cargas.

2.4 DISTORÇÃO DE CORRENTE E DISTORÇÃO DE TENSÃO

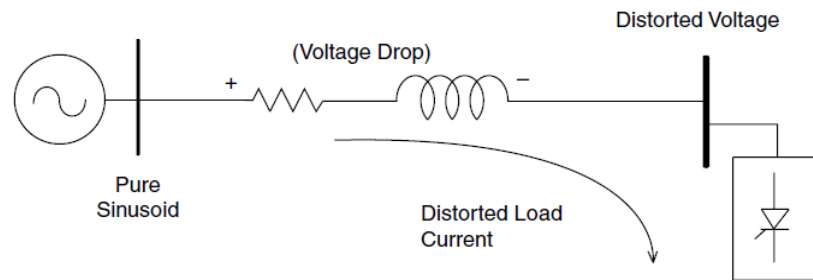
Como um dispositivo pode deixar de operar corretamente por mais de um motivo relacionado aos problemas harmônicos, a definição “harmônicos” sozinha é inadequada para descrever um problema de forma específica.

Cargas não lineares aparecem como fontes de corrente harmônica em paralelo (shunt) e injetam correntes harmônicas no sentido do sistema de potência. Para maioria das análises em questão, é suficiente tratar essas cargas produtoras de harmônicos simplesmente como fontes de corrente.

A Figura 4 demonstra que a distorção de tensão é o resultado de correntes distorcidas passando através da impedância em série linear do sistema de entrega de potência. Embora

assumindo que a saída da fonte seja uma senóide pura, existe uma carga não linear que injeta corrente distorcida.

Figura 4 - Correntes harmônicas atravessando a impedância do sistema, resultando em tensões harmônicas na carga



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Estas correntes harmônicas que passam através da impedância do sistema causam uma queda de tensão para cada harmônico. Isto resulta em harmônicos de tensão aparecendo no barramento da carga. A quantidade de distorção de tensão depende da impedância e da corrente. Assumindo que a distorção do barramento da carga esteja nos limites aceitáveis (menor que 5%), a quantidade de conteúdo harmônico de corrente produzido pela carga é praticamente constante.

Enquanto os harmônicos da corrente de carga definitivamente causem a distorção de tensão, deve-se notar que a carga não tem controle sobre esta distorção. A mesma carga colocada em dois locais diferentes no sistema de potência resultará em dois valores de distorção de tensão diferentes

O reconhecimento deste fato é a base para a divisão de responsabilidades para o controle harmônico que se encontra em normas e recomendações como o IEEE 519 (2004), “Práticas Recomendadas e os Requisitos para Controle Harmônico em Sistemas Elétricos de Potência”:

1. o controle sobre a quantidade de corrente harmônica injetada no sistema deve ser realizado no consumidor final;
2. assumindo que a injeção de corrente harmônica esteja nos limites aceitáveis, o controle sobre a distorção de tensão deve ser exercido pela entidade que tem controle sobre a impedância do sistema, geralmente sendo a companhia fornecedora.

Deve-se ter cuidado ao descrever o fenômeno harmônico para entender que existem diferenças entre causas e efeitos de harmônicos de corrente e tensão.

2.5 GRANDEZAS ELÉTRICAS EM CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS

Grandezas elétricas de sistema de energia tradicionais, como valor eficaz (rms), potência (reativa, ativa e aparente), fator de potência e sequências de fases são normalmente definidas para a frequência fundamental em um contexto de condições puramente senoidais. Mas na presença de distorção harmônica, o sistema não mais opera em tais condições, e infelizmente, muitas das simplificações que engenheiros de potência costumam fazer para análise de frequência fundamental, não são aplicáveis.

2.5.1 Potência Ativa, Reativa e Aparente

Há três quantidades normais associadas à energia elétrica:

- Potência aparente S [voltampere (VA)]. O produto da tensão e corrente eficaz.
- Potência ativa P [watt (W)]. A taxa média de entrega de energia ativa.
- Potência reativa Q [voltampere reativo] (var)]. A porção da potência aparente que está fora de fase, ou em quadratura, com a potência ativa.

A potência aparente S se aplica a ambas as condições senoidais e não senoidais. A potência aparente pode ser escrita como se segue:

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (1)$$

Onde V_{rms} e I_{rms} são os valores eficazes da tensão e corrente. Em uma condição senoidal, tanto a tensão e corrente contem apenas os componentes de frequência fundamental; assim, os valores eficazes podem ser expressos simplesmente como:

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \quad (2)$$

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1 \quad (3)$$

Onde V_1 e I_1 são as amplitudes das formas de onda de tensão e corrente, respectivamente. O índice "1" denota as quantidades na frequência fundamental. Em condições não senoidais uma forma de onda distorcida harmonicamente é composta de senóides de frequências

harmônicas com amplitudes diferentes, como mostrado na Figura 3. Os valores eficazes das formas de onda são computados como a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores eficazes de todos os componentes individuais, ou seja:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} V_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{max}}^2} \quad (4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} I_h\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{max}}^2} \quad (5)$$

Onde V_h e I_h são a amplitude da forma de onda na componente harmônica h . Na condição senoidal, componentes harmônicas de V_h e I_h são todas zero, e só V_1 e I_1 permanecem.

A potência ativa P também é comumente referida como a potência média ou potência real. Ela representa a potência útil gasto por cargas para realizar o trabalho real, isto é, para converter a energia elétrica em outras formas de energia. O trabalho real realizado por uma lâmpada incandescente é converter energia elétrica em luz e calor. O trabalho real é realizado pela porção da corrente que está em fase com a tensão. A porção em que a corrente não está em fase com a tensão não realiza trabalho real. A potência ativa é a taxa à qual a energia é gasta, dissipada, ou consumida pela carga e é medida em unidades de Watts. P pode ser calculada como a média da potência instantânea (produto da tensão e da corrente instantânea), ou seja,

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (6)$$

A equação (6) é válida para ambas as condições, senoidal e não senoidal. Para a condição senoidal, P se resolve a seguinte forma:

$$P = \frac{V_1 I_1}{2} \cos\theta_1 = V_{1rms} I_{1rms} \cos\theta_1 = S \cos\theta_1 \quad (7)$$

Onde θ é o ângulo de fase entre tensão e corrente na frequência fundamental. A equação (7) indica que a potência média ativa é uma função apenas das quantidades fundamentais

de frequência. No caso não senoidal, o cálculo da potência ativa deve incluir contribuições de todos os componentes harmônicos; portanto, é a soma da potência ativa em cada harmônico. Além disso, pelo fato da distorção da tensão ser geralmente muito baixa em sistemas de energia (menos do que 5%), a equação (7) é uma boa aproximação, independentemente de quão distorcida a corrente esteja. Esta aproximação não pode ser aplicada no cálculo da potência aparente e reativa. Estas duas quantidades são fortemente influenciadas pela distorção. A potência aparente S é uma medida do potencial impacto da carga sobre a capacidade térmica do sistema. É proporcional ao valor eficaz da corrente distorcida, e seu cálculo é simples, embora um pouco mais complicado do que o caso senoidal. Além disso, muitos medidores de corrente podem agora informar diretamente o verdadeiro valor eficaz de uma onda distorcida.

A potência reativa é um tipo de potência que não realiza trabalho e é geralmente associada com elementos reativos (indutores e capacitores). Por exemplo, a indutância de uma carga como um motor faz com que a corrente da carga fique atrasada em relação à tensão. Por esta razão é chamada de potência imaginária ou reativa, uma vez que nenhuma potência é dissipada ou gasta.

Ela é expressa em unidades de vars. No caso senoidal, a potência reativa é simplesmente definida como:

$$Q = S \cdot \text{sen}\theta_1 = \frac{V_1 I_1}{2} \text{sen}\theta_1 = V_{1rms} I_{1rms} \text{sen}\theta_1 \quad (8)$$

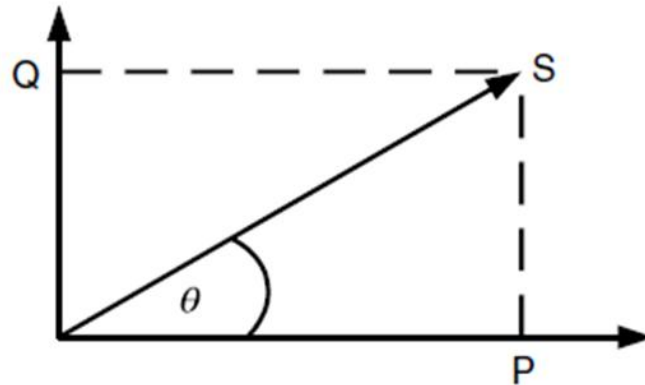
Onde Q é a porção de potência em quadratura com a potência ativa mostrada na equação. (7). A Figura 5 resume a relação entre P , Q e S na condição senoidal.

Há algum desacordo entre os analistas de harmônicos sobre como definir Q na presença de distorção harmônica. Se não fosse pelo fato de que muitas concessionárias medirem Q e calcularem o faturamento de demanda pelo fator de potência calculado por Q , seria um ponto discutível. É mais importante determinar P e S ; P define o quanto de energia ativa está sendo consumida, enquanto S define a capacidade do sistema de potência necessário para fornecer P . Q não é realmente útil por si só. No entanto, Q_1 , a componente de energia reativa tradicional na frequência fundamental, pode ser utilizada para dimensionamento de capacitores shunt.

A potência reativa quando a distorção está presente tem outra peculiaridade interessante. Na verdade, pode não ser apropriado chamá-la de potência reativa. O fluxo de var no sistema de energia é um conceito bem fundamentado formação de engenheiros de potência, mas é importante salientar que este conceito é válido somente no estado senoidal estável. Quando

a distorção está presente, a componente de S que permanece após P ser retirado não é conservada, isto é, não soma-se zero em um nó. Presume-se que as quantidades de potência fluem em torno do sistema de forma conservativa.

Figura 5 – Relação entre P Q e S em condição senoidal



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Isto não implica que P não é conservada ou que a corrente não é conservada porque a conservação de energia e as leis atuais de Kirchoff são ainda aplicáveis para qualquer forma de onda. Os componentes reativos, na verdade, somam-se em quadratura (raiz quadrada da soma dos quadrados).

Isso levou alguns analistas a propor que Q seja utilizado para designar os componentes reativos que são conservados e introduzir uma nova quantidade para os componentes que não são. Muitos chamam essa quantidade D como potência de distorção. Possui unidades de volt-ampères, mas não é apropriado se referir a essa quantidade como potência reativa, porque ela não flui através do sistema como assume-se que a potência faça. Neste conceito, Q consiste na soma dos valores de potência reativos em cada frequência. Sendo que D representa todos os produtos cruzados de tensão e corrente em diferentes frequências, que não produzem uma potência média. P, Q, D e S são relacionados da seguinte forma, usando as definições de S e P anteriormente dadas nas equações. (1) e (6), como um ponto de partida:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (9)$$

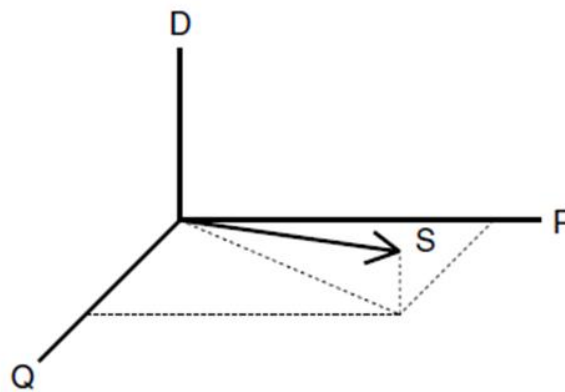
$$Q = \sum_k V_k I_k \text{ sen}\theta_k \quad (10)$$

Portanto, D pode ser determinada através de S , P , Q :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (11)$$

Alguns profissionais preferem utilizar um gráfico de vetor tridimensional para demonstrar as relações entre os componentes, como mostrado na Figura 6. As componentes P e Q contribuem com as componentes senoidais tradicionais de S , enquanto que D representa a contribuição adicional para a potência aparente, pelas harmônicas.

Figura 6 – Relação entre as componentes da potência aparente



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

2.5.2 Fator de Potência

Fator de potência (FP) é uma proporção da potência útil para realizar o trabalho real (potência ativa) pela a potência fornecida por uma concessionária (potência aparente), ou seja:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (12)$$

Em outras palavras, esta proporção conhecida por fator de potência mede a porcentagem de energia gasta para a sua utilização pretendida. O fator de potência pode variar de zero a um. Uma carga com fator de potência de 0,9 atrasado denota que a carga pode efetivamente gastar 90% da potência aparente fornecida (voltamperes) e convertê-la para realizar um trabalho útil (watts). O termo atraso denota que o fasor corrente fundamental fica para trás do fasor tensão fundamental, neste exemplo, em $25,84^\circ$.

No caso senoidal há apenas um ângulo de fase entre a tensão e a corrente uma vez que apenas a frequência fundamental está presente, e o fator de potência pode ser calculado como o cosseno do ângulo de fase e é comumente chamado de fator de deslocamento:

$$FD = \cos\theta \quad (13)$$

No caso não senoidal o fator de potência não pode ser definido como o cosseno do ângulo de fase, como na equação (13). O fator de potência, que leva em conta a contribuição de toda a potência ativa, incluindo as frequências tanto fundamentais quanto harmônicas, é conhecido como o fator de potência verdadeiro. O fator de potência verdadeiro é simplesmente a razão entre a potência ativa total para todas as frequências para a potência aparente entregue pela concessionária, conforme mostrado na Equação (12).

Instrumentos novos de monitoramento de qualidade de energia geralmente relatam tanto fator de deslocamento como o fator de potência verdadeiro. Muitos dispositivos, tais como fontes de alimentação chaveadas, e módulos PWM de velocidade ajustável, tem um fator de deslocamento próximo ao unitário, mas o fator de potência verdadeiro pode estar em torno de 0,5-0,6. Um capacitor do lado CA fará pouco para melhorar o fator de potência verdadeiro neste caso, porque $Q1$ é zero. Na verdade, se resultar em ressonância, a distorção pode aumentar ainda mais, fazendo com que o fator de potência se degrade. O fator de potência verdadeiro indica quão grande o sistema de fornecimento de energia deve ser construído para suprir uma determinada carga. Neste exemplo, se apenas o fator de deslocamento fosse considerado, chegaria-se a conclusão de que o sistema possui uma alta eficiência, o que não é verdadeiro.

O fundamental é que a distorção resulta em componentes de corrente adicionais fluindo no sistema, que não produzem qualquer energia líquida, apenas causando perdas nos elementos do sistema de energia por onde fluem. Isto requer que o sistema de potência seja construído para uma capacidade ligeiramente maior que o caso da distorção não presente, para que seja possível entregar a energia necessária à carga.

2.5.3 Sequências de Fase Harmônicas

Engenheiros de energia tradicionalmente utilizam componentes simétricas para descrever o comportamento do sistema trifásico desequilibrado. O sistema de três fases desequilibrado é transformado em três sistemas simétricos, que são mais simples para analisar. O método de componentes simétricas pode ser empregado para a análise da resposta do sistema para correntes harmônicas, desde que não se violem os pressupostos fundamentais do método.

Este método permite que qualquer conjunto desequilibrado de correntes de fase (ou tensões), possa ser transformado em três conjuntos equilibrados.

O conjunto de sequência positiva contém três fasores deslocados 120° entre si, com a rotação de fase normal A-B-C. Os fasores de sequência negativa também são deslocados 120° , mas tem rotação de fase oposta A-C-B. Os fasores de sequência zero estão em fase uns com os outros (por exemplo, $0^\circ, 0^\circ, 0^\circ$).

Em um sistema trifásico perfeitamente equilibrado, a sequência de fase harmônica pode ser determinada multiplicando o número harmônico h com a rotação normal de fase de sequência positiva. Por exemplo, para a segunda harmônica, $h=2$, se obtém $2 \times (0, -120^\circ, 120^\circ)$ ou $(0^\circ, 120^\circ, -120^\circ)$, que é a sequência negativa. Para a terceira harmônica, $h=3$, se obtém $3 \times (0^\circ, -120^\circ, 120^\circ)$ ou $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$, que é a sequência zero. Sequências de fases para todas as outras ordens harmônicas podem ser determinadas da mesma forma.

Uma vez que uma forma de onda distorcida em sistemas de potência em geral contém apenas componentes harmônicas ímpares (ver capítulo 5.1.), somente as rotações de sequência de fase harmônica ímpar estão resumidas aqui:

- Harmônicos de ordem $h = 1, 7, 13, \dots$ são de sequência positiva.
- Harmônicos de ordem $h = 5, 11, 17, \dots$ são de sequência negativa.
- Harmônicos com ordem múltipla de três ($h = 3, 9, 15, \dots$) são de sequência zero.

Impactos destas sequências harmônicas em vários componentes do sistema de energia são detalhados no Capítulo. 2.7.

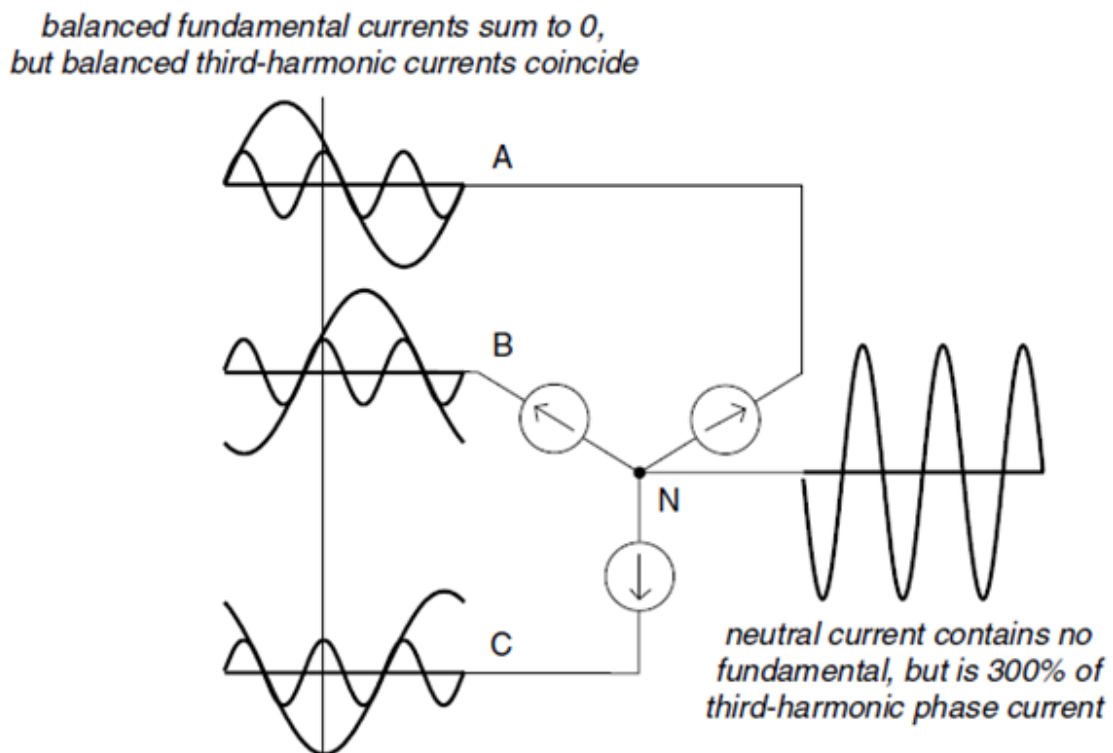
2.5.4 Harmônicos de Ordem Múltipla de Três

É necessário uma abordagem específica para os harmônicos de ordem múltipla de 3, mais especificamente nos múltiplos ímpares da terceira harmônica ($h=3, 9, 15, 21, \dots$). Eles

necessitam de atenção especial devido a resposta de o sistema ser consideravelmente diferente para estes harmônicos. Estes harmônicos ímpares múltiplos de 3 tornam-se um problema importante para sistemas com conexão em estrela com neutro aterrado, onde há corrente de sequência zero circulando no neutro. Dois problemas típicos são a sobrecarga do neutro e interferências em sistemas telefônicos. Ocasionalmente pode ocorrer de dispositivos operarem de maneira incorreta devido à tensão linha-neutro estar altamente distorcida pela queda de tensão deste harmônico múltiplo de 3 no condutor neutro.

Para o sistema com cargas de fase perfeitamente balanceadas, ilustrado na Figura 7, assume-se que a fundamental e a terceira harmônica estão presentes. Somando as correntes no nó N, as componentes da corrente fundamental no neutro devem ser zero, mas as componentes da terceira harmônica equivalem a 3 vezes as correntes de fase, pelo fato de coincidirem naturalmente na fase e no tempo.

Figura 7 – Altas correntes de neutro pelo circuito, alimentando cargas monofásicas não lineares.

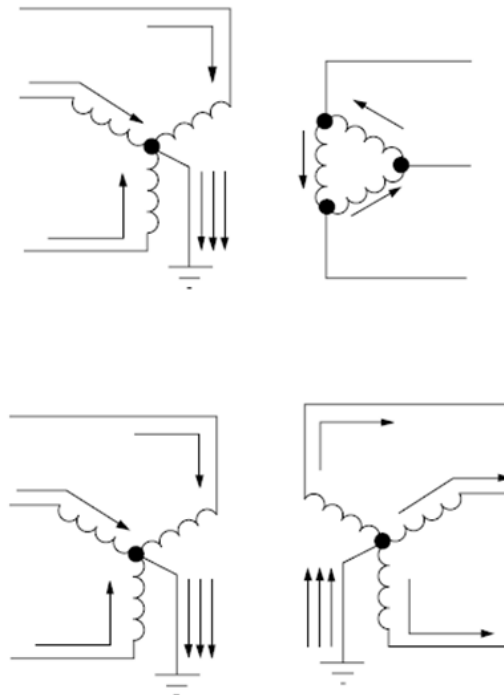


Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

As conexões dos enrolamentos do transformador possuem um impacto significativo no fluxo de correntes harmônicas múltiplas de 3. Dois casos são demonstrados na Figura 8. No transformador estrela-delta (acima), as harmônicas múltiplas de 3 são mostradas entrando pelo lado estrela. Desde que estas estejam em fase, são somadas no neutro. O enrolamento

delta provê um balanço de ampère-espiras para que possam fluir, mas elas permanecem fluindo no delta e não aparecem em correntes de linha do lado delta. Quando as correntes são balanceadas, as correntes harmônicas múltiplas de 3 comportam-se exatamente como correntes de sequência zero, pois é exatamente o que são. Este tipo de conexão de transformador é mais comumente aplicado em subestações de distribuição da concessionária, com o enrolamento em delta conectado com o barramento de transmissão.

Figura 8 – Fluxo de corrente de terceira harmônica em transformadores trifásicos



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Usando enrolamentos aterrados em ambos os lados do transformador, permite-se que harmônicos de ordem 3 equilibrados fluam do sistema de baixa tensão para o sistema de alta tensão, ficando com proporções iguais de ambos os lados. Muitas cargas comerciais são feitas nesta configuração.

Algumas decorrências importantes deste modo em relação a análise de qualidade de potência são:

1. transformadores, especialmente as conexões do neutro, são suscetíveis ao superaquecimento quando servindo cargas monofásicas no lado estrela, que possuem conteúdo de terceiro harmônico elevado;

2. medir a corrente no lado delta de um transformador não mostra as correntes múltiplas de 3 e por conseguinte, não dão uma ideia verdadeira do aquecimento que transformador possa estar submetido;

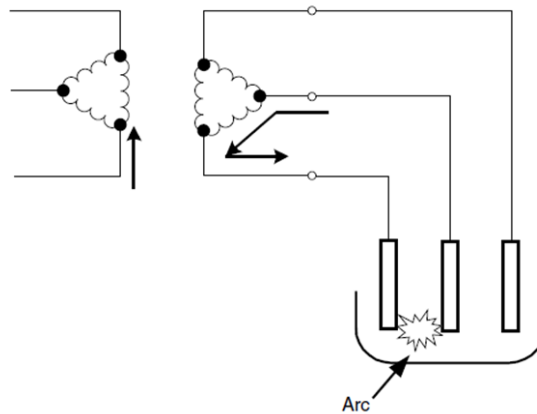
3. o fluxo de correntes harmônicas múltiplas de 3 pode ser interrompido pela isolação apropriada da conexão do transformador. Removendo a ligação do neutro em um ou ambos os enrolamentos estrela, se bloqueia o fluxo de corrente harmônica múltipla de 3. Não há lugar para balanço de ampère-espiras. Da mesma forma, um enrolamento em delta bloqueia o fluxo a partir da linha;

Note-se que os transformadores com núcleo de três pernas se comportam como se tivessem um delta "fantasma" como enrolamento terciário. Portanto, a conexão estrela-estrela com apenas um ponto neutro aterrado ainda será capaz de conduzir as harmônicas múltiplas de 3 para o outro lado.

Estas regras sobre o fluxo de correntes harmônicas múltiplas de 3 em transformadores aplicam-se apenas às condições de carga equilibrada. Quando as fases não são equilibradas, correntes de frequências harmônicas múltiplas de 3 podem muito bem mostrar-se onde não são esperadas. O modo normal de harmônicas múltiplas de 3 é ser de sequência zero. Durante desequilíbrios, estas harmônicas também podem apresentar componentes positivas ou negativas da sequência.

Um exemplo significativo disto é o de um forno de arco trifásico. O forno quase sempre é alimentado por uma ligação delta-delta do transformador para bloquear o fluxo das correntes de sequência zero, como mostrado na Figura 9. Partindo do pressuposto que terceiros harmônicos são sinônimos de sequência zero, encontra-se substancial presença de corrente de terceira harmônica em grandes magnitudes na corrente de linha. No entanto, durante a fusão do material, o forno frequentemente opera em um modo desequilibrado, com apenas dois eletrodos carregando corrente elétrica. Grandes correntes de terceira harmônica podem então circular livremente nestas duas fases, assim como em um circuito monofásico.

Figura 9 – Forno de arco operando em modo desequilibrado permite que harmônicas múltiplas de 3 alcancem o sistema de energia, embora esteja conectado em delta ao transformador



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

No entanto, elas não são correntes de sequência zero. As correntes de harmônicos múltiplos de 3 têm quantidades iguais de correntes de sequência positiva e negativa. Mas, na medida em que o sistema vai se tornando equilibrado, estes harmônicos se comportam da maneira descrita anteriormente.

2.5.5 Índices Harmônicos

As duas grandezas mais utilizadas para medir o conteúdo harmônico de uma onda são a distorção harmônica total e a distorção da demanda total. Ambas são medidas do valor eficaz de uma forma de onda e podem ser aplicados em tensão ou corrente.

2.5.5.1 Distorção Harmônica Total

A distorção harmônica total (DHT) é uma medida do valor eficaz das componentes harmônicas de uma forma de onda distorcida. Ou seja, é o valor potencial de aquecimento dos harmônicos relativos à fundamental. Este índice pode ser calculado para tensão ou corrente:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{H_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (14)$$

Onde M_h é o valor eficaz da componente harmônica h de quantidade M .

O valor eficaz de uma forma de onda distorcida é a raiz quadrada da soma dos quadrados, como mostrado nas equações (4) e (5). A DHT está relacionada com o valor eficaz RMS da forma de onda, como segue:

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{H_{max}} M_h^2} = M_1 \sqrt{1 + DHT^2} \quad (15)$$

A DHT é uma quantidade muito útil para muitas aplicações, porém as suas limitações devem ser levadas em conta. Ela pode proporcionar uma boa ideia de quanto calor extra será gerado quando uma tensão distorcida for aplicada através de uma carga resistiva. Da mesma forma, ela pode dar uma indicação sobre as perdas adicionais causadas pela corrente que flui através de um condutor. No entanto, não é um bom indicador do stress de tensão dentro de um capacitor, pois está relacionada com o valor de pico da forma de onda de tensão, não o seu poder calorífico.

O índice de DHT é mais frequentemente usado para descrever a distorção harmônica total de tensão, tendo a terminologia aplicada pelo PRODIST como *DTT%*, um valor percentual relativo a fundamental, sendo:

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (16)$$

Variações na DHT ao longo de um período de tempo, muitas vezes seguem um padrão distinto que representa as atividades de carga não lineares no sistema. A Figura 10 mostra a variação de DHT de tensão ao longo de um período de uma semana, onde um padrão cíclico diário é evidente. A DHT de tensão mostrada na Figura 10 foi feita em uma subestação de distribuição de 13,2 kV alimentando uma carga residencial. Valores altos de DHT ocorrem durante a noite e durante as primeiras horas da manhã uma vez que as cargas não lineares são relativamente elevadas em comparação com a quantidade de carga linear durante estas horas. Um período de observação de uma semana é necessário para chegar a um padrão DHT significativo, uma vez que normalmente é o período mais curto para obter resultados de medição representativos e reproduzíveis (IEEE 519, 2004).

Figura 10 – Variação de DHT em uma subestação, durante uma semana.

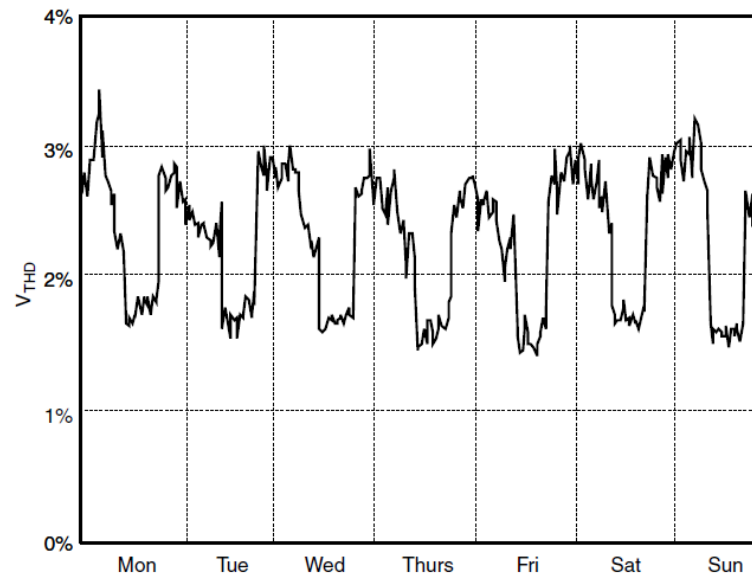


Figure 5.9 Variation of the voltage THD over a 1-week period.

Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

2.5.5.2 Distorção de Demanda Total

Níveis de distorção podem ser caracterizados por um valor de DHT, como já foi descrito, mas muitas vezes isso pode ser enganoso. Uma pequena corrente pode ter uma alta DHT, mas não ser uma ameaça significativa para o sistema. Por exemplo, muitos módulos (drives) de velocidade ajustável podem apresentar valores elevados de DHT para a corrente de entrada, quando estiverem funcionando com cargas muito baixas. Isso não é necessariamente uma preocupação significativa, porque a magnitude da corrente harmônica é baixa, apesar de sua distorção relativa ser alta.

Alguns analistas têm tentado evitar esta dificuldade, referindo a DHT à fundamental do pico de demanda de carga da corrente, em vez de utilizar o valor da fundamental presente na amostra. Isso é chamado de distorção de demanda total (DDT) e serve como base para as diretrizes da Norma IEEE 519(2004), “*Práticas e Requisitos Recomendados para Controle Harmônico em Sistemas Elétricos de Potência*”. Esta grandeza é definida da seguinte forma:

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{H_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad (17)$$

Onde I_L é o pico ou máxima demanda de corrente de carga, na componente da frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum (PAC). Há duas maneiras de medir a I_L . Com uma carga já existente no sistema, pode ser calculada como a média da corrente de demanda máxima para os últimos 12 meses. O cálculo pode ser feito simplesmente pela média das leituras de pico de demanda de 12 meses. Para uma nova instalação, I_L deve ser estimada com base nos perfis de carga previstos.

2.6 FONTES DE HARMÔNICOS EM CARGAS COMERCIAIS

Em instalações comerciais, como complexos de escritórios, lojas, hospitais e centros de dados, prevalece a iluminação fluorescente, com reatores eletrônicos de alta eficiência, uso de módulos (drives) de velocidade ajustável para o aquecimento, ventilação e ar condicionado, unidades de elevador, e também o uso de equipamentos eletrônicos sensíveis, alimentados por fontes chaveadas de alimentação monofásica (Subjak, 1990). Cargas comerciais são caracterizadas por um grande número de pequenas cargas de geração de harmônicos. Dependendo da diversidade dos diferentes tipos de carga, essas pequenas correntes harmônicas podem se somar em fase ou se anular mutuamente. Os níveis de distorção de tensão dependem tanto das impedâncias do circuito e da distorção harmônica total.

Desde que capacitores para correção de fator de potência não são normalmente utilizados em instalações comerciais, a impedância do circuito é composta em maior parte pelos transformadores de entrada da distribuidora e impedância dos condutores. Portanto, a distorção da tensão pode ser calculada simplesmente multiplicando a corrente pela impedância ajustada em termos de frequência (Subjak, 1990).

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga puramente resistiva), para os quais a forma de onda não é tão relevante. Os equipamentos mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal, como por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes (IEEE, 1982).

Características das cargas comuns não lineares em instalações comerciais são detalhadas nas seções seguintes.

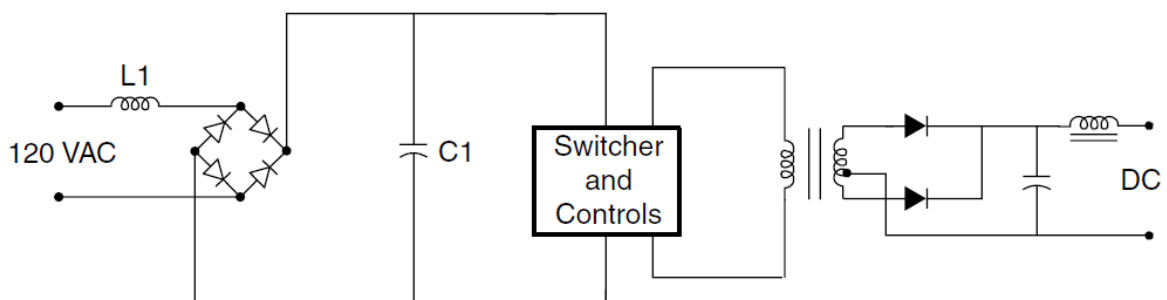
2.6.1 Fontes de Alimentação Chaveadas

Cargas como conversores eletrônicos de potência, com a sua capacidade para a produção de correntes harmônicas, agora constituem a classe mais importante de cargas não lineares do sistema de potência (Dugan, 2004). Avanços na tecnologia de dispositivos semicondutores têm realizado uma revolução na eletrônica de potência ao longo da última década, com a tendência de se tornarem cada vez mais presentes. Os equipamentos incluem módulos de velocidade ajustável (drives) de motores, fontes de alimentação eletrônicas, acionadores de motor CC, carregadores de bateria, reatores eletrônicos, e muitas outras aplicações envolvendo retificadores e inversores.

Uma das principais preocupações em edifícios comerciais é que as fontes de energia para equipamentos eletrônicos monofásicos produzem muita corrente harmônica na fiação instalada (Subjak, 1990). A alimentação CC para equipamentos de escritório com base em eletrônica microprocessada moderna é comumente derivada de uma ponte de diodos retificadores monofásicos de onda completa. A porcentagem de carga que contém fontes de alimentação eletrônicas está aumentando a um ritmo drástico, com o aumento da utilização de computadores pessoais em todos os setores comerciais.

Existem dois tipos mais comuns de fonte de alimentação monofásica. Tecnologias mais antigas usam métodos de controle de tensão do lado CA, como transformadores, para reduzir as tensões ao nível exigido para o barramento CC. A indutância do transformador fornece um efeito benéfico ao suavizar a forma de onda de entrada de corrente, reduzindo o conteúdo de harmônicas (Subjak, 1990). Já as fontes de alimentação com tecnologias mais recentes, no modo de comutação (ver Figura 11) utilizam técnicas de conversão CC-CC para conseguir uma saída contínua.

Figura 11 – Modelo simplificado de fonte de alimentação chaveada

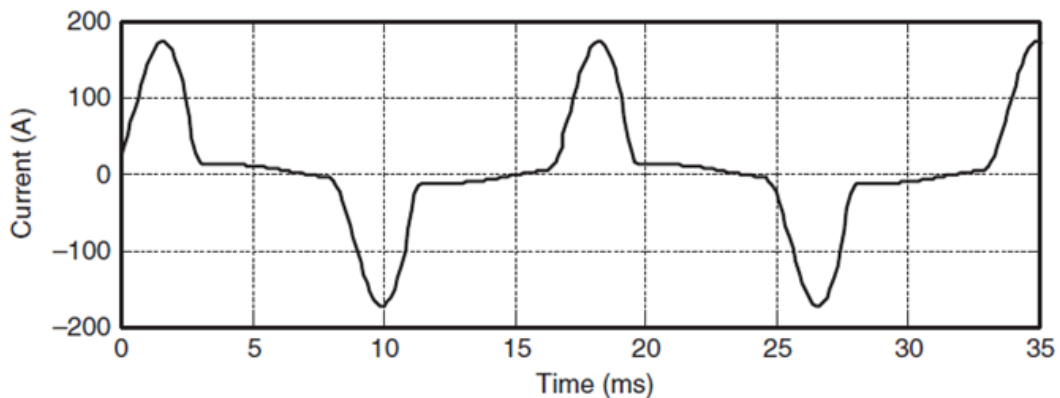


Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

A ponte de diodos da entrada está ligada diretamente à linha de corrente alternada, eliminando a necessidade de um transformador. Isto resulta numa tensão CC grosseiramente regulada no capacitor. Esta corrente contínua é então convertida novamente em corrente alternada em uma frequência muito alta por um circuito de chaveamento (switcher) e posteriormente retificada novamente. Os computadores pessoais, impressoras, copiadoras e outros equipamentos eletrônicos monofásicos empregam, quase que universalmente este tipo de fonte de alimentação chaveada. As principais vantagens são o peso leve, tamanho compacto, operação eficiente, e a falta de necessidade de um transformador. Estas fontes de alimentação chaveadas também podem normalmente tolerar grandes variações na tensão de entrada (Dugan, 2004).

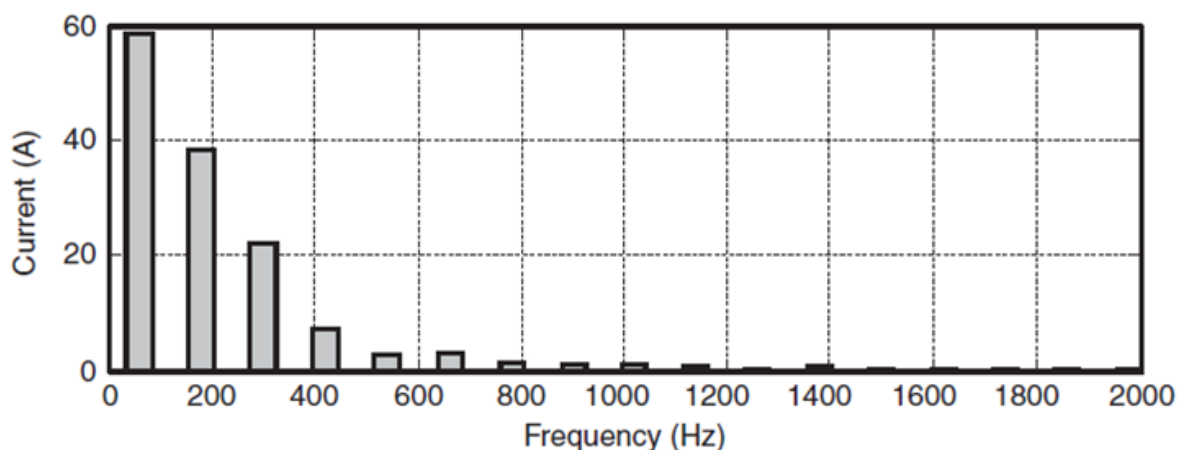
Pelo fato de não haver nenhuma grande indutância do lado CA, a corrente de entrada para a fonte de alimentação vem em pulsos muito curtos, assim como o capacitor C1 recupera a sua carga a cada meio ciclo. As Figuras 12 e 13 ilustram a forma de onda de corrente e o espectro, respectivamente, para um circuito inteiro alimentando uma variedade de equipamentos eletrônicos com fontes de alimentação chaveadas.

Figura 12 – Forma de onda típica da corrente ao alimentar equipamentos com fonte chaveada



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Figura 13 – Espectro harmônicotípico da corrente ao alimentar equipamentos com fonte chaveada



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Uma característica distinta de fontes de alimentação chaveadas é conteúdo de terceira harmônica de corrente bastante elevado (Subjak, 1990).

Uma vez que os componentes de terceira harmônica de corrente somam-se no neutro de um sistema trifásico, a crescente aplicação de fontes de alimentação chaveadas causa grande preocupação em relação à sobrecarga dos condutores neutros, especialmente em edifícios mais antigos, onde pode estar instalado um condutor neutro subdimensionado. Há também uma preocupação com o superaquecimento do transformador, devido a uma combinação de conteúdo harmônico da corrente, fluxo disperso, e altas correntes de neutro (Alammari, 2004).

2.6.2 Iluminação Fluorescente

A iluminação geralmente é responsável por 40 a 60% da carga em um edifício comercial. De acordo com o estudo de 1995, “Commercial Buildings Energy Consumption”, realizado pela Administração de Informação de Energia dos EUA, a iluminação fluorescente já estava sendo usada em 77% dos espaços comerciais, enquanto apenas 14% dos espaços comerciais utilizam unicamente iluminação incandescente. As lâmpadas fluorescentes são uma escolha popular para a economia de energia.

Lâmpadas fluorescentes são lâmpadas de descarga; assim, elas necessitam de um reator para fornecer uma tensão inicial elevada, para assim iniciar esta descarga, fazendo que a corrente elétrica flua entre os dois eletrodos do tubo fluorescente. Uma vez que a descarga é estabelecida, a tensão diminui à medida que o arco de corrente aumenta. É essencialmente um

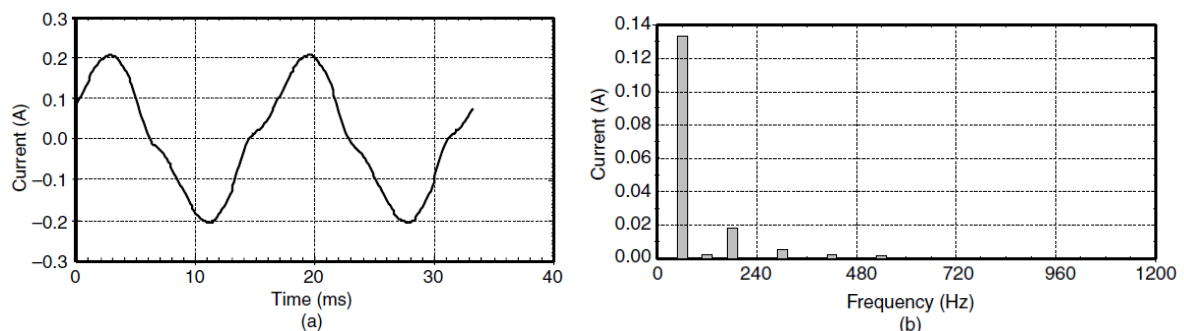
curto-circuito entre os dois eletrodos, e o reator deve reduzir rapidamente a corrente a um nível para manter o lúmen de saída especificado. Assim, o reator também é um dispositivo de limitação de corrente em aplicações de iluminação (Liew, 1989).

Existem dois tipos de reatores, magnéticos e eletrônicos. Um reator magnético padrão é simplesmente composto de um transformador com núcleo de ferro, com um capacitor envolto em um material isolante. Um único reator magnético pode gerir uma ou duas lâmpadas fluorescentes, e opera na frequência fundamental da linha, ou seja, 50 ou 60 Hz. O reator magnético de núcleo de ferro contribui com perdas adicionais em forma de calor, o que torna ineficiente comparado a um reator eletrônico.

Um reator eletrônico emprega uma fonte de alimentação chaveada para converter a tensão com frequência fundamental na entrada para uma tensão de frequência muito mais elevada, tipicamente na faixa de 25 a 40 kHz. Esta alta frequência tem duas vantagens. Primeiramente, um indutor pequeno é suficiente para limitar a corrente do arco. Em segundo lugar, a alta frequência reduz significativamente o efeito de cintilação (flicker) de 100 ou de 120 Hz, que ocorre em um reator magnético de núcleo de ferro, praticamente o eliminando. Um único reator eletrônico normalmente pode operar com até quatro lâmpadas fluorescentes (Dugan, 2004).

Os reatores magnéticos comuns normalmente são fontes de harmônicos adicionais ligeiramente mais brandos, dado que a principal distorção harmônica vem do comportamento do arco. A Figura 14 apresenta uma corrente da lâmpada fluorescente e sua medida de espectro harmônico. A DHT atual é de 15 %.

Figura 14 – Lâmpada fluorescente com reator magnético(a) forma de onda da corrente e (b) espectro harmônico

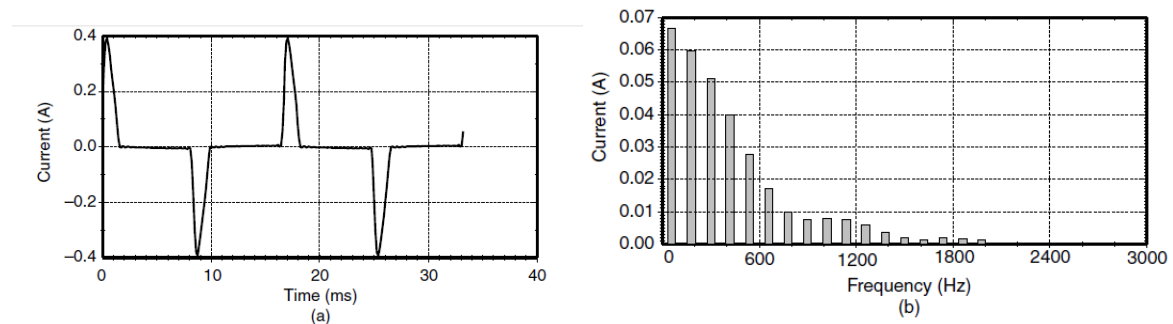


Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Como comparação, reatores eletrônicos, que utilizam fontes de alimentação chaveadas, podem dobrar ou triplicar a saída harmônica de um reator magnético padrão. A Figura 15

mostra uma lâmpada fluorescente com reator eletrônico que tem uma DHT de corrente de 44%.

Figura 15 – Lâmpada fluorescente com reator eletrônico(a) forma de onda da corrente e (b) espectro harmônico



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004).

Os reatores eletrônicos tipicamente produzem DHTs de corrente na faixa de entre 10 e 32%. Existe um padrão Ansi (American National Standard), C82.11-2002 “Reatores de Lâmpadas Fluorescentes de Alta Frequência”, que considera excessivo o valor de 32% para a distorção harmônica de corrente. Normalmente, a maioria dos reatores eletrônicos está equipada com filtragem passiva para reduzir a entrada de distorção harmônica de corrente para menos de 20%. Uma vez que as lâmpadas fluorescentes são uma fonte significativa de harmônicos em edifícios comerciais, são normalmente distribuídas entre as fases da forma mais equilibrada possível (Liew, 1989).

Com um transformador de alimentação utilizando a conexão em delta, se reduz a quantidade de correntes harmônicas múltiplas de 3 fluindo para o sistema de alimentação. Deve-se notar que os transformadores de fornecimento, com ligação estrela em estrela comuns, não impedem o fluxo de harmônicos múltiplos de 3, independentemente de quão bem equilibradas as fases estejam.

2.6.3 Módulos de Velocidade Ajustável para Elevadores e Climatização

Segundo (DOMIJAN, 1990), as aplicações mais comuns de acionadores (módulos) de velocidade ajustável (AVV) - do inglês, adjustable-speed drives - em cargas comerciais podem ser encontradas em motores de elevadores e em bombas e ventiladores em sistemas de climatização. Um AVV é composto por um conversor eletrônico de potência que converte a tensão AC e a frequência da rede em valores de tensão e frequência variáveis. Esta variação nos valores de tensão e frequência permite que o AVV controle a velocidade do motor para corres-

ponder à exigência de aplicação, como regular a velocidade de uma bomba ou de um ventilador do sistema de ar condicionado. Os módulos de velocidade ajustável também encontram muitas aplicações em cargas industriais.

2.7 EFEITOS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

As correntes harmônicas produzidas por cargas não lineares são injetadas de volta para os sistemas de alimentação. Essas correntes podem interagir negativamente com uma ampla gama de equipamentos do sistema de energia, mais notavelmente capacitores, transformadores e motores, causando perdas adicionais, superaquecimento e sobrecarga.

Essas correntes harmônicas também podem causar interferência com linhas de telecomunicações e erros na medição de potência (KEY, 1993). As próximas seções apresentam os impactos da distorção harmônica em vários componentes do sistema de potência e telecomunicações.

2.7.1 Impacto em Capacitores

Um grande problema da distorção harmônica em capacitores é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão (IEEE 1982).

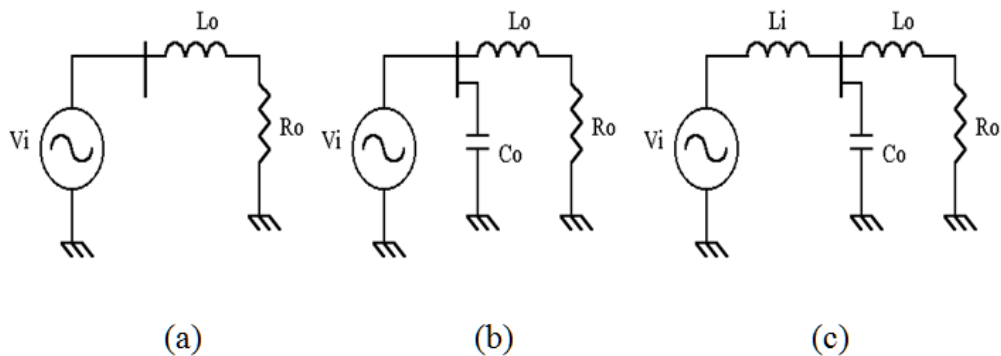
As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor (Boylestad, 2003).

A Figura 15 mostra exemplos de correção do fator de potência de uma carga, que podem levar à ocorrência de ressonância no sistema. Na Figura 16 são mostrados os gráficos relativos à tensão e às correntes da fonte, nos diferentes circuitos.

Considera-se o circuito (a), no qual é alimentada uma carga do tipo RL, apresentando um baixo fator de potência. No circuito (b), é inserido um capacitor que corrige o fator de potência, como se observa pela forma da corrente mostrada na Figura 16 (intermediária). Supõe-se que o sistema de alimentação possua uma reatância indutiva, a qual interage com o capacitor e produz uma ressonância série (que conduz a um curto-circuito na frequência de sintonia). Caso a tensão de alimentação possua uma componente nesta frequência, esta har-

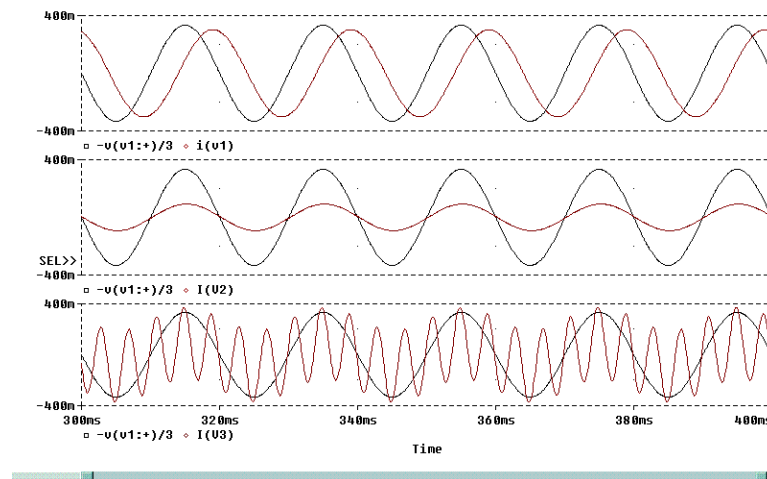
mônica será amplificada. Isto é observado na Figura 16 (inferior), considerando a presença de uma componente de tensão de 5ª harmônica, com 3% de amplitude. Observa-se uma notável amplificação na corrente, o que poderia produzir importantes efeitos sobre o sistema.

Figura 15 – Circuitos equivalentes para análise de ressonância da linha com capacitor de correção do fator de potência.



Fonte: Adaptado de (Lay 1996)

Figura 16 – Formas de onda relativas aos circuitos da Figura 15: (a) - superior; (b) - intermediário; (c) - inferior.



Fonte: Adaptado de (Lay 1996)

Este tipo de problema envolvendo harmônicos frequentemente apresenta-se em bancos de capacitores.

Tem-se como exemplo, o sistema da Figura 17, que demonstra uma forma de onda de corrente de um banco de capacitores em ressonância com o sistema, na 11ª harmônica. A corrente harmônica apresenta-se claramente, resultando em uma forma de onda que é, essencial-

mente, a 11ª harmônica no topo da frequência fundamental. Esta forma de onda de corrente tipicamente indica que o sistema está em ressonância e um banco de capacitores está envolvido. Em tal condição de ressonância, a corrente eficaz é tipicamente maior do que a classificação nominal do capacitor.

Figura 17 – Corrente típica em um capacitor com ressonância em 11ª harmônica

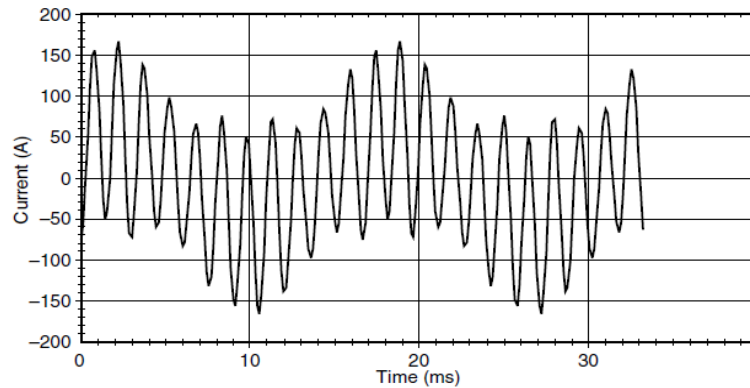


Figure 5.32 Typical capacitor current from a system in 11th-harmonic resonance.

Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

O padrão IEEE para Capacitores Shunt (padrão IEEE 18-2002) especifica as seguintes classificações para capacitores:

- a) 110% da tensão nominal eficaz(rms);
- b) 120% da tensão nominal de pico, ou seja, tensão de pico não superior a 1,2 x (raiz quadrada de dois) x tensão nominal rms, incluindo harmônicos, mas excluindo transitórios;
- c) 135% da corrente nominal rms, com base na tensão nominal reativa;
- d) 135% de potência reativa (kVAr) nominal.

A corrente fundamental de carga plena pode ser encontrada pela seguinte fórmula:

$$I_c = \frac{\text{kvar}_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{LL}} \quad (18)$$

Por exemplo, para se encontrar a corrente fundamental de carga plena de um capacitor de 1200 kVAr:

$$I_c = \frac{\text{kvar}_{3\phi}}{\sqrt{3} \times \text{kV}_{LL}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \times 13.8} = 50.2 \text{ A} \quad (19)$$

2.7.2 Impacto em Transformadores

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada. Além disso, o efeito das reatâncias de dispersão de um transformador é ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência (Boylestad, 2003).

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Harmônicos na tensão aumentam as perdas ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas cobre. A elevação das perdas cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente (Subjak, 1990).

Transformadores são projetados para fornecer a energia necessária para as cargas conectadas com perdas mínimas na frequência fundamental. A distorção harmônica de corrente, principalmente, assim como a de tensão, contribui para um aquecimento adicional no equipamento. Para projetar um transformador que acomode as frequências mais altas, os projetistas fazem escolhas diferentes no projeto, tais como a utilização de cabos continuamente transpostos em vez de condutor sólido, e colocar mais dutos de arrefecimento. Como regra geral, um transformador em que a distorção de corrente é superior a 5% é um candidato para a redução de capacidade devido aos harmônicos.

Existem três efeitos que resultam em aumento de aquecimento, quando o transformador de corrente de carga inclui componentes harmônicas:

1. corrente eficaz: Se o transformador é dimensionado apenas para os KVA requisitados pela carga, as correntes harmônicas podem fazer com que a corrente eficaz no transformador seja maior que sua capacidade. Esta corrente eficaz aumentada resulta em aumento nas perdas dos condutores;

2. perdas por correntes parasitas (também conhecida como correntes de Eddy ou Foucault). Estas são as correntes induzidas em um transformador, causada pelos fluxos magnéticos. Estas correntes induzidas fluem nos enrolamentos, no núcleo, e em outros corpos condutores sujeitos ao campo magnético do transformador, e provocam aquecimento adicional. Esta componente das perdas no transformador aumenta com o quadrado da frequência da corrente que está causando o efeito parasita (Dugan, 2004). Portanto, torna-se uma componente importante das perdas do transformador por aquecimento harmônico;

3. perdas no núcleo. O aumento das perdas no núcleo, na presença de harmônicos irá ser dependente do efeito dos harmônicos da tensão aplicada e do projeto do núcleo do trans-

formador. O aumento da distorção da tensão pode aumentar as correntes parasitas nas lâminas principais. O impacto líquido que este terá, depende da espessura das lâminas de núcleo e da qualidade do núcleo de aço. O aumento dessas perdas devido às harmônicas geralmente não é tão crítico como os dois anteriores.

Diretrizes para redução de capacidade de um transformador estão detalhadas na norma ANSI/IEEE C57.110-1998 “*Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*”. A análise representada na Tabela 1 pode ser resumida como se segue:

A perda de carga P_{LL} pode ser considerada como tendo duas componentes: perda I^2R e perdas por corrente parasita P_{EC} :

$$P_{LL} = I^2R + P_{EC} \quad (20)$$

A perda I^2R é diretamente proporcional ao valor eficaz da corrente. No entanto, a corrente parasita é proporcional ao quadrado da corrente e da frequência, a qual é definida por:

$$P_{EC} = K_{EC} I^2 h^2 \quad (21)$$

Onde K_{EC} é a constante de proporcionalidade.

A perda de carga total por unidade, em condições de corrente harmônica é dada por:

$$P_{LL} = \sum I_h^2 + (\sum I_h^2 \cdot h^2) P_{EC-R} \quad (22)$$

Tabela 1–Valores típicos de P_{EC-R}

Type	MVA	Voltage	P_{EC-R} , %
Dry	≤ 1	—	3–8
	≥ 1.5	5 kV HV	12–20
	≤ 1.5	15 kV HV	9–15
Oil-filled	≤ 2.5	480 V LV	1
	2.5–5	480 V LV	1–5
	> 5	480 V LV	9–15

Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Onde P_{EC-R} é o fator de perda por corrente parasita em condições avaliadas.

O fator K, comumente encontrado na literatura a respeito da qualidade da energia sobre redução de capacidade de transformadores, pode ser definido unicamente em termos de correntes harmônicas da seguinte forma:

$$K = \frac{\sum(I_h^2 \cdot h^2)}{\sum I_h^2} \quad (23)$$

Então, em termos do fator K, o valor eficaz da corrente distorcida é obtido, sendo:

$$\sqrt{\sum I_h^2} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R}}{1 + K \cdot P_{EC-R}}} \text{ (pu)} \quad (24)$$

Onde P_{EC-R} é o fator de perdas por corrente parasita

h é o número harmônico

I_h é a corrente harmônica

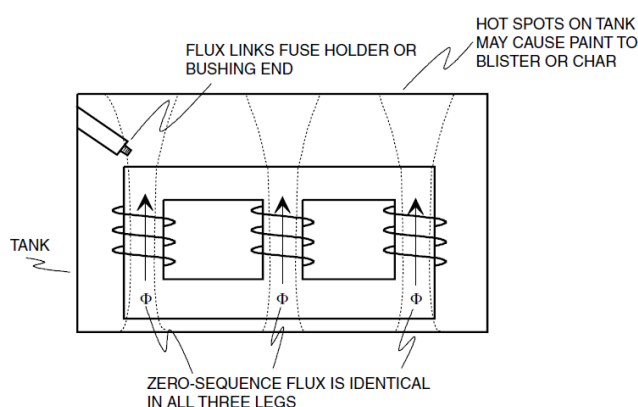
Assim, a redução de capacidade do transformador pode ser estimada se conhecendo o fator de perda por corrente parasita. Este fator pode ser determinado pelas seguintes maneiras:

1. obtendo o fator com o projetista do transformador;
2. usando dados de teste do transformador com o procedimento ANSI/IEEE Standard C57.110;
3. valores típicos baseados em tipo e tamanho do transformador (ver Tabela 1).

Muitas vezes há casos em que transformadores não parecem ter um problema com harmônicos, a partir dos critérios apresentados na Tabela 3, mas mesmo assim estão superaquecendo ou falhando, devido ao que parece ser sobrecarga. Um caso comum encontrado com transformadores aterrados em estrela, é que as correntes de linha contêm cerca de 8% de conteúdo de terceiro harmônico, o que é relativamente baixo, e mesmo assim, o transformador está superaquecendo com cargas menores que a nominal. Este transformador passa por testes de calor e ensaios de sobrecarga na fábrica, mas na prática pode não ter o mesmo desempenho por alguns motivos. Descontando problemas de refrigeração mecânica, existem chances de haver algum elemento condutor no campo magnético que está sendo afetado pelos fluxos harmônicos. Dentre várias possibilidades, as três mais comuns são:

1. fluxos de sequência-zero podem "escapar" do núcleo em projetos de núcleo com três pernas (o design mais popular para os transformadores de subestações de distribuição de concessionárias). Isto está ilustrado na Figura 18. Como os harmônicos múltiplos de 3 são predominantemente sequência zero, se as ligações dos enrolamentos permitirem o fluxo de corrente de sequência zero, esses fluxos harmônicos podem causar aquecimento adicional nos tanques, grampos do núcleo, etc., e este problema pode não ser diagnosticado em testes trifásicos ou monofásicos equilibrados;

Figura 18 – Fluxo de Sequência zero em transformador de três pernas fluindo pelo tanque



Fonte: Adaptado de (Dungan, 2004)

A corrente de linha de 8% mencionada anteriormente se traduz em uma corrente de terceiro harmônico no condutor neutro de 24% da corrente de fase. Isto pode aumentar consideravelmente a dispersão do fluxo no tanque e nos espaços de óleo e ar. Dois indicadores do fenômeno são bolhas na tinta no tanque, e evidência de aquecimento na extremidade de um fusível de tubo de baioneta (sem estourar o fusível) ou na bucha final;

2. deslocamentos (Offset) de CC na corrente também podem fazer o fluxo "escapar" dos limites do núcleo. O núcleo pode ficar ligeiramente saturado, por exemplo, no meio ciclo positivo, mantendo-se normal para o meio ciclo negativo. Há uma série de conversores eletrônicos de potência que produzem formas de onda de corrente que são assimétricas por acidente ou por questão de projeto. Isto pode resultar em um pequeno deslocamento CC no lado da carga do transformador (que não pode ser medido a partir do lado da fonte). Apenas uma pequena quantidade de deslocamento CC é necessária para causar problemas com a maioria dos transformadores de potência (Boylestad. 2003);

3. pode haver uma estrutura de fixação, extremidade de uma bucha, ou algum outro elemento de condução, muito próximo do campo magnético. Pode ser suficientemente pequena em tamanho, para que não haja nenhum efeito notável com as perdas parasitas na frequência fundamental, mas pode produzir um ponto quente, quando submetida a fluxos de harmônicos.

2.7.3 Impacto em Motores

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (seja indução ou síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Se afeta, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal. Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental, como ocorre com o 5^o, 11^o, 17^o, etc. harmônicos (Yang, 2010).

Algumas componentes harmônicas podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas industriais como, por exemplo, na produção de fios, em que a precisão no acionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

Motores podem ser significativamente afetados pela distorção harmônica de tensão. A distorção harmônica de tensão nos terminais do motor é traduzida em fluxos harmônicos dentro do motor. Estes fluxos harmônicos não contribuem significativamente para o torque do motor, mas giram com uma frequência diferente da frequência síncrona do rotor, basicamente induzindo correntes de alta frequência no rotor. O efeito sobre motores é semelhante ao de correntes de sequência negativa na frequência fundamental: os fluxos adicionais induzem perdas. Diminuição da eficiência, juntamente com o aquecimento, vibração e ruídos agudos são indicadores de distorção harmônica de tensão.

O sobreaquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de gaiola. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular, que proporciona a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional (Yang, 2010).

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos

valores obtidos com uma alimentação senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede.

Em frequências harmônicas, os motores geralmente podem ser representados pela reatância de rotor bloqueado conectado através da linha. Os componentes de tensão harmônica de ordem inferior, para os quais as magnitudes são maiores e a impedância aparente do motor menor, geralmente são os mais significativos para os motores.

Normalmente não há necessidade de reduzir as cargas de motores se a distorção de tensão permanecer dentro padrão IEEE 519-2004, com limites de 5% para DHT e 3% para qualquer harmônica individual. Problemas de aquecimento excessivo começam quando a distorção de tensão atinge valores maiores que 8 a 10%. Tal distorção deve ser corrigida para prolongar a vida útil do motor.

Motores se configuram em paralelo com a impedância do sistema de alimentação em relação ao fluxo de corrente harmônica e geralmente elevam o valor de ressonância do sistema, fazendo com que a indutância da rede diminua. Se isto é prejudicial para o sistema, depende da localização da ressonância do sistema antes de alimentar o motor. Motores podem também contribuir para o amortecimento de alguns dos componentes harmônicos, dependendo da razão X/R do circuito do rotor bloqueado. Em sistemas com muitos motores de menor tamanho, que têm uma baixa relação X/R , isto pode ajudar a atenuar ressonância harmônica. No entanto, não se aplica a motores de grande porte.

2.7.4 Impacto em Sistemas de Telecomunicação

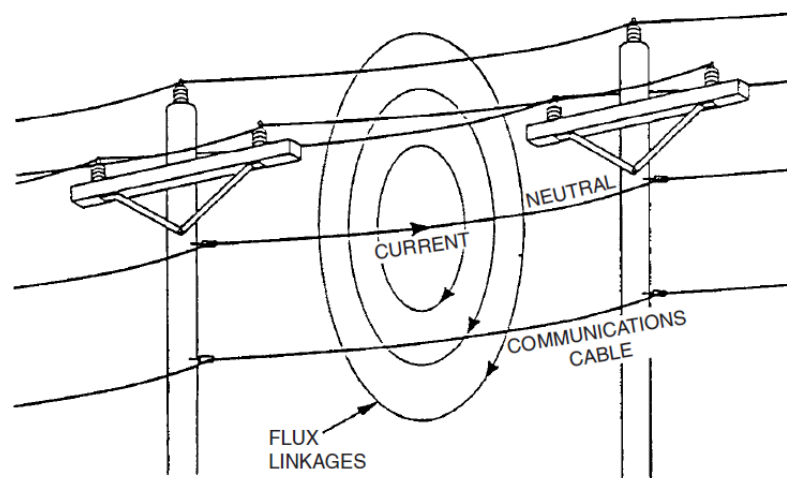
As correntes harmônicas que fluem no sistema de distribuição da concessionária ou dentro de uma instalação de usuário final podem criar interferência em circuitos de comunicação que compartilhem um caminho comum. Tensões induzidas em condutores paralelos pelas correntes harmônicas comuns, muitas vezes caem dentro da largura de banda normal das comunicações com voz.

Harmônicos entre 540 Hz (nono harmônico) e 1200 Hz são os que mais causam perturbação. A tensão induzida a cada ampere da corrente aumenta com a frequência. Harmônicas múltiplas de 3 (terceira, nona, décima quinta) são especialmente problemáticas nos sistemas de quatro fios, porque estão em fase em todos os condutores de um circuito de três fases

e, por conseguinte, se somam diretamente no circuito do neutro, e este tem a maior exposição com o circuito de comunicações.

As correntes harmônicas no sistema elétrico são acopladas em circuitos de comunicação, seja por indução ou condução direta. A Figura 19 ilustra o acoplamento do neutro de uma linha de distribuição aérea por indução. Este era um problema grave quando cabos blindados ainda não eram utilizados e os circuitos telefônicos eram a fio aberto. Agora, com o uso predominante de condutores blindados de par trançado para circuitos telefônicos, este modo de acoplamento é menos significativo. O acoplamento indutivo direto é igual em ambos os condutores, o que resulta numa rede de tensão zero no circuito formado pelo acoplamento dos condutores. O acoplamento indutivo ainda pode ser um problema se correntes elevadas forem induzidas em torno da blindagem dos condutores de telefone. A corrente fluindo no escudo provoca uma queda de tensão (Figura 20), o que resulta em uma diferença de potencial nas referências à terra nas extremidades do cabo de telefone.

Figura 19 – Acoplamento indutivo de corrente residual de um sistema de potência em circuito telefônico.

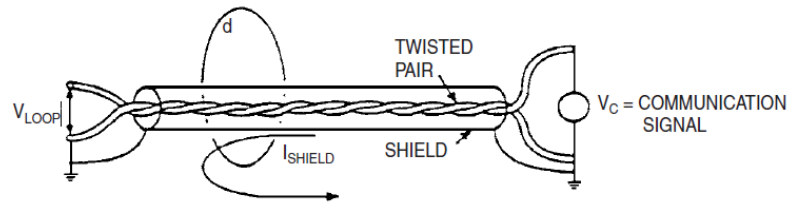


Fonte: Adaptado de (Dugan 2004)

As correntes de blindagem também podem ser causadas por condução direta. Tal como ilustrado na Figura 21, a blindagem está em paralelo com o caminho de terra do sistema de alimentação.

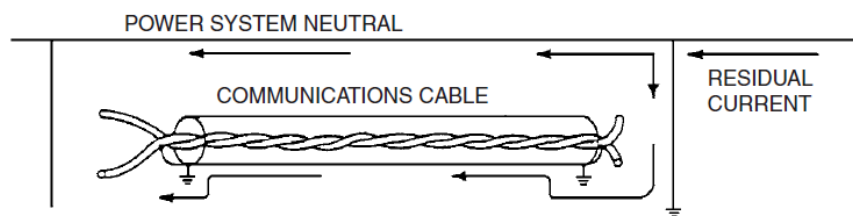
Se as condições do solo do local são tais que uma quantidade relativamente grande de corrente flui na blindagem, uma alta queda de tensão na blindagem pode novamente causar uma diferença de potencial nas referências à terra nas extremidades do cabo de telefone.

Figura 20 – Queda tensão em um cabo blindado, resultando em diferenças de potencial em referências nas terminações do cabo.



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Figura 21 – Acoplamento condutivo por uma malha de aterramento comum.



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

2.7.5 Impacto em Sistemas de Medição de Demanda e Energia

Companhias de energia elétrica geralmente medem o consumo de energia em duas grandezas: a energia acumulada total consumida e a potência máxima utilizada durante um determinado período. Assim, há duas taxas em um determinado período de faturamento, especialmente para grandes clientes industriais: taxas de energia e taxas de demanda. Os clientes residenciais são normalmente cobrados somente pelo consumo de energia. A tarifa de energia representa os custos de produção e fornecimento total de energia consumida ao longo de um período de faturamento e é medido em quilowatt-hora. A segunda parte da conta, a taxa de demanda, representa as despesas da concessionária para manter a capacidade elétrica adequada em todos os momentos, para atender a demanda de pico de cada cliente que utilizar a energia. A taxa de demanda reflete o custo fixado pela companhia no fornecimento da potência de pico requisitada. A taxa de demanda geralmente é determinada pelo maior pico da demanda, de 15 a 30 minutos de uso em um período de faturamento, e é medida em quilowatts.

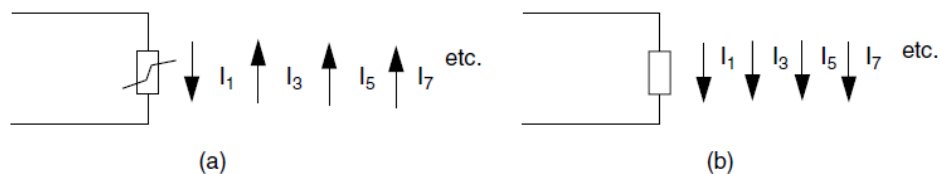
Ambas as cargas de energia e demanda são medidas utilizando instrumentos chamados medidores de watt-hora e demanda. Um medidor de demanda é geralmente integrado em um

medidor de watt-hora com um dispositivo de tempo para registrar o uso da potência de pico e retornar o ponteiro de demanda para zero no final de cada intervalo de temporização (geralmente 15 ou 30 minutos).

As correntes harmônicas de cargas não lineares podem afetar a precisão dos medidores de watt-hora e de demanda. Medidores tradicionais watt-hora são baseados no princípio do motor de indução. O elemento do rotor ou disco de rotação no interior do medidor gira a uma velocidade proporcional ao fluxo da potência. Este disco, por sua vez aciona uma série de engrenagens que movem os mostradores em um registrador.

Medidores watt-hora convencionais com disco magnético, tendem a ter um erro negativo nas frequências harmônicas. Ou seja, eles têm um registro baixo para a potência nas frequências harmônicas, se estiverem devidamente calibrados para a frequência fundamental. Este erro aumenta com o aumento da frequência. Em geral, as cargas não lineares tendem a injetar energia harmônica de volta para o sistema de abastecimento e as cargas lineares absorvem a energia harmônica devido à distorção na tensão. Isto está representado na Figura 22, evidenciando as direções das correntes.

Figura 22 – Direção nominal de corrente harmônica em (a) carga não linear e (b) carga linear (com tensão distorcida).



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Assim, para a carga linear da Figura 22, o aparelho pode ler:

$$P_{medido} = P_1 - a_3P_3 - a_5P_5 - a_7P_7 - \dots \quad (25)$$

Onde a_3 , a_5 e a_7 são fatores multiplicativos (menores que a unidade), que representam a imprecisão do medidor na respectiva frequência harmônica.

A potência medida é um pouco maior do que a utilizada na carga, porque o medidor não subtrai completamente os valores das potências harmônicas. No entanto, tais potências simplesmente vão alimentar as perdas na linha e nos transformadores. Certos profissionais argumentam que os valores harmônicos sequer deveriam ser subtraídos. Isto é, o cliente que

estiver injetando as correntes harmônicas deve pagar um adicional pelo o aumento das perdas no sistema de fornecimento de energia.

No caso da carga linear, a energia é medida:

$$P_{medido} = P_1 + a_3P_3 + a_5P_5 + a_7P_7 + \dots \quad (26)$$

A carga linear absorve a energia adicional, mas o medidor não registra a mesma energia que é consumida. A questão é: Será que o cliente realmente quer a energia extra? Se a carga é composta de motores, a resposta é não, porque a energia extra resultaria em perdas induzidas nos motores, devido à distorção harmônica. Se a carga for resistiva, normalmente será consumida de forma efetiva.

Felizmente, na maioria dos casos práticos, em que a distorção de tensão está dentro dos limites recomendados no fornecimento de energia elétrica, o erro é muito pequeno (menos de 1%). Os medidores eletrônicos em uso hoje em dia são baseados em divisão de tempo e amostragem digital. Estes medidores eletrônicos são muito mais precisos do que o medidor watt-hora convencional baseado no princípio do motor de indução. Embora estes medidores watt-hora eletrônicos sejam capazes de medir componentes harmônicas, também podem ser configurados para medirem apenas a potência fundamental. O usuário deve ter o cuidado de verificar se os medidores estão medindo a quantidade desejada.

Os maiores erros ocorrem quando se realiza a medição de demanda. O erro de medição vem do ato de ignorar a porção da potência aparente que é gerada exclusivamente pela distorção harmônica. Alguns sistemas de medição fazem a medição da potência ativa (P) e da potência reativa (Q) de forma precisa, mas basicamente ignoram D. Se Q for determinada por um segundo medidor de watt-hora, alimentado por uma tensão com fase deslocada em relação ao medidor de energia, o termo D não é contabilizado, apenas o termo Q da fundamental será.

A pior situação ocorre quando a corrente total no local de medição é muito distorcida. A demanda aparente total medida pode ter um erro de 10 a 15%.

Felizmente, no ponto de medição para a carga total do estabelecimento, a distorção de corrente não é tão distorcida quanto é nos pontos de carga individuais. Por este fato, o erro de medição é frequentemente pequeno. Há, no entanto, algumas exceções a esta, como estações de bombeamento, onde um módulo de PWM é a única carga no medidor. Enquanto o medidor de energia é suficientemente preciso, uma vez que a tensão tem baixa distorção, a medição de demanda pode ter erro considerável.

2.7.6 Impacto em Equipamentos Eletrônicos

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza o cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma ação, distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar seu funcionamento. Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com o aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

2.7.7 Impacto em Relés de Proteção e Fusíveis

Um aumento da corrente eficaz devido a harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Em termos dos relés de proteção não é possível definir completamente as respostas devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes. O desempenho de um relé considerando uma faixa de frequências de entrada não é uma indicação de como este componente responderá a uma onda distorcida, se tornando imprevisível.

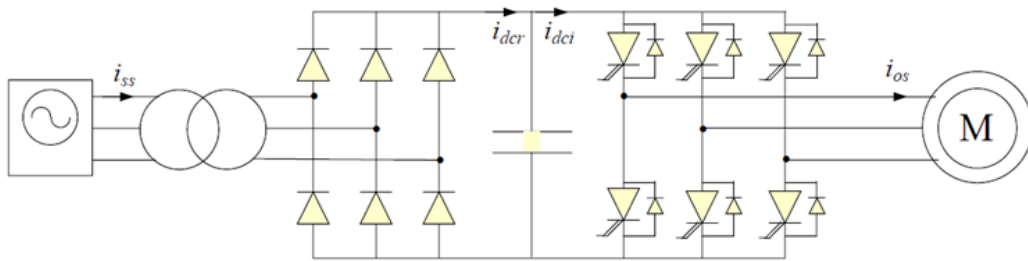
2.8 INTER-HARMÔNICOS

A presença de harmônicas não múltiplas da fundamental pode ter diferentes causas, algumas já citadas, como o comportamento complexo de uma carga como um forno a arco.

Outras razões são devidas à interação entre conversores eletrônicos que operam com frequências diferentes, como é o caso de uma conversão de 50 para 60 Hz, ou ainda um sistema como o mostrado na Figura 23, na qual um retificador alimentado em 60 Hz serve de estágio de entrada para um inversor que opera em frequência variável (por exemplo 50 Hz.).

A depender do comportamento do barramento CC, os efeitos da corrente da carga (motor) se refletirão na rede CA, produzindo componentes espectrais decorrentes da interação entre as frequências envolvidas.

Figura 23 – Sistema de dupla conversão com frequências distintas de entrada e saída

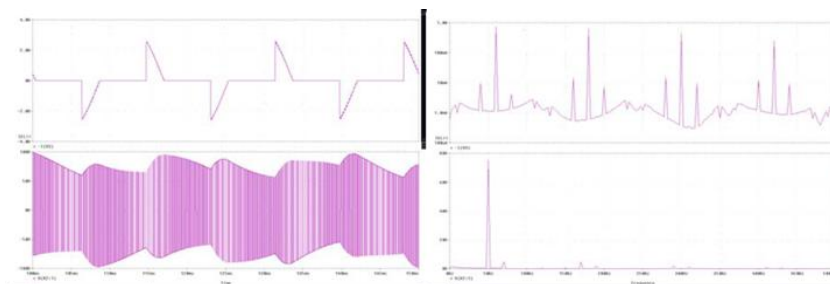


Fonte: Adaptado de (Pomilio, 2006)

A Figura 24 mostra formas de onda e espectro de um sistema composto por um retificador monofásico e um inversor, também monofásico. O primeiro é alimentado por uma fonte de 60 Hz, enquanto o segundo tem uma saída PWM com comutação em 5 kHz, seguindo uma referência senoidal de 50 Hz. A corrente na rede apresenta-se, vista no tempo, com sua forma característica, em 60Hz. A ondulação na saída do inversor se deve ao *ripple* do capacitor do barramento CC e tem uma frequência típica de 120Hz.

No entanto, quando se analisa o espectro de ambos os sinais são evidentes as componentes não características, produzidas pela interação entre as diferentes frequências presentes no sistema. Os valores são tipicamente muito baixos (abaixo de 1%), mas podem trazer problemas para a operação de alguns sistemas, excitando, por exemplo, filtros passivos dessintonizados.

Figura 24 – Forma de onda e espectro em sistema monofásico com dupla conversão (60/50 Hz). Acima: corrente na rede. Abaixo: Saída do inversor PWM



Fonte: Adaptado de (Pomilio, 2006)

3 METODOLOGIA

3.1 NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Faz-se aqui uma breve apresentação dos aspectos relacionados aos limites de harmônicas de tensão e de corrente estabelecidos por diferentes normas e recomendações.

No Brasil, a única norma vigente em controle harmônico é o módulo 8 do PRODIST.

3.1.1 Norma IEC 61000-3-2: Limites para emissão de harmônicas de corrente (<16 A por fase)

Esta norma europeia, e suas alterações feitas pela emenda 14, de janeiro de 2001, referem-se às limitações das harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação. Aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, conectado a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V. Para tensões inferiores, os limites não foram estabelecidos, pois esta norma tem aplicação principalmente na comunidade europeia, onde as tensões fase-neutro encontram-se nesta faixa específica (Pomilio, 2006).

Os equipamentos são classificados em 4 classes:

Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada; aparelhos de uso doméstico, excluindo os aparelhos de classe D; ferramentas, exceto as portáteis; “*dimmers*” para lâmpadas incandescentes; equipamentos de áudio e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.

Classe B: Ferramentas portáteis.

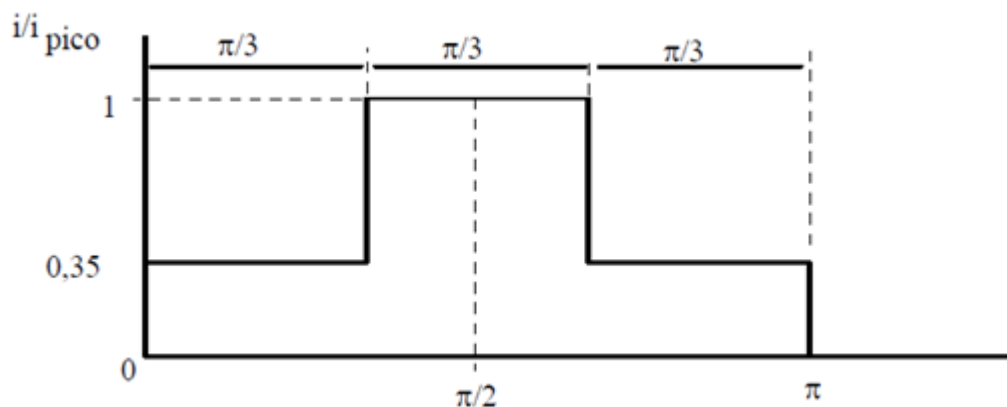
Classe C: Dispositivos de iluminação.

Classe D: Computadores pessoais, monitores de vídeo e aparelhos de televisão. A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, com esta medida realizada se obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento).

Antes da emenda 14, a definição de classe D era feita a partir de um envelope dentro do qual estaria a corrente de entrada, atingindo qualquer equipamento monofásico, como mostra a Figura 25.

Tal definição mostrou-se inadequada devido ao fato de que os problemas mais relevantes referem-se aos equipamentos agora incluídos na classe D e na classe C (reatores eletrônicos), permitindo retirar dos demais aparelhos estas restrições.

Figura 25 – Envelope da corrente de entrada que definia um equipamento como classe D (Anteriormente a emenda 14)



Fonte: Adaptado de (Pomilio, 2006)

A inclusão apenas destes aparelhos como classe D deve-se ao fato de seu uso se dar em larga escala e ser difundido por todo sistema. Outros equipamentos poderão ser incluídos nesta categoria caso passem a apresentar tais características.

Os valores de cada harmônica são obtidos após a passagem do sinal por um filtro passa-baixas de primeira ordem com constante de tempo de 1,5s. Aplica-se a transformada discreta de Fourier (DFT), com uma janela de medição entre 4 e 30 ciclos da fundamental, com um número inteiro de ciclos. Calcula-se a média aritmética dos valores da DFT durante todo período de observação. Este período varia de acordo com o tipo de equipamento, tendo como regra geral um valor que permita a repetibilidade dos resultados (Pomilio, 2006).

A medição da potência ativa é feita de maneira análoga, devendo-se, no entanto, tomar o máximo valor que ocorrer dentro do período de observação. Este é o valor que um fabricante deve indicar em seu produto (com uma tolerância de +/- 10%), conjuntamente como fator de potência (para classe C). Caso o valor medido seja superior ao indicado, deve-se usar o valor medido.

Para cada harmônica medida da forma descrita, o valor deve ser inferior a 150% do limite da Tabela 2, em qualquer situação de operação do aparelho.

As correntes harmônicas com valor inferior a 0,6% da corrente de entrada (medida dentro das condições de ensaio), ou inferiores a 5mA não são consideradas.

Foi definida a corrente harmônica parcial de ordem ímpar, para componentes entre a 21ª e a 39ª como sendo:

$$I_{21-39} = \sqrt{\sum_{n=21,23\dots}^{39} I^2 n} \quad (27)$$

Para a componente de ordem 21 ou superior (ímpar), o valor individual para cada uma delas, pode exceder o limite em mais 50% desde que a corrente harmônica parcial de ordem ímpar medida não exceda o valor teórico (obtido com os valores da tabela), nem excedam o limite individual de 150% do valor da tabela.

A Tabela 2 indica os valores máximos para os harmônicos de corrente, nos condutores de fase (não no de neutro).

Os valores limites para a classe B são os mesmos da classe A, acrescidos de 50%.

Tabela 2 –Limites para os harmônicos de corrente, segundo IEC 61000-3-2

Ordem do Harmônico n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente[A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>75W, <600W) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,30	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
15 ≤ n ≤ 39	0,15 · $\frac{15}{n}$	0,225 · $\frac{15}{n}$	3	3,85/n
Harmônicos Pares				
2	1,08	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		
8 ≤ n ≤ 40	0,23 · $\frac{8}{n}$	0,35 · $\frac{8}{n}$		

Fonte: Adaptado de (Pomilio, 2006)

3.1.2 Recomendação IEEE para Práticas e Requisitos para Controle de Harmônicas no Sistema Elétrico de Potência: IEEE-519 (2004)

Esta recomendação (não é formalmente uma norma) produzida pelo IEEE descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Seu enfoque é diverso daquele da IEC, uma vez que os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), e não em cada equipamento individual. A filosofia é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Devido à extensão desses assuntos, serão apresentados aqui apenas alguns pontos principais, como limites de correntes harmônicas para o consumidor, limites de tensões harmônicas globais para o sistema (concessionárias), limites para *notching* e interferência telefônica.

a) Distorção Harmônica

É especificado que as medições harmônicas devem ser tomadas em um intervalo de 10 minutos, baseados na agregação de 200 valores consecutivos para cada componente específico da frequência. Estes 200 valores são agregados baseados no cálculo rms como mostrado:

$$F_{n,sh} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F^2_{(n,vs),i}} \quad (28)$$

Onde F representa a tensão V ou corrente I em rms, n representa a ordem harmônica. O subscrito *sh* refere-se a curto (short).

Esta recomendação possui tabelas limites distintas para sistemas de 1 kV a 69 kV, 69 até 161 kV e acima de 161 kV. Os limites de distorção diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC.

Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito (I_{cc}) em relação à corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

A grandeza DDT (distorção de demanda total) é definida como a distorção harmônica da corrente, em % da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 minutos). Isto significa que a medição da DDT deve ser feita no pico de consumo.

Harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores ímpares da tabela. Distorções de corrente que resultem em nível CC não são admissíveis.

Podem-se observar os limites recomendados nas Tabelas 3 e 4:

Tabela 3 – Limites de distorção de tensão

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV $< V \leq 161$ kV	1.5	2.5
161 kV $< V$	1.0	1.5 ^a

Fonte: IEEE 519 (2004)

Tabela 4 – Limites de distorção de corrente

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, 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 (2004)

Onde:

- I_{SC} é a corrente de curto-circuito no PAC.
- I_L é a componente fundamental da corrente de carga de demanda máxima no PAC. Ela pode ser calculada como a média das correntes máximas mensais de demanda para os 12 meses anteriores, ou então ser estimada.
- A distorção de demanda total (DDT) é expressa em termos da corrente de carga máxima, isto é:

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_2 I_l^2 \times 100\%}}{I_L} \quad (29)$$

No cálculo da corrente de curto-circuito no PAC, as condições normais do sistema que resultam na capacidade de curto-circuito mínima no PAC deveriam ser utilizadas, uma vez que estas condições resultam em impactos do sistema mais graves. Um procedimento para determinar a relação de curto-circuito é como se segue:

1. determinar o valor de curto-circuito trifásico “ I_{SC} ” no PAC. Este valor pode ser obtido diretamente da concessionária e é expresso em amperes. Se o valor de curto-circuito é dado em MVA, é necessário convertê-lo para um valor de corrente utilizando a seguinte expressão:

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3}kV} \text{ A} \quad (30)$$

Onde o MVA e kV representam a capacidade de curto-circuito trifásico em MVA e a tensão linha-linha no PAC em kV, respectivamente.

2. encontrar a demanda de carga média em kW “Pd” dos 12 meses mais recentes. Esta informação pode ser encontrada na fatura de energia;

3. converter a demanda média em kW para a corrente média de demanda em amperes, usando a seguinte expressão:

$$I_L = \frac{kW}{FP \cdot \sqrt{3}kV} \text{ A} \quad (31)$$

Onde FP é o fator de potência médio na fatura.

4. a relação de curto circuito agora é determinada por:

$$Rel \text{ Curto Circuito} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (32)$$

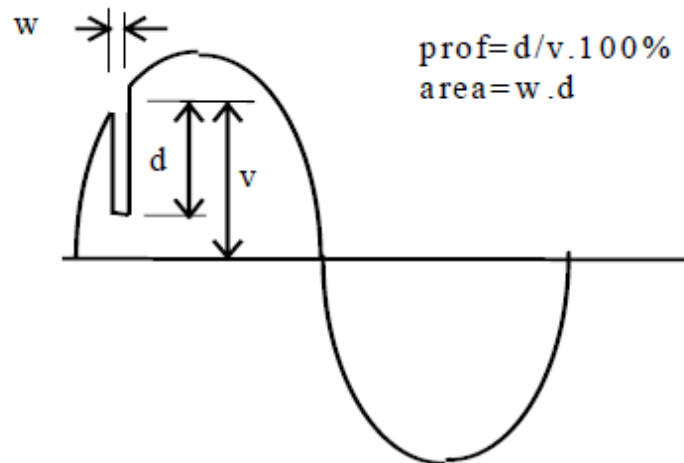
Esta é a relação curto-circuito utilizada para determinar os limites de correntes harmônicas no Padrão IEEE 519 (2004).

Em alguns casos, a média da máxima corrente de demanda da carga no PAC nos últimos 12 meses, não está disponível. Em tais circunstâncias, esse valor deve ser estimado com base nos perfis de carga previstos.

b) Recortes (*Notching*)

A norma também dá atenção às discontinuidades causadas pela comutação de chaveletrônicas (*notching*), que é uma espécie de distorção muito frequente provocada pelos conversores eletrônicos usados para o acionamento de motores.

Figura 26 – *Notching* característico de comutação



Fonte: IEEE 519 (2004)

Tabela 5–Limites para *notching* oriundo de comutação

	Special applications ^a	General system	Dedicated system ^b
Notch depth	10%	20%	50%
Notch area (A_N) ^{c, d}	16400	22800	36500

Fonte: IEEE 519 (2004)

c) Interferência Telefônica

A Norma 519 estabelece também valores de ponderação na faixa de interferência telefônica (de 60 Hz a 5 kHz), de acordo com a curva mostrada na Figura 4.56. A ponderação (W_f) inclui efeitos relativos de interferência das várias frequências na banda de voz, as características de resposta do aparelho telefônico e do ouvido humano. O fator *TIF* ("Telephon Interference Factor") é uma grandeza adimensional, que expressa características associadas a formas de onda e não à amplitude do sinal, de acordo com a expressão:

$$TIF = \sqrt{\sum \left(\frac{X_f \cdot W_f}{X_t} \right)^2} \quad (33)$$

onde:

X_t = valor RMS total da tensão ou corrente;

X_f = valor RMS da tensão ou corrente na frequência f ;

W_f = valor da ponderação para frequência f .

Na prática a interferência é expressa pelo produto da corrente (ou tensão em kV) pelo fator TIF. O resultado é designado por interferência telefônica da corrente (I.T) ou da tensão (kV.T).

3.1.3 PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

No módulo 8 do PRODIST definem-se os fenômenos, caracterizam-se os parâmetros, estabelecem-se as amostras e o modo de medir, o processo e periodicidade de coleta de dados e envio à ANEEL das informações relativas à qualidade da energia e de seu fornecimento.

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.

Em relação à distorção harmônica, os valores de referência estão indicados na Tabela 6.

Estes valores servem para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, serão estabelecidos em resolução específica, após período experimental de coleta de dados. Devem ser obedecidos também os valores das distorções harmônicas individuais, indicados na Tabela 7.

Tabela 6 - Terminologia aplicável ao fenômeno de distorção harmônica segundo Prodist

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	$H_{máx}$
Ordem harmônica mínima	H_{min}
Tensão fundamental medida	V_1

Fonte: Prodist (Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica)

Tabela 7 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Prodlist (Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica)

3.2 AVALIANDO A DISTORÇÃO HARMÔNICA

Nesta seção será definido o método mais adequado para analisar os níveis harmônicos do sistema de potência de uma instalação comercial. Basicamente trata-se de uma síntese do que é definido pelo IEEE 519 e PRODIST, trabalhos anteriores na área de distorção harmônica em prédios comerciais (Aintablian, 1993,) e recomendações contidas em (Dugan, 2004).

Como discutido no Capítulo 2, correntes harmônicas produzidas por cargas não-lineares podem interagir negativamente com o sistema de alimentação elétrico. A interação muitas vezes dá origem à distorção harmônica de tensão e corrente observada em muitos lugares no sistema. Para limitar essa distorção, o padrão IEEE 519 (2004) propõe medidas para limitar a injeção de corrente harmônica nos usuários finais, para que os níveis de harmônicas de tensão no sistema de energia global sejam aceitáveis se o sistema de energia não acentuar excessivamente as correntes harmônicas. Essa abordagem requer a participação de consumidores e concessionárias de energia.

1. Consumidores. Para os usuários finais individuais, o padrão IEEE 519 (2004) limita o nível de injeção de corrente harmônica no ponto de acoplamento comum (PAC). Esta é a

grandeza onde os usuários finais têm controle. Limites recomendados são fornecidos para cada componente harmônica individualmente, e para a distorção de demanda total. O conceito de PAC está ilustrado na Figura 27. Estes limites são expressos em termos de porcentagem do nível de corrente de demanda máximo do usuário final, e não como uma porcentagem da fundamental. É realizado desta forma para fornecer uma base comum para a avaliação ao longo do tempo.

2. Concessionária. Dado que a distorção harmônica de tensão, no sistema da concessionária, surge da interação entre correntes de carga distorcidas e a impedância do sistema da concessionária, ela é a principal responsável para limitar a distorção da tensão no PAC. Os limites máximos são dados para os componentes harmônicos individuais e para a distorção harmônica total (DHT). Estes valores são expressos como a porcentagem da tensão fundamental. Para os sistemas abaixo de 69 kV, a DHT deve ser inferior a 5%. Às vezes, a impedância do sistema da concessionária para as frequências harmônicas é determinada pela ressonância dos bancos de capacitores de correção de fator de potência (Dugan, 2004). Isso resulta em uma impedância muito elevada e altas tensões harmônicas. Portanto, o cumprimento com a Norma IEEE 519 (2004), muitas vezes significa que a concessionária deve assegurar que as ressonâncias do sistema não coincidem com as frequências harmônicas presentes nas correntes de carga.

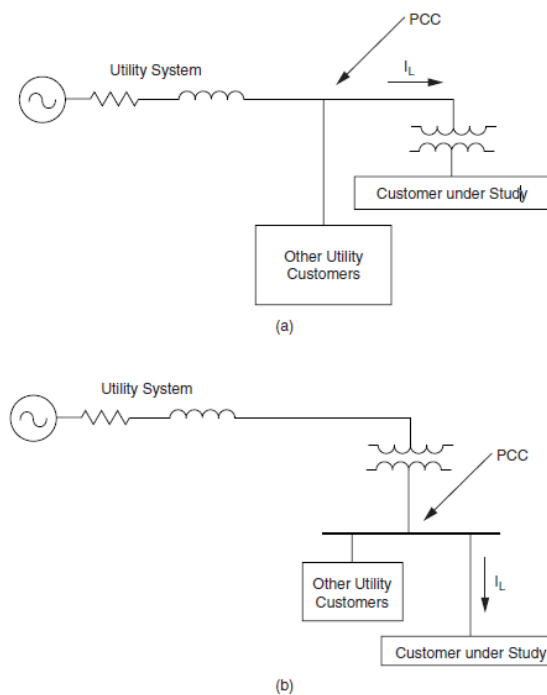
Assim, os usuários finais e a concessionária partilham a responsabilidade de limitar as injeções de correntes harmônicas e a distorção de tensão no PAC. Uma vez que existem duas partes envolvidas em limitar as distorções harmônicas, a avaliação da distorção também se divide em duas partes: medições das correntes que são injetadas pela carga e os cálculos da resposta da impedância do sistema. Medições devem ser tomadas continuamente durante um período de tempo suficiente para que as variações de tempo e características estatísticas da distorção harmônica possam ser representadas com precisão. Medições esporádicas devem ser evitadas, uma vez que não representam características harmônicas dadas com precisão, uma vez que a distorção harmônica é um fenômeno contínuo. O período de medição recomendado pela IEEE 519 (2004) é de uma semana, uma vez que isto proporciona um ciclo de carga representativo para a maioria das cargas industriais e comerciais.

3.2.1 Conceito de Ponto de Acoplamento Comum (PAC)

As avaliações de distorção harmônica preferencialmente devem ser realizadas em um ponto entre o usuário final e o sistema da concessionária, onde outro cliente pode ser atendido. Este ponto é conhecido como o ponto de acoplamento comum.

O PAC pode ser localizado em ambos os lados, primário ou secundário do transformador, dependendo ou não se múltiplos clientes são abastecidos a partir do transformador. Em outras palavras, se múltiplos clientes são servidos a partir do primário do transformador, o PAC então se localizada no primário. Por outro lado, se múltiplos clientes são servidos a partir do secundário do transformador, o PAC está localizado no secundário. A Figura 27 ilustra essas duas possibilidades.

Figura 27 – Local do PAC, dependendo onde os clientes recebem o fornecimento
a) PAC no primário do transformador b) PAC no secundário do transformador



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Note que, quando o primário do transformador é o PAC, as medições de corrente para verificação pode ser ainda realizadas no secundário do transformador. Os resultados de medição devem ser referidos ao lado de alta tensão do transformador, pela relação de espiras do transformador, e o efeito da ligação do transformador sobre os componentes de sequência zero devem ser considerados. Por exemplo, um transformador com ligação delta-estrela não irá permitir que os componentes de corrente de sequência zero fluam a partir do secundário

para o sistema primário. Estes componentes no secundário são “filtrados” no delta do enrolamento primário. Portanto, componentes de sequência-zero (componentes harmônicas múltiplas de 3) medidos no lado secundário não devem ser incluídos na avaliação de um PAC no lado primário.

3.2.2 Métodos Para Avaliação Harmônica no Sistema de Potência

3.2.2.1 Avaliações Harmônicas No Sistema Da Concessionária

Avaliações harmônicas no sistema da concessionária envolvem procedimentos para determinar a aceitabilidade da distorção da tensão para todos os clientes.

Se a distorção de tensão exceder os limites recomendados, deverão ser tomadas ações corretivas, para reduzir a distorção a um nível dentro dos limites.

O Padrão IEEE 519 (2004) também fornece diretrizes para níveis aceitáveis de distorção no sistema da concessionária. Como este projeto de diplomação tem foco em uma análise de instalação de usuário final, não entrará em detalhes em relação aos métodos utilizados em sistemas de distribuição pela concessionária.

3.2.2.2 Avaliações harmônicas em Instalações de Usuário Final

Problemas harmônicos são mais comuns nas instalações do usuário final que no sistema de alimentação elétrica, pelo fato da maioria das cargas não-lineares estarem dentro das instalações do usuário final, e os mais altos níveis de distorção de tensão ocorrerem próximos de fontes harmônicas (Aintablian, 1993). Os problemas mais significantes ocorrem quando existem cargas não-lineares, e capacitores para correção de fator de potência, que resultam em condições de ressonância.

O Padrão IEEE 519 (2004) estabelece limites de distorção harmônica no PAC. Os limites, foram mostrados e resumidos na Tabela 4, e são dependentes da carga do consumidor em relação à capacidade de curto-circuito do sistema no PAC.

3.2.2.3 Procedimento De Avaliação Do Limite De Corrente.

Este procedimento envolve a avaliação de características de geração de harmônicas em cargas de usuários finais individuais, com respeito aos limites do IEEE 519 (2004). No entanto, uma atenção especial é necessária quando se considera equipamentos de correção de fator de potência:

1. definir o PAC. Para os usuários finais industriais e comerciais, o PAC é geralmente no lado primário de um transformador de serviços, alimentando a instalação;
2. calcular a relação de curto-circuito no PAC e encontrar os limites correspondentes para harmônicos individuais e na DDT;
3. caracterizar as fontes harmônicas. Cargas não lineares individuais na instalação se combinam para formar o nível global de geração de corrente harmônica.

A melhor maneira de caracterizar de corrente harmônica numa instalação existente é a realização de medições no PAC durante um período de tempo (uma semana no mínimo).

Para os estudos de planejamento, a corrente harmônica pode ser estimada conhecendo as características de cargas não-lineares individuais e a porcentagem da carga total constituída por essas cargas não-lineares. As características típicas de fontes harmônicas individuais foram apresentadas no Capítulo 2;

4. avaliar os níveis de corrente harmônica com respeito aos limites de corrente utilizando os limites definidos pelo IEEE 519 (2004). Se estes valores excederem os limites, a instalação não atende o limite recomendado pela norma e é recomendado realizar um trabalho para redução dos níveis harmônicos.

3.2.3 Princípios para Controlar os Harmônicos

A distorção harmônica está presente em praticamente todos os sistemas de energia, mesmo que em baixíssima quantidade. Geralmente, é necessário controlar harmônicos apenas quando eles se tornam um problema. Existem três causas mais comuns que geram problemas com harmônicas:

1. a fonte de correntes harmônicas é muito grande;
2. o caminho no qual as correntes fluem é muito longo (eletricamente), resultando em alta distorção de tensão ou interferência telefônica;
3. a resposta do sistema amplifica um ou mais harmônicos para um grau maior do que pode ser tolerado.

Quando ocorre um problema, as opções básicas para o controle de harmônicos são:

1. reduzir as correntes harmônicas produzidas pela carga;
2. adicionar filtros seja para desviar as correntes harmônicas para fora do sistema, bloquear as correntes de entrar no sistema, ou fornecer as correntes harmônicas necessárias para cancelamento localmente;
3. modificar a resposta em frequência do sistema por meio de filtros, indutores ou capacitores.

3.2.3.1 Reduzir As Correntes Harmônicas Nas Cargas

Geralmente pouco pode ser feito para que o equipamento na carga reduza a quantidade de corrente harmônica produzida, a menos que esteja sendo mal utilizado. Enquanto um transformador sobrecarregado pode ser trazido de volta ao funcionamento normal, diminuindo a tensão aplicada à faixa correta, dispositivos a arco e a maioria dos conversores eletrônicos de potência estão fixados em suas características projetadas.

Unidades PWM que carregam o capacitor do barramento CC diretamente da linha de alimentação, sem qualquer impedância intencional são uma exceção a isso. Adicionando um reator de linha ou transformador em série (como mostrado no Apêndice A) irá reduzir significativamente os harmônicos, bem como proporcionar benefícios de proteção contra transitórios.

Conexões do transformador podem ser empregadas para reduzir as correntes harmônicas, em sistemas trifásicos. Metade dos conversores de energia de 6 pulsos em uma carga de fábrica em 30 ° de mudança de fase pode aproximar os benefícios de 12- cargas de pulso, reduzindo drasticamente os quinto e sétimo harmônicos.

Transformadores com conexão delta podem bloquear o fluxo de harmônicos de sequência zero (tipicamente harmônicas ímpares múltiplas de 3) a partir da linha. Transformadores zigue-zague e aterramento de transformadores podem desviar as harmônicas ímpares múltiplas de 3 para fora da linha.

3.2.3.2 Filtragem

O filtro shunt funciona curto-circuitando as correntes harmônicas o mais próximo possível da fonte de distorção. Isso mantém as correntes fora do sistema de alimentação. Este é o

tipo mais comum de filtragem aplicada, por causa da economia e porque também tende a corrigir o fator de potência da carga, bem como remover a corrente harmônica.

Outra abordagem é a aplicação de um filtro em série que bloqueia as correntes harmônicas. Este é um circuito que oferece uma alta impedância para a corrente harmônica. Não é tão utilizado por questões de isolamento. Uma aplicação comum seria no neutro de um capacitor com aterramento estrela, para bloquear o fluxo de harmônicas ímpares múltiplas de 3, e ainda manter um bom aterramento para a frequência fundamental.

Os filtros ativos trabalham eletronicamente, fornecendo componentes harmônicas de corrente para uma carga não-linear. Modelos de filtro são abordados no Apêndice A.

3.2.3.3 Modificar a Resposta do Sistema

Existem alguns métodos para modificar respostas do sistema indesejáveis quanto a harmônicos:

1. adicionar um filtro de shunt. Este filtro além de desviar a corrente harmônica do sistema, também modifica completamente a resposta do sistema;
2. adicionar um reator para dessintonizar o sistema. Ressonâncias nocivas ocorrem, geralmente, entre a indutância do sistema e os capacitores de fator de potência em derivação. O reator deve ser adicionado entre o capacitor e a fonte de alimentação. Um método é simplesmente colocar um reator em série com o capacitor e deslocar a ressonância do sistema, ao invés de criar um filtro. Outro método é adicionar reatância da linha;
3. alterar o tamanho do capacitor. Isso é muitas vezes uma das opções mais baratas para concessionárias e clientes industriais;
4. mover um capacitor a um ponto no sistema com uma impedância de curto-circuito diferente ou com perdas mais elevadas. Esta é também uma opção para concessionárias, quando um novo banco faz interferência com sistema telefônico, move-se o banco para outro ramo do alimentador. Isto não é frequentemente uma opção para os usuários industriais, porque o capacitor não pode ser movido longe o suficiente para fazer diferença.

3.2.4 Procedimentos em Usuários Finais

Quando os problemas harmônicos surgem em uma instalação de usuário final, o primeiro passo é determinar se a causa principal é a ressonância com capacitores de fator de potência na instalação. Em caso positivo, a solução mais simples é usando um capacitor de ta-

manho diferente. Com os controladores de fator de potência automáticos, pode ser possível selecionar um esquema de controle que evita a configuração que causa problemas. Em outros casos podem existir tantos capacitores ao acaso com cargas de modo que se torna impossível evitar condições de ressonância. Devem-se utilizar filtros neste caso. A instalação de filtros em sistemas de baixa tensão para o usuário final é geralmente mais prática e econômico do que em sistemas de distribuição de serviços públicos.

Os critérios para a instalação de filtros são mais facilmente atendidos, e os equipamentos de filtragem são facilmente disponíveis no mercado.

Quando a magnitude das correntes harmônicas injetadas pelas cargas se torna excessiva, os usuários industriais também devem investigar meios de reduzir harmônicos usando diferentes conexões do transformador e amortecedores de linha. Em edifícios de escritórios, transformadores zigue-zague e filtros de harmônicas múltiplas de 3 podem reduzir o impacto das correntes harmônicas de sequência zero em condutores neutros.

4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, serão levantadas as características harmônicas do sistema de alimentação do Prédio-Sede da JFRS baseando-se na metodologia apresentada no Capítulo 3, realizando adaptações quando necessário.

4.1 LOCAL REALIZADO

Realizou-se o estudo de caso no prédio sede da Justiça Federal do Rio Grande do Sul (JRFS), situado na Rua Otávio Francisco Caruso da Rocha, 600, Praia de Belas, Porto Alegre. Este prédio construído em 1996 possui nove andares, como pode ser visto na Figura 28.

A instalação possui uma subestação de usuário final, que é alimentada pela CEEE com uma linha de 13,8 kV, e é composta por dois transformadores de 1000 kVA e dois transformadores de 750kVA, sendo que dois deles operam em paralelo e alimentam os elevadores e o ar condicionado, e os outros dois também estão em paralelo e operam as demais cargas (iluminação, computadores, servidores de rede, etc.), sendo estes últimos o objeto deste estudo.

Ao realizar uma visita à sala da subestação, realizou-se uma análise e foi constatado que seria impossível realizar uma medição de corrente no PAC, com o equipamento analisador disponível. Abrindo a parte traseira dos quadros de baixa tensão (QGBT) vistos na Figura 29 a, observou-se que cada fase vinda do transformador era composta por vários cabos condutores em paralelo, como pode se observar na Figura 29 b, ficando assim com um diâmetro maior que a dos alicates analisadores de corrente, impossibilitando que pudessem ser fixados.

Figura 28 – Prédio-Sede da JFRS.



Figura 29 – QGBT de baixa tensão da subestação do prédio.

a) Painéis frontais b) Condutores de um quadro aberto



a

b

Como alternativa, optou-se por instalar o instrumento analisador em um quadro do terceiro andar e considerá-lo o PAC, devido a este andar possuir a maior carga produtora de distorção harmônica em teoria (um grande número de computadores, diversos escritórios, alguns servidores de rede e o setor de telefonia).

4.2 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

No QGBT do terceiro andar foi usado um analisador de qualidade de energia da marca IMS, modelo PowerNET P-600, configurado de acordo com o PRODIST e seguindo as recomendações do IEEE 519 (2004), definido para analisar harmônicos, ou seja, aquisições integralizadas de 10 minutos, obtidas de 200 valores agregados. O PRODIST recomenda monitorar até a 25ª harmônica. Neste caso, o instrumento foi capaz de capturar até a 42ª, tanto para tensão como para corrente. O analisador pode ser visto na Figura 30.

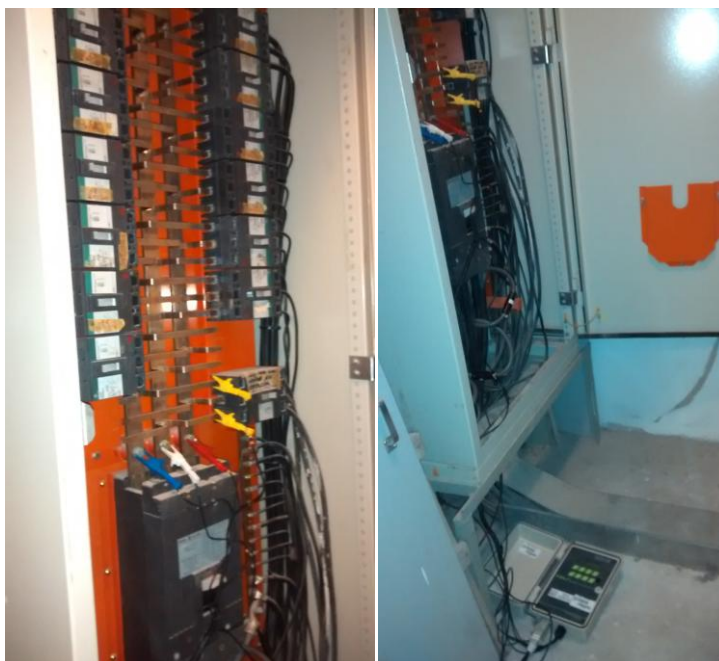
Figura 30 – Analisador IMS P-600



4.3 PROCEDIMENTO ADOTADO

O equipamento foi instalado no modo a 4 fios, como pode ser visto no esquemático da Figura 32. O instrumento pode ser visto conectado no quadro nas Figuras 31a e b.

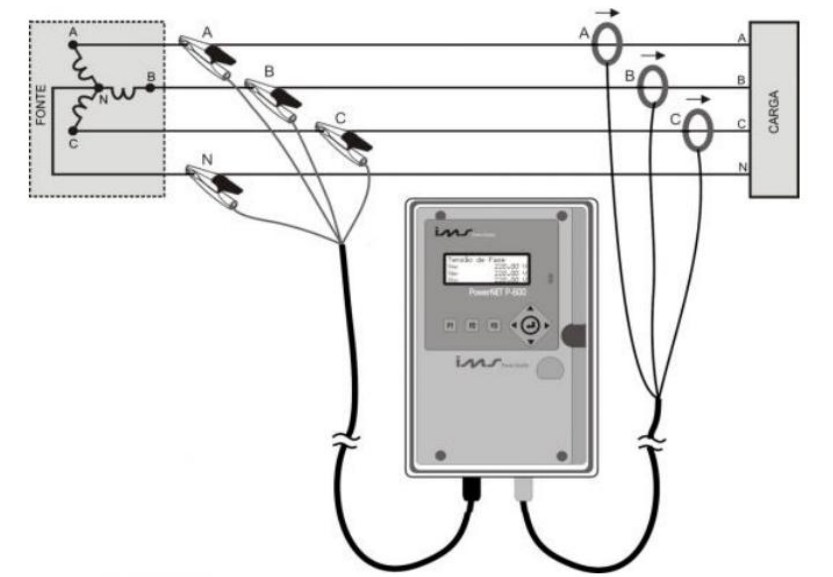
Figura 31 – a) Quadro de distribuição do terceiro andar b) Ligação do analisador no quadro



a

b

Figura 32 – Modo de ligação a 4 fios



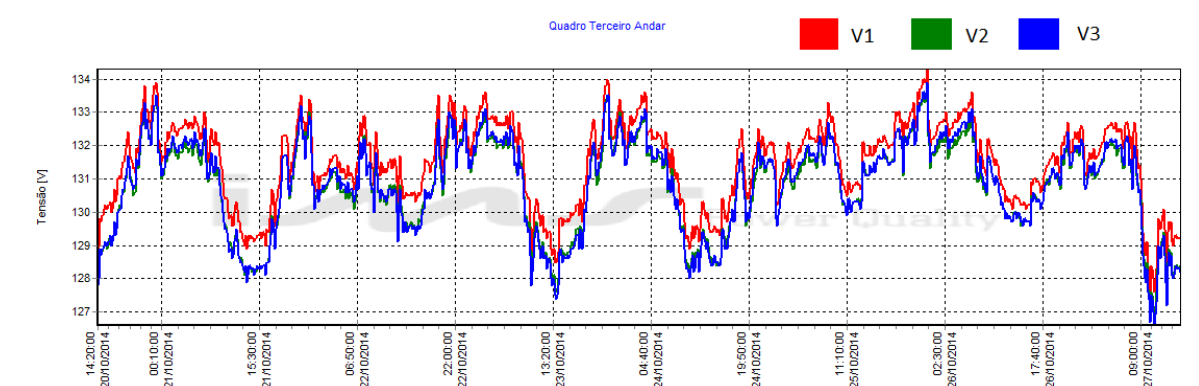
Fonte: Manual do Instrumento

O instrumento adquiriu dados durante uma semana, no período de 20/10/2014 a 27/10/2014, conforme recomendado pelo IEEE 519 (2004).

4.4 RESULTADOS

Primeiramente observam-se os níveis de tensão fornecidos no quadro durante uma semana. Eles possuem uma variação de 126,8V a 134,2V neste período mensurado, tendo uma média de 131,4V para a Fase 1, e 130,8V para as Fases 2 e 3, como é mostrado na Figura 33.

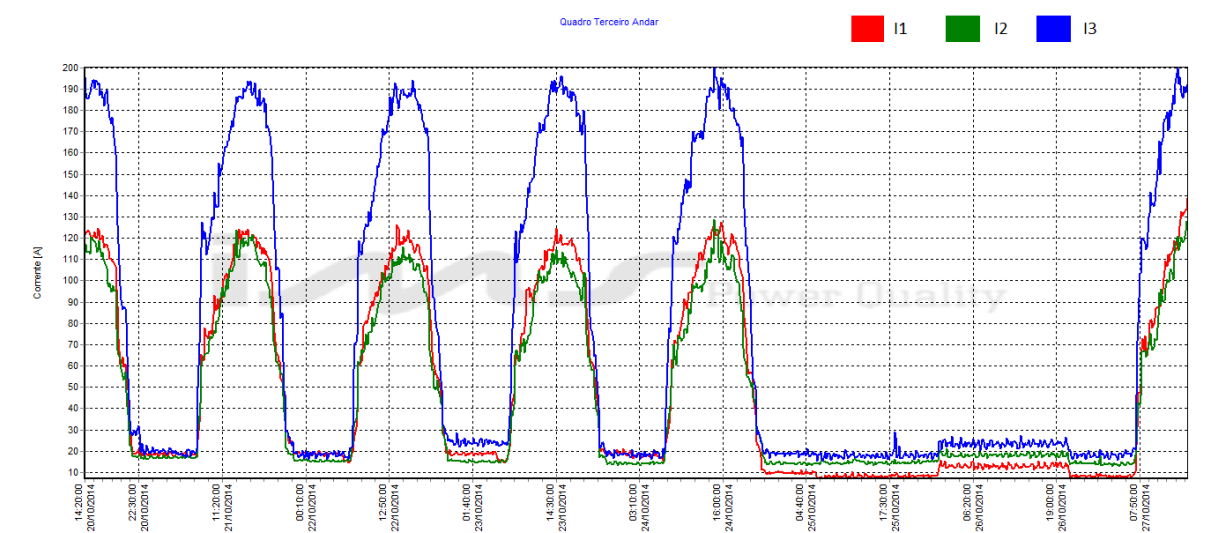
Figura 33 – Níveis de tensão no QGBT



Em relação à corrente analisada no QGBT, que pode ser vista na Figura 34, encontra-se o comportamento típico de horário comercial: altas correntes devido a diversas cargas em

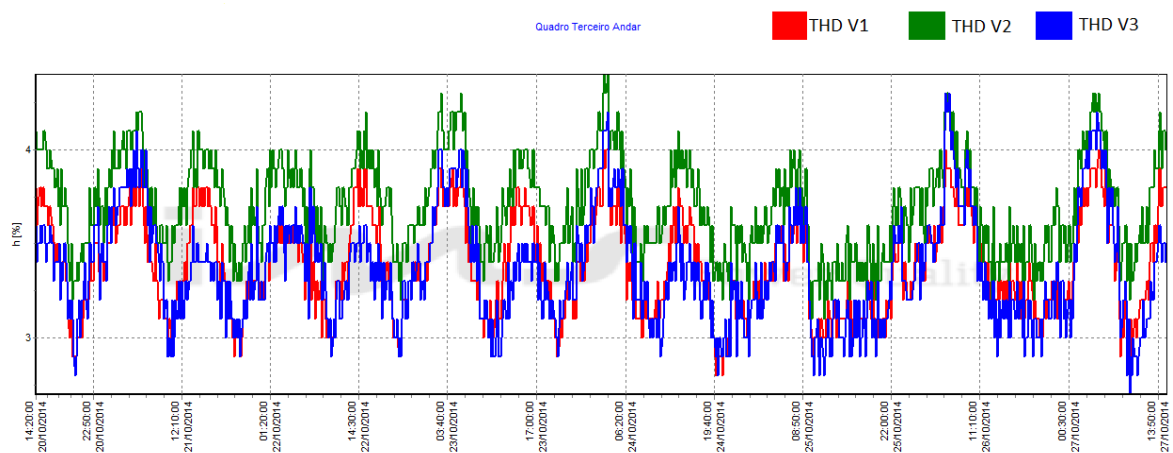
operação, no horário das 9:00 às 19:00 horas, tendo baixa corrente durante a noite e demais períodos, onde praticamente a iluminação é a única carga. Nota-se uma descontinuidade no padrão, nos dias 24/10 e 25/10, que abrangiam o final de semana. Também nota-se que existe um desequilíbrio, com a corrente da Fase 3 sendo até 60% maior que as Fases 1 e 2, chegando a picos de 200 amperes.

Figura 34 – Níveis de corrente no QGBT



Examinando a DHT de tensão, nota-se que o maior pico de curta duração foi na Fase 2, chegando a 4,4%. Segundo as recomendações IEEE 519-2004, distorções de até 8% são toleráveis para BT.

Figura 35 – Níveis de DHT de tensão no QGBT



O PRODIST regulamenta níveis máximos permitidos para conteúdo harmônico para cada componente individualmente. Analisando os gráficos dos Níveis de DHT de tensão para cada fase no QGBT nas Figuras 36, 37 e 38:

Figura 36 – Níveis de distorção harmônica de tensão na Fase 1

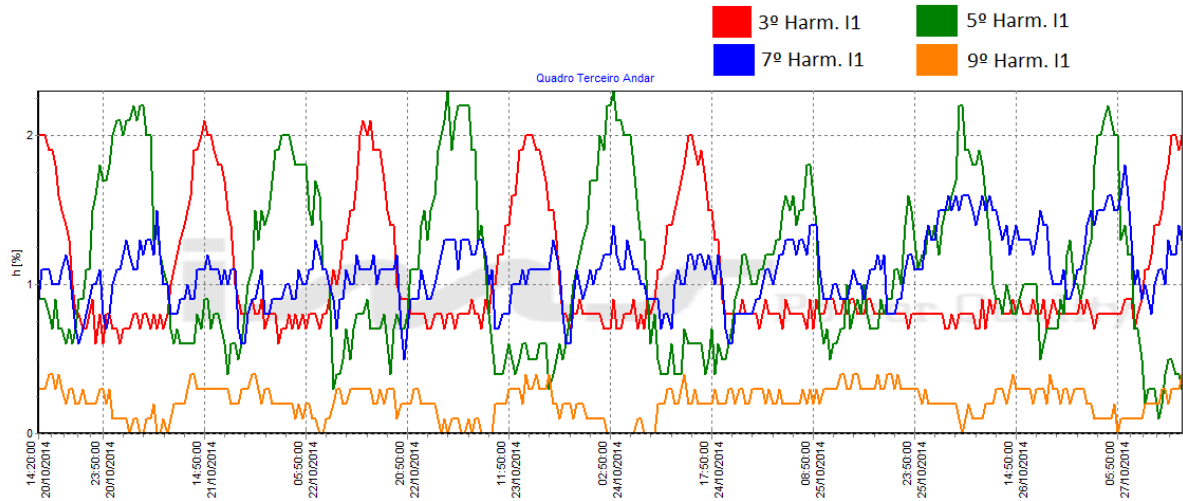


Figura 37 – Níveis de distorção harmônica de tensão na Fase 2

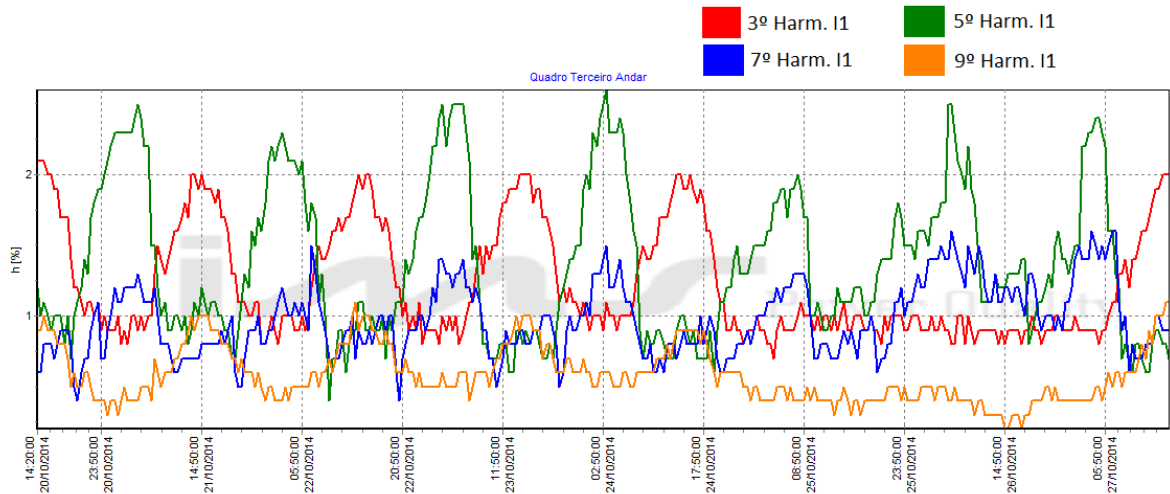
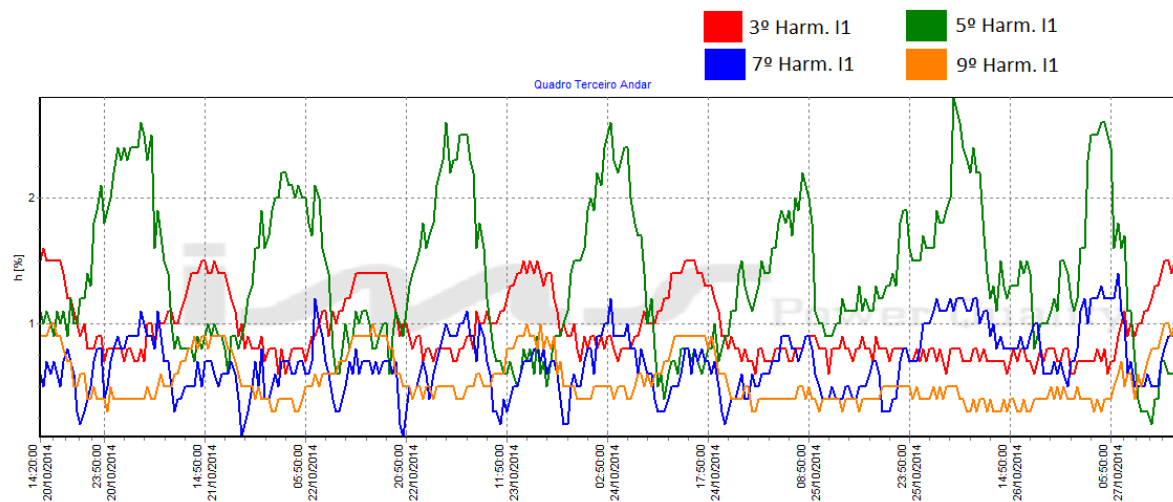


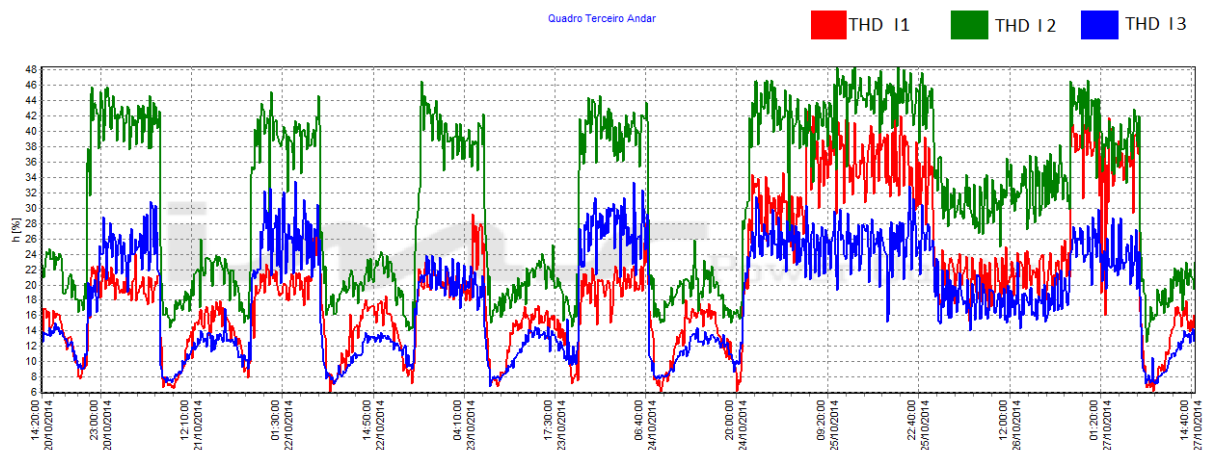
Figura 38 – Níveis de distorção harmônica de tensão na Fase 3



Neste caso nota-se que o maior nível de DHT na tensão foi de 2,5% na quinta harmônica da Fase 3. Todas as harmônicas maiores que a quinta tiveram valores inferiores a 1,5%. O PRODIST classifica os limites de 7,5% para terceira harmônica, e 6,5% para quinta harmônica neste tipo de instalação (<1kV). A distorção de tensão está, portanto, dentro dos limites estabelecidos.

Por sua vez, a DHT das correntes chegou a 48% na fase 2. Neste caso, as maiores DHT ocorrem em horários fora do comercial, o motivo disto será discutido no Capítulo 5.3. Os níveis de DHT de corrente são vistos na Figura 39:

Figura 39 – Níveis de distorção harmônica de corrente no QGBT



Embora o PRODIST ainda não especifique nenhum limite para a distorção harmônica de corrente, as recomendações IEEE 519 (2004) determinam o limite, que pode ser visto na Tabela 4 do Capítulo 3.

Além do limite estabelecido para distorção harmônica de corrente, as distorções são comparadas individualmente para cada componente harmônico. Como o cálculo de DHT segundo o IEE 519 (2004) exige até a 50ª harmônica e o analisador adquiriu apenas até a 42ª, foi então analisado o conteúdo harmônico de cada fase individualmente. Na Figura 40, Figura 41 e Figura 42 é possível ver o comportamento para os 3º, 5º, 7º e 9º harmônicos em cada fase:

Figura 40 – Níveis de distorção harmônica de corrente na Fase 1 do QGBT

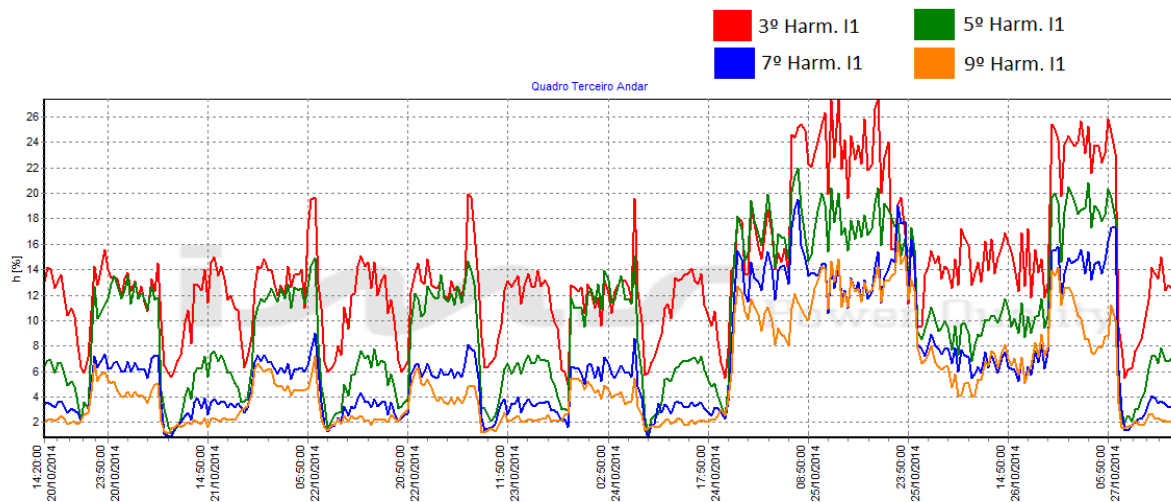


Figura 41 – Níveis de distorção harmônica de corrente na Fase 2 do QGBT

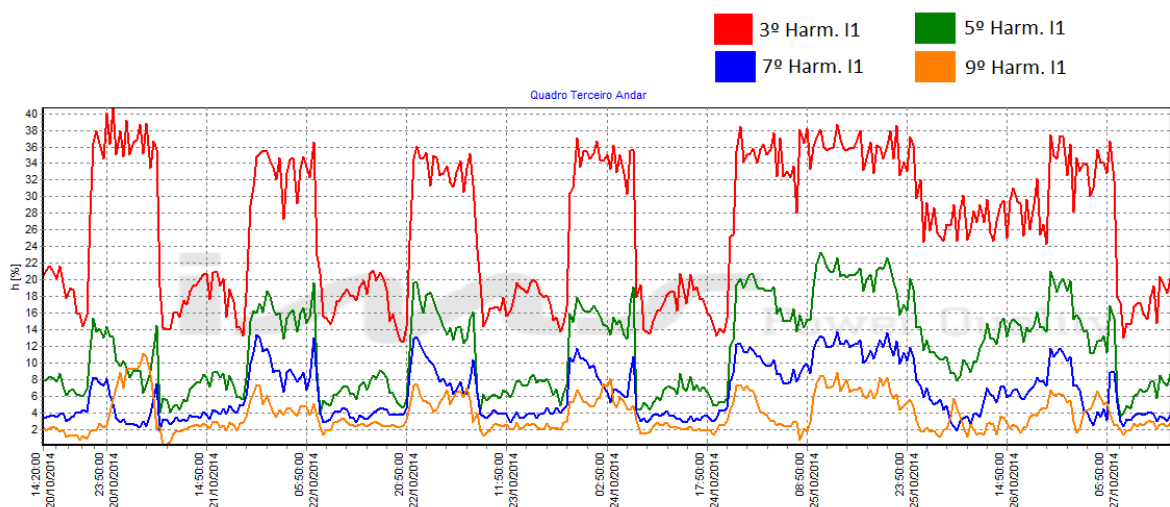
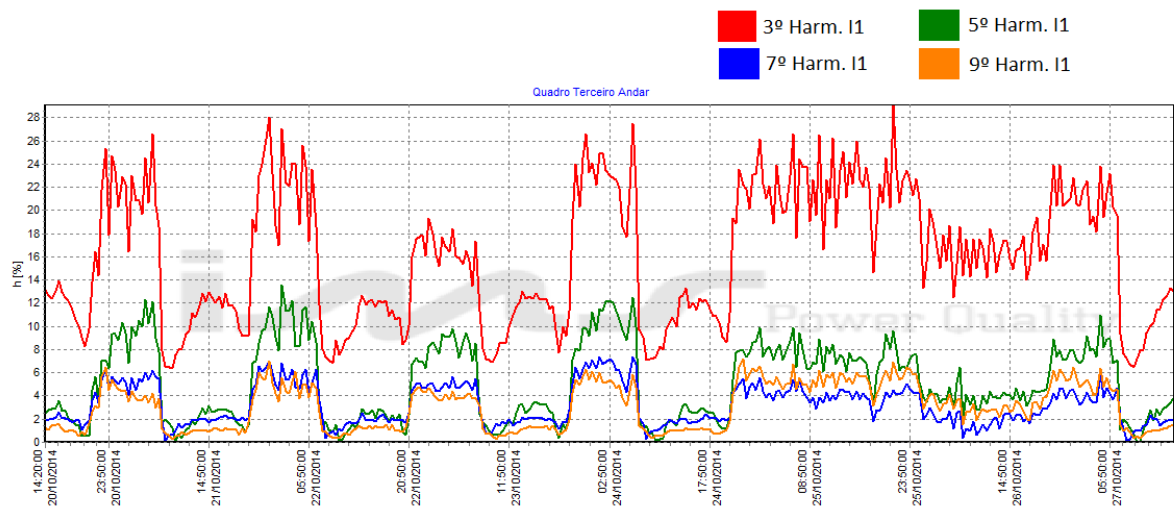


Figura 42 – Níveis de distorção harmônica de corrente na Fase 3 do QGBT



Se fosse utilizado o caso da tabela que forneceria o maior limite tolerável, quando $I_{sc}/I_L > 1000$, a tolerância para harmônicas ímpares entre 3 e 11 seria de 15%. Percebe-se nos gráficos anteriores que a distorção para terceira harmônica ultrapassa os 40% na Fase 2, e o quinto e sétimo harmônicos da Fase 1 ultrapassam 20%, ficando assim, muito além do limite recomendado.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações Sobre a Distorção Harmônica

Mesmo que atualmente não existam problemas aparentes com a instalação onde este estudo de caso foi realizado, recomenda-se realizar a monitoração constante do sistema e tomar medidas para redução harmônica. As harmônicas circulam nas redes, deteriorando a qualidade da energia, e são assim a origem de numerosos prejuízos, como:

- sobrecarga das redes de distribuição por aumento da corrente eficaz;
- sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das harmônicas de sequência zero geradas por cargas monofásicas;
- sobrecarga, vibrações e envelhecimento de alternadores, transformadores, motores, excesso de ruídos dos transformadores;
- sobrecarga e envelhecimento dos bancos de capacitores de compensação de energia reativa;
- deformações da tensão de alimentação, que podem perturbar receptores sensíveis e prejudicar equipamento que tenha funcionamento no cruzamento por zero;
- interferência nas redes de comunicação e nas linhas telefônicas;
- graves erros de medição de consumo;
- envelhecimento precoce dos materiais condutores, necessidade de superdimensionamento do condutor neutro.

5.2 Sugestões

É possível monitorar o sistema, com equipamentos que atuam de forma preditiva, como centrais de medição digitais, e dispositivos de detecção que são ligados diretamente nos disjuntores dos quadros de baixa tensão. Uma central de medição digital além de informar as grandezas relativas ao consumo, (como visto no capítulo 2.7.5), como sua equivalente analógica, também demonstra em tempo real informações como tensão, corrente e potências instantâneas, podendo indicar também os índices harmônicos do sistema em tempo real. Modelos recentes podem enviar dados para um usuário remoto, via conexão ethernet, como DHT e as formas de onda. Na Figura 43 são mostrados alguns modelos. Tendo este modo de monitora-

mento, sempre que houver alguma reconfiguração nas cargas da instalação, é possível agir e eliminar os harmônicos e demais problemas relacionados à QEE de forma rápida.

Figura 43 – a) e b) Centrais de Medição Digital c) Dispositivo de detecção ligado ao disjuntor



Fonte: Catálogo Schneider Electric

5.3 Resultados e Discussões

Através deste projeto de diplomação, realizou-se um estudo de caso no qual se analisou a qualidade da energia elétrica disponível nas instalações da JFRS. Mais precisamente, os níveis de distorção harmônica foram monitorados em um quadro de distribuição geral (QGBT), utilizando um analisador PowerNET P-600. Para validar o procedimento, realizou-se revisão bibliográfica a respeito dos conceitos que abrangem os conceitos de harmônicos de tensão e corrente, replicando e adaptando procedimentos anteriores, de acordo com as recomendações do PRODIST e IEEE 519 (2004).

A metodologia utilizada baseou-se nos trabalhos anteriores e nas recomendações do PRODIST e IEEE 519 (2004).

Com os resultados obtidos, foi possível observar que os níveis de distorção possuem um comportamento semelhante ao esperado inicialmente pela teoria, com distorção de tensão dentro dos padrões do PRODIST, mas com níveis ainda maiores que o esperado na distorção de corrente.

No Brasil ainda não existe uma norma regulamentadora que exija níveis de corrente abaixo dos fixados, mas as recomendações IEEE 519 (2004) sugerem intervenção quando os níveis de harmônicos ímpares entre o 3º e 11º tenham distorção maior que 15%, sendo que no caso do estudo a 3ª harmônica chegou a 40% de distorção.

Existe um detalhe interessante quando se observa as Figuras 34 e 36, referentes à corrente e a distorção harmônica de corrente. Nos horários comerciais, quando todos os computadores da instalação estão ligados, existe uma alta corrente circulando (cerca de 200 amperes), e a distorção harmônica relativa a esta corrente é relativamente baixa (20%). Durante a noite, a corrente é bem menor (cerca de 18 amperes), mas a distorção harmônica relativa a esta corrente ultrapassa 48% na Fase 3.

Foi constatado que grande parte da iluminação (composta por lâmpadas fluorescentes tubulares + reatores) que permanece acesa durante a noite está ligada nesta fase. Isto demonstra o nível harmônico excessivo que este tipo de lâmpada pode gerar. Mesmo que não exista problema aparente, se em algum momento for exigido que os níveis harmônicos de corrente sejam reduzidos, existe a possibilidade de realizar a troca da iluminação por lâmpadas LED.

No momento em que as distorções harmônicas estiverem acima dos níveis aceitáveis pelas normas, será necessária intervenção obrigatória. As possíveis soluções para atenuar os efeitos harmônicos são de três naturezas diferentes:

- readaptações da instalação;
- utilização de dispositivos específicos na alimentação (indutâncias, transformadores);
- filtragem de harmônicos.

Levantando todas as cargas que compõem a instalação é possível readaptá-las; não apenas na questão de equilíbrio de fases, mas conhecendo o comportamento de cada equipamento, é possível rearranjar as cargas produtoras de harmônicos em circuitos, de modo que as distorções harmônicas ao se somarem, sejam amenizadas e até canceladas. Fazer este levantamento em indústrias e centros comerciais de grande porte acaba se tornando inviável na maioria dos casos, sendo indicado realizar este estudo apenas no momento de projetar o sistema.

Para redução de níveis harmônicos neste caso é recomendado o uso de equipamentos específicos, como filtros e indutâncias na linha. O tipo de equipamento utilizado acaba se tornando função de vários fatores da instalação, como quantidade/tipo de cargas e níveis de distorção harmônica. No Apêndice A são apresentados alguns modelos com seus modos de funcionamento.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL, PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.** Revisão 4. Brasília, 2012.
- DOUGHERTY, G. Jeff; STEBBINS, L. Wayne. Power quality: a utility and industry perspective. **IEEE Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference.** 1997.
- DUGAN, R. C. **Electrical Power Systems Quality.** 2. ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2004.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 1159: IEEE Standard for Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** New York, 1995.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 519: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** New York, 1992.
- ARGENTA, B. Tales. **Afundamentos De Tensão Provenientes De Falhas No Sistema Elétrico De Potência: Um Estudo De Caso.** Projeto de Diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Sine-wave Distortions in Power Systems and the Impact on Protective Relaying.** Report prepared by the Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society. Novembro 1982.
- SUBJAK J., MCQUIKIN J. **Harmonics - Causes, Effects, Measurements, and Analysis : An update.** IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 26, No. 5, PP 1034 - 11:142, Nov./Dec. 1990.
- ALAMMARI, R.A., SOLIMAN, S.A., & EL-HAWARY, M.E. **Identification of Individual Types Of Harmonic Loads In An Electric Power System Bus.** Electrical Power and Energy Systems (2004).
- LIEW, A.C. **Excessive neutral current in three-phase fluorescent lighting circuit.** IEEE Transaction Industrial Applications, (1989).
- BOYLESTAD, L. ROBERT. **Introductory Circuit Analysis, tenth edition.** Pearson Education (2003).
- DOMIJAN, A.; EMBRIZ-SANTANDER, E. **"Harmonic mitigation techniques for the improvement of power quality of adjustable speed drives (ASDs)"**, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1990. APEC '90, Conference Proceedings 1990.
- KEY T. S. AND LAI J. S. **"Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion,"** IEEE Trans. on Ind. Appl., Jul./Aug 1993

KEY T. S. AND LAI J. S. **“Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion,”***Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, 1996*

YANG, J.J. ; NGUYEN, H.T. ; CHOI, S.S. ; ZUHDI, M. **“Maximizing motor load lifetime through the control of harmonic distortion level”** Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference , 2010

POMILIO, J. A. **“Normas Relativas À Corrente De Linha: Harmônicas De Baixa Frequência E Interferência Eletromagnética Conduzida”**, Unicamp, Notas de Aula.

AINTABLIAN, H.O. HILL AND H.W. JR, **"Harmonic currents generated by personal computers and their effects on the distribution system neutral current"**, Conf IEEE Ind. Appl, vol. 2, pp.1483-1495, Oct. 1993.

APÊNDICE A

1 DISPOSITIVOS PARA CONTROLE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA

Este apêndice tem por objetivo classificar e demonstrar as características de dispositivos mais utilizados em controle de distorções harmônicas. Estes dispositivos podem ser simples, como um banco de capacitores ou um reator de linha, ou mais complexos, como um filtro ativo. Conforme descrito no Capítulo 3, uma ação de redução simples como adicionar, redimensionar, ou reposicionar um banco de capacitores shunt, pode efetivamente modificar uma resposta de frequência de um sistema desfavorável, e, assim, trazer a distorção harmônica para um nível aceitável. Da mesma forma, um reator pode desempenhar a mesma função, dessintonizando o sistema de ressonâncias prejudiciais. A eficácia de tais soluções simples para controlar a distorção harmônica deve ser explorada, antes de se considerar um dispositivo mais complexo.

O conteúdo a seguir aborda primeiramente a eficácia de um reator de linha simples, também conhecido como amortecedor (*choke*), para atenuar a distorção harmônica. Em seguida, serão discutidas duas classes gerais de filtros de harmônicas, isto é, filtros passivos e ativos. Os primeiros são baseados em elementos passivos, enquanto os segundos se baseiam em dispositivos eletrônicos de potência.

1.1.1 Reatores em Linha ou Afogadores

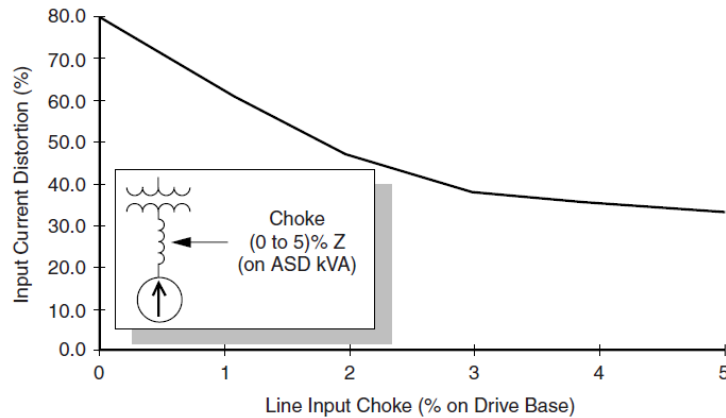
Um método simples, mas geralmente bem-sucedido para controlar a distorção harmônica gerada por módulos de velocidade ajustável, envolve um reator relativamente pequeno (também conhecido por afogador), inserido no lado da entrada de linha do módulo. Isto é particularmente eficaz para acionadores do tipo PWM.

A indutância diminui a velocidade com que o capacitor do barramento CC pode ser carregado, e força a unidade a consumir corrente ao longo de um período de tempo mais longo. O resultado é uma corrente de baixa magnitude, com muito menos conteúdo harmônico, proporcionando a mesma energia ao longo do tempo.

Um afogador típico de 3% pode reduzir a distorção da corrente harmônica para um módulo tipo PWM de 80% para 40%. Essa redução pode ser visualizada na Figura 44. Estas reduções harmônicas se tornam mais limitadas quando o tamanho do afogador é aumentado

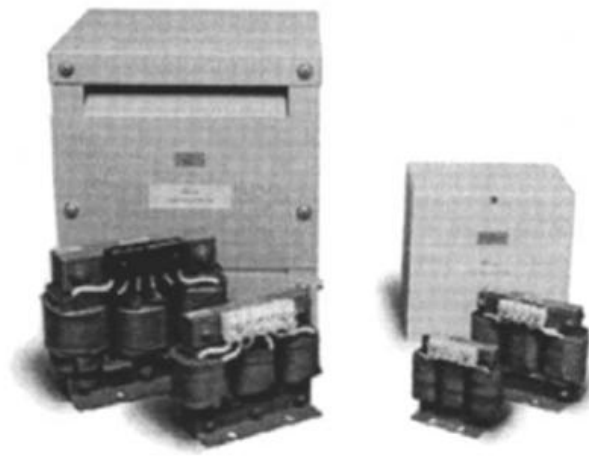
em níveis superiores a 3%. O tamanho do afogador é calculado tendo como base a potência em kVA do acionador. Na Figura 45 pode-se ver afogadores utilizados tipicamente em aplicações com AVVs de 480V.

Figura 44 – Redução harmônica para um AVV tpo PWM, em função do tamanho do reator utilizado



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Figura 45 – Modelos de reatores trifásicos para aplicações com AVVs



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

A Figura 46 compara a eficácia do uso de um afogador de 3% na redução da distorção harmônica, com a condição sem afogador, para vários tamanhos de AVV (os tamanhos dos AVV são normalizados em relação aos kVA do transformador de serviço). Formas de onda representativas para cada extremidade da faixa são mostradas.

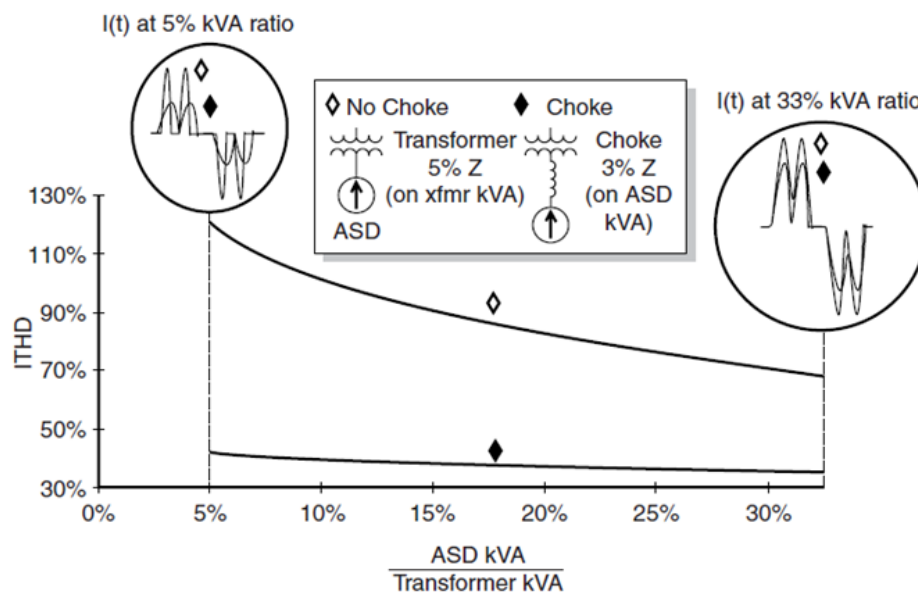
A forma de onda superior é o caso sem o amortecedor. Como visto na Figura 46, uma melhoria substancial é conseguida através da inserção de um amortecedor na linha do AVV. A DHT de corrente cai cerca de 40% a partir do intervalo de 80 a 120%. Uma redução ainda melhor é obtida quando o tamanho do AVV é significativamente menor do que o transforma-

dor. Quando o tamanho do AVV é equivalente a 5% do tamanho do transformador, a DHT de corrente cai de 125 para 40%.

Também é importante notar que há outras vantagens em utilizar um afogador em conjunto a um AVV. O efeito de redução da velocidade de carga CC do capacitor também torna o afogador muito eficaz no bloqueio de alguns transientes de alta frequência. Isso ajuda a evitar disparos por interferência em operações no sistema de distribuição, durante energização de capacitores.

Os transformadores de isolamento podem proporcionar o mesmo benefício de um amortecedor, mas geralmente tem um custo maior. No entanto, transformadores de isolamento com múltiplas unidades, oferecem a vantagem de criar uma operação eficaz de 12 pulsos. A Figura 47 ilustra esse conceito.

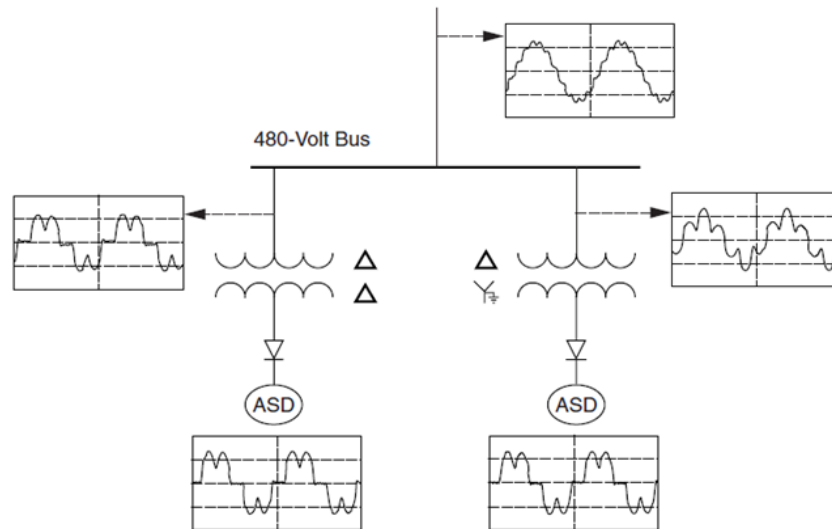
Figura 46 – Efeito de reatores CA em harmônicas de corrente em um AVV



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

A configuração de 12 pulsos pode ser alcançada alimentando um acionador através de um transformador com ligação estrela-triângulo, e outra unidade através de uma ligação delta-delta no transformador. A Figura 47 mostra as formas de onda de corrente para dois AVVs separados de seis pulsos.

Figura 47 – Configuração de 12 pulsos como um método de controle harmônico em dois AVVs.



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Quando as duas formas de onda são somadas no primário, a forma de onda resultante injetada no sistema de alimentação tem distorção muito mais baixa, principalmente porque o quinto e sétimo harmônicos são anulados. Estes dois harmônicos são responsáveis pela maior parte da distorção em unidades de seis pulsos.

1.1.2 Transformador Zigue-zague

Transformadores em zigue-zague são muitas vezes aplicados em instalações comerciais para o controle de harmônicas ímpares múltiplas de 3. Um transformador em zigue-zague age como um filtro para a corrente de sequência-zero, oferecendo um caminho de baixa impedância para o neutro. Isto reduz a quantidade de corrente que flui no neutro de volta para a alimentação, através de um caminho mais curto para a corrente. Para ser eficaz, o transformador tem de estar localizado próximo à carga do circuito que está a ser protegido.

Os dois problemas mais importantes em instalações comerciais são o sobrecarregamento de condutores neutros e o aquecimento do transformador. Ambos os problemas podem ser resolvidos com a colocação correta do transformador em zigue-zague. Alguns edifícios comerciais novos incluem transformadores em zigue-zague sobre os secundários dos transformadores de alimentação de 480/208 V, para evitar o superaquecimento do transformador.

Os resultados típicos com um transformador zigue-zague mostram que ele pode desviar cerca de 50% da corrente de terceira harmônica para longe dos condutores neutros do circuito principal. Assim, o transformador zigue-zague quase sempre pode reduzir as correntes

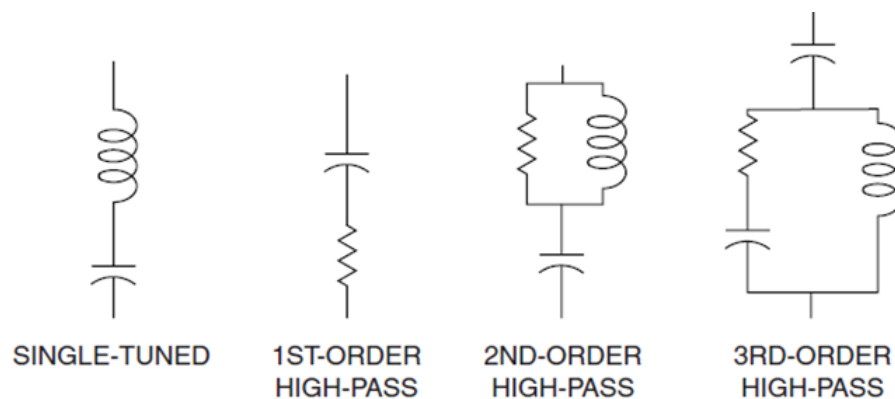
de neutro devido às harmônicas de sequência zero, para níveis aceitáveis. Em edifícios de escritórios, com vários computadores e equipamentos relacionados, a maior harmônica de sequência zero será o terceiro harmônico (Aintablian, 1993).

Os transformadores em zigue-zague são uma excelente opção para instalações existentes, onde houver preocupação com os problemas de condutor neutro, e possível aquecimento do transformador, assumindo que exista um lugar conveniente para instalar o transformador entre circuito de neutro monitorado e as cargas reais. Em novas instalações, pode ser melhor simplificar os projetos dos circuitos, com capacidade de transporte de corrente suficiente nos neutros e com transformadores de maior capacidade.

1.1.3 Filtros Passivos

Os filtros passivos contêm elementos de indutância, capacitância e resistência configurados e ajustados para controlar harmônicos. São comumente usados e relativamente baratos quando comparados a outros meios de eliminar a distorção harmônica (Dugan, 2004). No entanto, eles têm a desvantagem de potencialmente interagir negativamente com o sistema de alimentação, e é importante verificar todas as interações possíveis do sistema, quando forem projetados. Eles são empregados para curto-circuitar as correntes harmônicas para fora da linha ou para bloquear o seu fluxo entre as partes do sistema, por meio do ajuste dos elementos para criar uma ressonância a uma frequência selecionada. A Figura 48 mostra vários tipos de arranjos de filtros comuns.

Figura 48 – Configurações comuns de filtros passivos

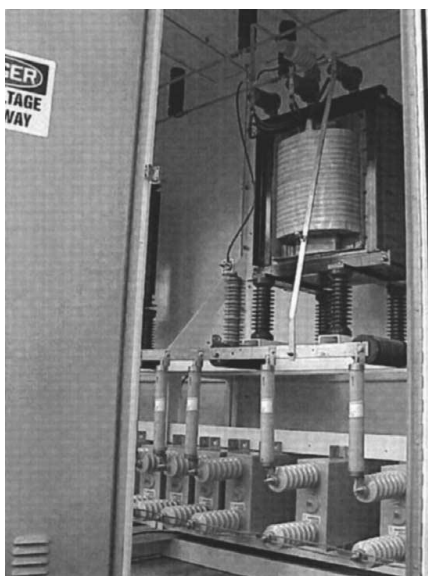


Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Filtro Passivo Shunt. O tipo mais comum de filtro passivo é o filtro de corte sintonizado para uma determinada frequência. Este é o modelo mais econômico e normalmente é suficiente para uma aplicação. O filtro de corte apresenta uma baixa impedância para a corrente harmônica específica e está ligado em paralelo com o sistema de potência. Assim, as correntes harmônicas são desviadas do seu caminho normal de fluxo na linha, através do filtro.

Filtros de corte podem proporcionar a correção do fator de potência, além da supressão de harmônicas. Capacitores utilizados para correção de fator de potência podem ser utilizados para implementar um filtro de corte. A Figura 49 apresenta um exemplo de tal filtro, concebido para aplicações de média tensão. O núcleo de ferro do reator está posicionado no topo dos capacitores, que são conectados em uma ligação estrela com as outras fases (não mostrado). Cada encapsulamento de capacitor está ligado com um fusível limitador de corrente, para minimizar os danos em caso de uma falha. Em instalações externas, muitas vezes é mais econômico usar reatores com núcleo a ar, mas os núcleos de ferro também podem ser isolados a óleo.

Figura 49 – Uma fase de um filtro encapsulado trifásico



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

A Figura 50 mostra um outro projeto para um local com aplicações industriais. Aqui, os reatores são colocados em cima do armário que abriga os capacitores e comutadores. Um exemplo comum de um arranjo de filtro em 480V está ilustrado na Figura 51, onde é mostrado um banco de capacitores de baixa tensão com ligação triângulo, convertido em um

filtro através da adição de uma indutância em série com as fases. Neste caso, o harmônico h_{notch} está relacionado com as reatâncias da frequência fundamental por:

$$H_{notch} = \sqrt{\frac{X_C}{3X_F}} \quad (34)$$

Note que, neste caso, X_C é a reatância de uma perna da ligação delta, em vez da reatância capacitiva equivalente linha-neutro. Se a tensão de fase-fase e a potência kvar trifásica são utilizadas para calcular X_C , como descrito anteriormente, o fator 3 deve ser omitido.

Figura 50 – Filtro para aplicações de sistemas de potência industriais



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Um efeito adverso importante deste tipo de filtro, é que ele cria um ponto de ressonância paralela acentuada em uma frequência abaixo da frequência de corte (Figura 48 c). Esta frequência de ressonância deve ser seguramente longe de qualquer harmônica significativa, ou de outras componentes de frequência que possam ser produzidas pela carga. Os filtros são normalmente sintonizados ligeiramente abaixo da harmônica a ser filtrada, para

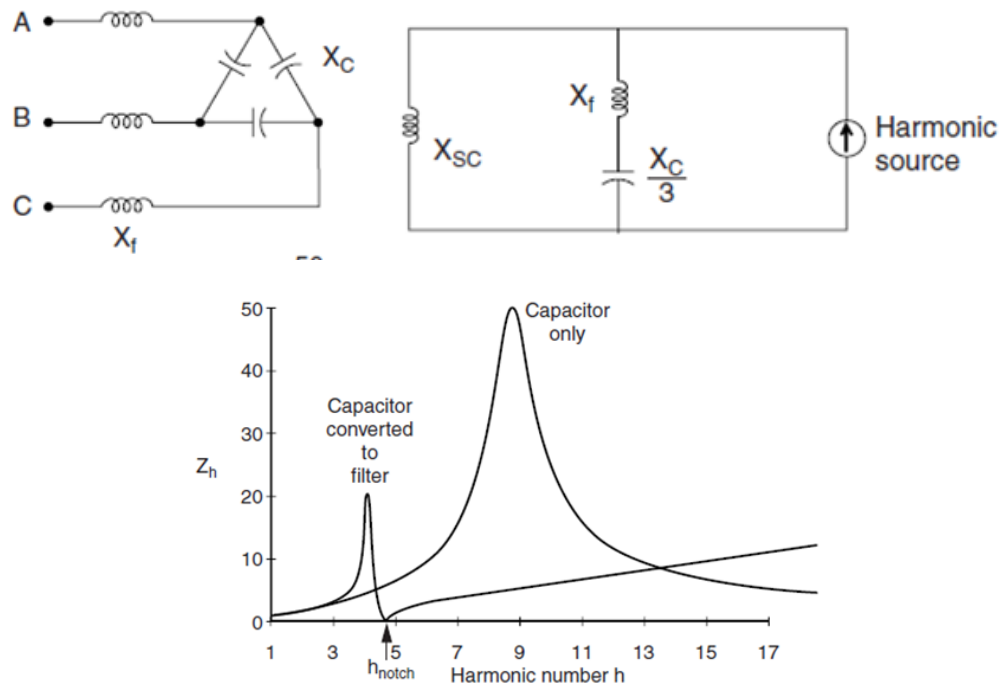
proporcionar uma margem de segurança caso haja alguma alteração nos parâmetros do sistema, o que elevaria a frequência de corte.

Figura 51 – Implementação de um filtro de corte de quinta harmônica e seu efeito na resposta do sistema

a) Configuração típica de filtro para baixa tensão

b) Circuito equivalente de um sistema com filtro

c) Resposta frequência do sistema



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Se o filtro estiver sintonizado exatamente no valor da harmônica, mudanças em qualquer capacitância ou indutância, devido à temperatura ou falha, podem deslocar a ressonância paralela para um valor mais alto que a harmônica que está sendo filtrada. Isso pode apresentar uma situação pior do que sem um filtro, porque a ressonância é geralmente muito acentuada (Dugan, 2004).

Para evitar problemas com esta ressonância, os filtros são adicionados ao sistema, considerando o harmônico significativo de menor índice encontrado. Por exemplo, a instalação de um filtro de sétimo harmônico normalmente requer que um filtro de quinto harmônico também seja instalado. A nova ressonância paralela que ocorre com um filtro de sétimo harmônico sozinho, é frequentemente muito próxima do quinto, o que geralmente é desastroso.

A configuração do filtro da Figura 51 a não admite correntes de sequência-zero, porque o capacitor está conectado em ligação triângulo, o que o torna ineficaz para a filtragem de

harmônicas múltiplas de 3. Como capacitores de 480V geralmente são configurados em delta, outras soluções devem ser empregadas quando se torna necessário o controle de correntes de terceira harmônica de sequência zero, em instalações industriais e comerciais.

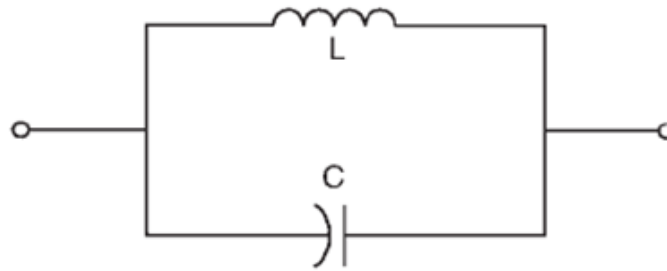
Em contraste, os capacitores em sistemas de distribuição da concessionária são mais comumente conectados com ligação estrela. Isto dá a possibilidade de controlar as harmônicas múltiplas de 3, simplesmente mudando a ligação de neutro.

Colocar um reator no neutro de um capacitor é uma forma comum para forçar o banco a filtrar apenas os harmônicos de sequência-zero. Esta técnica é muito utilizada para eliminar a interferência no telefone. Um reator regulável (tapped) é instalado no neutro e é ajustado para isto. Os filtros passivos devem sempre ser colocados em um ponto onde a reatância de curto-circuito X_{SC} se mantenha constante. Enquanto a frequência de corte permanece fixa, a frequência de ressonância paralela vai se deslocar com a impedância do sistema (Dugan, 2004). Por exemplo, a frequência de ressonância paralela, quando o sistema funciona unicamente com geração em espera (standby), geralmente é muito menor do que quando interligado com a distribuidora, pois a impedância do gerador é muito mais elevada do que a impedância da distribuidora. Isto pode ampliar uma harmônica que é normalmente insignificante. Assim, os filtros são muitas vezes removidos para operação com a geração em espera.

Além disso, os filtros devem ser projetados com capacidade do barramento em mente. É tentador dimensionar a capacidade de transporte de corrente baseado exclusivamente na carga que está produzindo a harmônica. No entanto, uma pequena quantidade de distorção de tensão no barramento de grande potência, pode impor um esforço excessivo no filtro.

Filtros Passivos em Série. Ao contrário de um filtro de shunt, que está ligado em paralelo com o sistema de potência, um filtro passivo em série está ligado em série com a carga. A indutância e capacitância são conectadas em paralelo, e são ajustadas para fornecer uma alta impedância em uma determinada frequência harmônica selecionada. A alta impedância bloqueia o fluxo de correntes harmônicas apenas na frequência sintonizada. Na frequência fundamental, o filtro é projetado para produzir uma baixa impedância, permitindo assim o fluxo da corrente fundamental, com perdas e impedâncias mínimas. A Figura 52 mostra um arranjo com um típico filtro em série.

Figura 52 – Modelo de filtro passivo em série



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Filtros em série são usados para bloquear uma corrente harmônica única (terceira harmônica, por exemplo) e são especialmente úteis em um circuito monofásico, onde não é possível tirar vantagem das características de sequência-zero.

A utilização de filtros em série é limitada quanto ao bloqueio de várias correntes harmônicas. Cada corrente harmônica requer um filtro em série sintonizado para este harmônico. Esse arranjo pode gerar perdas significantes na frequência fundamental.

Além disso, assim como outros componentes em série nos sistemas de potência, um filtro em série deve ser projetado para transportar uma corrente total de carga nominal e deve ter um esquema de proteção de sobrecorrente. Assim, os filtros em série são muito menos utilizados quando comparados aos filtros shunt.

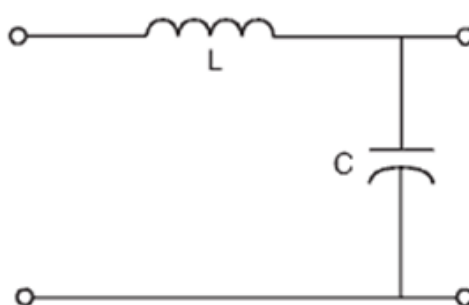
1.1.4 Filtros Passa-Baixa.

Muitas vezes são necessários vários estágios de ambos os filtros, série e shunt; em aplicações práticas. Por exemplo, em aplicações com filtros shunt, se for utilizado um filtro para bloquear uma frequência no sétimo harmônico, normalmente é necessário dois estágios de filtro shunt, o próprio filtro para o sétimo harmônico e o filtro para o quinto harmônico. Da mesma forma, em aplicações de filtro série, cada frequência requer um filtro série exclusivo; assim, várias fases de filtros seriam necessárias para bloquear múltiplas frequências.

Em muitas condições do sistema de potência, os harmônicos podem aparecer não apenas em uma única frequência, mas podem se espalhar através de uma ampla gama de frequências. Um conversor de seis pulsos, por exemplo, gera harmônicos característicos de 5°, 7°, 11°, 13°, etc. Conversores eletrônicos de potência podem gerar essencialmente inter-harmônicos variáveis no tempo, cobrindo uma ampla gama de frequências.

Criar um filtro shunt ou série para eliminar ou reduzir estes harmônicos difundidos e variáveis no tempo seria muito difícil. Portanto, um filtro harmônico alternativo deve ser implementado. Um filtro passa-baixa é o ideal para bloquear frequências harmônicas múltiplas e difundidas. Correntes com componentes de frequência abaixo da frequência de corte do filtro podem passar; no entanto, a corrente com componentes de frequência acima da frequência de corte é filtrada. Uma configuração típica de um filtro passa-baixa é mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Configuração de filtro passa-baixas



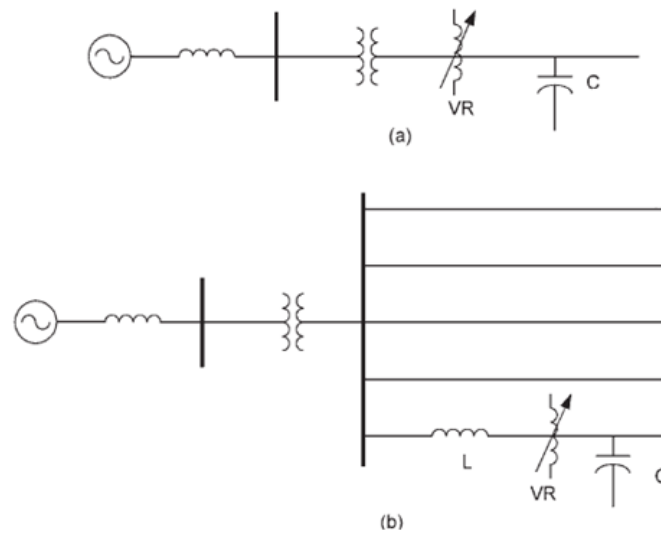
Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Em operações no sistema de distribuição, o efeito de filtros passa-baixa podem ser obtidos instalando-se um banco de capacitores no lado da baixa tensão de um transformador, como se mostra na Figura 54 a. O tamanho do banco de capacitores precisa ser escolhido de modo a proporcionar a frequência de corte desejada, quando combinado com a indutância de fuga do transformador e a impedância do sistema. É possível assim prevenir que as harmônicas superiores da frequência de corte sejam injetadas no lado de alta tensão do transformador. Uma vez que a frequência de corte pode ser bastante baixa, o tamanho do banco de capacitores tende a ser grande. Isto irá resultar num aumento significativo de tensão. No caso da tensão permanecer elevada, um regulador de tensão ou um comutador TAP deve ser usado para baixar a tensão a um nível aceitável.

No caso de uma subestação servindo vários alimentadores, um reator de linha e um regulador de tensão podem ser instalados no início do alimentador, para isolar a parte do sistema sujeito a alta tensão. Este arranjo vai permitir que os níveis de tensão em outros alimentadores possam ser mantidos a valores normais.

A combinação da indutância de dispersão do transformador, do reator de linha, do regulador de tensão e do banco de capacitores, produz a frequência de corte desejada. A Figura 54 b mostra este arranjo.

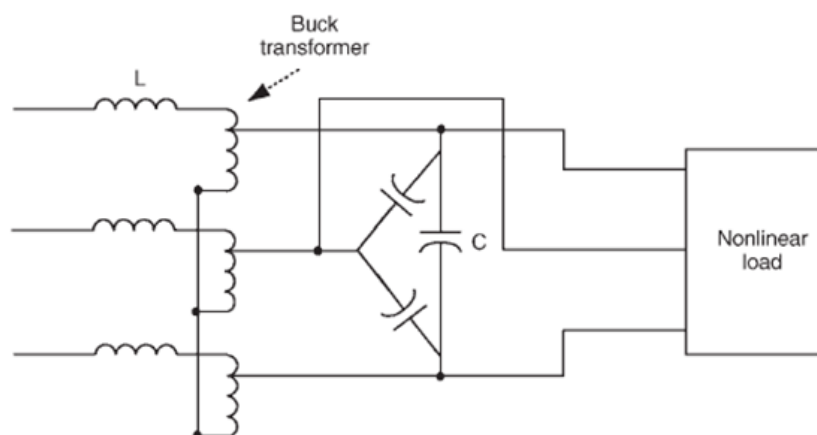
Figura 54 – Arranjo de filtro passa baixa em sistema de potência industrial
a) dedicado b) múltiplo



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

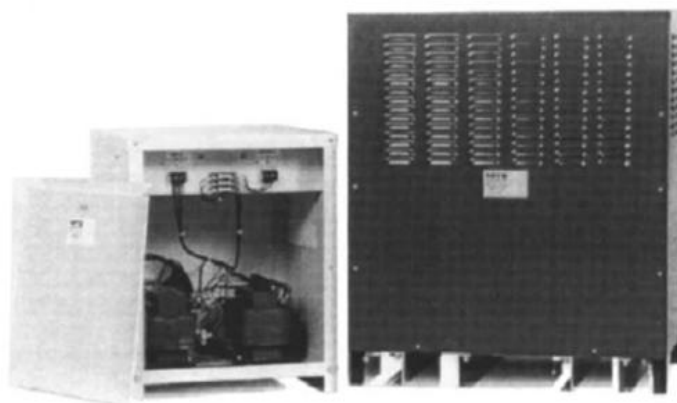
Em aplicações de sistemas industriais, os filtros passa-baixa comerciais têm sido usados para evitar harmônicas produzidas por cargas não lineares de entrar no sistema de corrente alternada. O desenho típico é ilustrado na Figura 55. A Figura 56 mostra um sistema típico destinado para esta aplicação.

Figura 55 – Aplicação de um filtro passa-baixa em um sistema industrial



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Figura 56 – Filtro banda larga passa-baixa comercial trifásico de 600V



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Um reator de linha, instalado em série com a linha principal de corrente alternada, é usado para fornecer uma separação elétrica entre o sistema de corrente alternada e a carga não linear. Um banco de capacitores é instalado em paralelo para formar uma configuração de filtro passa-baixa.

Dado que a presença de um banco de capacitores aumenta a tensão na entrada em um AVV, um transformador Buck é necessário para diminuir a tensão na saída de linha do reator, para um nível em que a tensão aplicada aos capacitores seja aceitável. O desempenho ótimo de um filtro passa-baixa de em aplicações com AVVs é obtido quando não existe qualquer indutor em série entre o filtro do banco de capacitores e o capacitor do barramento CC, contido no AVV. Qualquer impedância no caminho reduz a capacidade de carga dos capacitores do barramento CC, uma vez que ele é carregado a partir dos capacitores do filtro.

A frequência de corte de um filtro passa-baixa para aplicações com AVVs geralmente é projetada em uma frequência de baixa distorção harmônica, como em 100 a 200 Hz em um sistema de 60 Hz. Com este ajuste de frequência baixa, é improvável que o filtro excite qualquer ressonância indesejável com o resto do sistema, e pode filtrar a maior parte das correntes harmônicas. Em aplicações com AVV, o filtro geralmente pode reduzir a distorção harmônica total de corrente de intervalos de 90 a 100% para uma faixa de 9 a 12%, em condições de carga nominal. Esse desempenho é certamente muito melhor do que um simples reator de linha (amortecedor), que só reduziria a distorção total de corrente para a faixa de 30 a 40%. No entanto, o custo de um reator de linha é bem menor do que um filtro passa-baixa.

1.1.5 Filtros C.

Filtros C são uma alternativa para filtros banda larga passa-baixa na redução de múltiplas frequências harmônicas simultâneas, em sistemas industriais e de distribuição. Eles podem atenuar uma ampla gama de frequências harmônicas e inter-harmônicas, sejam em estado estacionário ou variáveis no tempo, geradas por conversores eletrônicos, fornos de indução, ciclo-conversores, etc.

A configuração de um filtro de C é quase idêntica à do filtro passa-alta de segunda ordem, mostrado na Figura 48. A diferença principal entre as duas configurações é que o filtro C possui um capacitor auxiliar Ca em série com o indutor Lm . Uma configuração típica de um filtro de C é mostrada na Figura 57. O capacitor auxiliar Ca é dimensionado de tal forma que a sua reatância capacitiva cancela Lm na frequência fundamental, ignorando a resistência de amortecimento R . Por esta razão, as perdas associadas com R são praticamente eliminadas, permitindo que o filtro C possa ser sintonizado em uma frequência baixa.

A impedância da resposta em frequência de um filtro C também é essencialmente idêntica à de um filtro passa-alta de segunda ordem, ou seja, em frequências harmônicas de alta ordem, a reatância de Ca é pequena, enquanto a de Lm é grande.

Portanto, a impedância em série no ramo de Lm e Ca é dominada pela reatância de Lm . As respostas do filtro C e filtros passa-alta de segunda ordem em altas frequência são semelhantes (ver Figura 54).

Na concepção de um filtro C, é necessário especificar $I_{SF}(h_T)$, a máxima corrente harmônica permitida a fluir para o sistema em h_T , a frequência harmônica sintonizada. Supõe-se ainda que a exigência de energia reativa de compensação seja conhecida, estabelecendo assim o tamanho nominal do capacitor Cm . A Figura 58 apresenta um circuito equivalente com os componentes do filtro R , Ca , e Lm . A reatância de curto-circuito é denotada como XS . Os componentes deste filtro podem ser calculados como se segue:

$$R = \frac{R_F(h_T)^2 + \left(\frac{X_{Cm}}{h_T}\right)^2}{R_F(h_T)} \quad (35)$$

$$XL_m = XC_a = \frac{R_F(h_T)^2 + \left(\frac{X_{Cm}}{h_T}\right)^2}{\left(\frac{X_{Cm}}{h_T}\right)\left(\frac{h_T-1}{h_T}\right)} \quad (36)$$

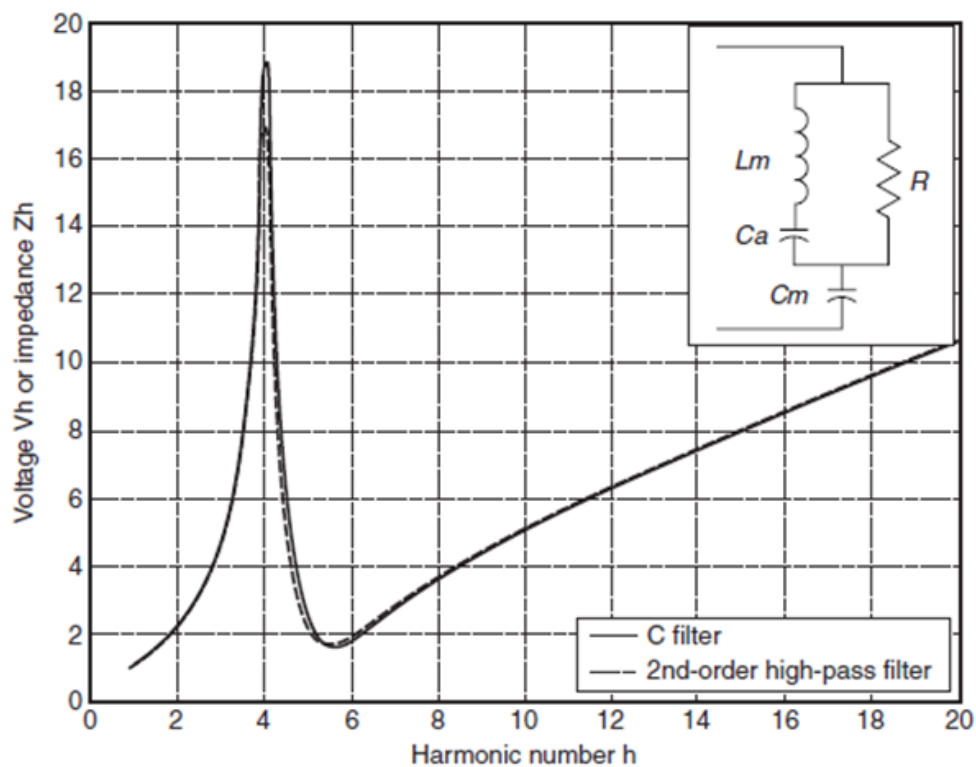
$$\text{Onde } R_F = \frac{h_T X_S}{\sqrt{\frac{1}{I_{SF}(h_T)^2} - 1}} \quad (37)$$

X_S é a reatância de curto circuito na frequência fundamental;

X_{L_m} é a reatância de L_m na frequência fundamental;

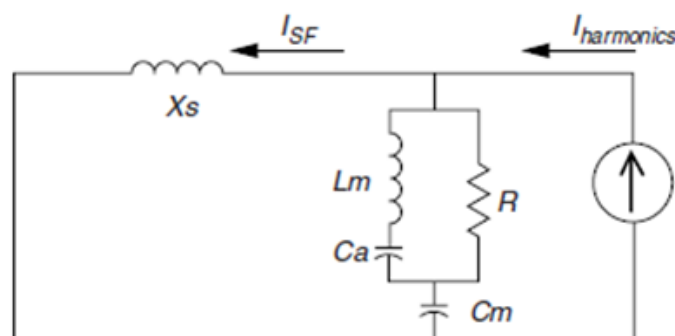
X_{C_a} é a reatância de C_a na frequência fundamental.

Figura 57 – Configuração típica de um filtro C e sua respectiva resposta em frequência para impedância



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Figura 58 – Circuito equivalente para especificações derivadas de um filtro C



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

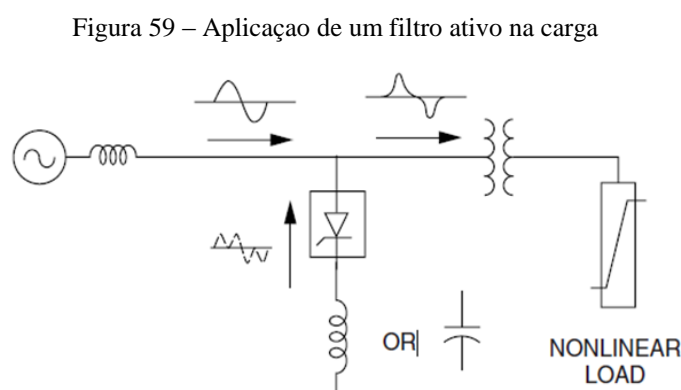
1.1.6 Filtros Ativos

Filtros ativos são tipos relativamente novos de dispositivos para eliminar harmônicos. Eles são baseados em eletrônica de potência sofisticada e são muito mais caros do que os filtros passivos. No entanto, possuem a grande vantagem de não entrar em ressonância com o sistema. Os filtros ativos podem trabalhar de forma independente das características de impedância do sistema (Dugan, 2004).

Assim, eles podem ser utilizados em circunstâncias muito difíceis, onde filtros passivos não poderiam operar com êxito devido a problemas de ressonância em paralelo.

Eles também podem lidar com mais de um harmônico de cada vez e combater outros problemas de qualidade de energia, tais como a cintilação (flicker). São particularmente úteis para grandes cargas distorcidas, alimentadas a partir de pontos relativamente fracos no sistema de potência.

A ideia básica é reinserir a porção da onda senoidal que está faltando na corrente de uma carga não-linear. A Figura 59 ilustra o conceito.



Fonte: Adaptado de (Dugan, 2004)

Um controlador eletrônico monitora a tensão de rede e /ou a corrente, chaveando os circuitos de potência muito precisamente, para acompanhar a corrente de carga (ou tensão) e forçá-la a ser senoidal. Como mostrado, existem duas abordagens fundamentais: uma que utiliza um indutor para armazenar a corrente a ser injetada no sistema no instante apropriado, e um que utiliza um capacitor. Portanto, enquanto a corrente na carga é distorcida na medida exigida pela carga não-linear, a corrente vista pelo sistema é muito mais senoidal.

Os filtros ativos geralmente também podem ser programados para corrigir o fator de potência, além das distorções harmônicas.