

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CIAGA
DEPARTAMENTO DE ENSINO DE MÁQUINAS
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS (APMA)



GERAÇÃO DE HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Marcelo Epifane Virgolino

Orientador: Luis Otavio Ribeiro Carneiro

Rio de Janeiro

2012

MARCELO EPIFANE VIRGOLINO

GERAÇÃO DE HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Monografia apresentada ao Curso de Aperfeiçoamento de Oficial de Maquinas, na modalidade Formação para Chefe de Maquinas, como requisito parcial para atender a regra III/2 da convenção STCW.

Orientador: Luiz Otavio Ribeiro Carneiro

RIO DE JANEIRO

2012

MARCELO EPIFANE VIRGOLINO

GERAÇÃO DE HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Monografia apresentada ao Curso de Aperfeiçoamento de Oficial de Maquinas, na modalidade Formação para Chefe de Maquinas, como requisito parcial para atender a regra III/2 da convenção STCW.

Orientador: Professor Luiz Otavio Ribeiro Carneiro.

Aprovada pela Banca Examinadora em ____ de março de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Professor

Professor

Professor

Dedico à minha noiva Carla Patrícia Queiroz que me incentivou a buscar sempre o melhor e realmente mostrando a diferença que faz uma mulher na vida de um homem. Obrigado por ser a minha companheira e ter transformado minha vida. Eu te amo!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus pais, Oséas Martins Virgolino e Maria de Fátima Epifane Virgolino, que sempre me incentivaram, apoiaram e nunca deixaram de estar do meu lado em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos, Marcio Virgolino pelas suas orações e palavras de conforto e Oséas Virgolino Filho juntamente de sua esposa Michele Andrade que por serem exigente em tudo que fazem me incentivando ao aprimoramento no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por fazerem desta família unida pelo amor e na oração.

A minha querida sogra, professora Dra Cílvia Queiroz que teve paciência com este genro que sempre ligava com duvidas sobre desenvolvimento e formatação desta monografia, obrigado por todo apoio.

A Transpetro representada pelo CMT José Menezes filho que juntamente com a DPC formaram a turma APMA EXFD demonstrando a preocupação com o crescimento da marinha mercante como um todo.

Ao meu orientador professor Luis Otávio Ribeiro Carneiro pela disponibilidade.

Enfim, a minha empresa Norskan Offshore por acreditar e investir em minha ascensão profissional.

Obrigado a todos.

**“ O homem nunca sabe o que é capaz
até que é obrigado a tentar.”**

Charles Dickens

RESUMO

Este estudo, realizado por meio de pesquisa bibliográfica, tem como objetivo mostrar a necessidade da preocupação com a *Geração de harmônica em sistemas elétricos*. Dentre vários distúrbios da tensão e corrente, a geração de harmônica é a deformação da forma das senóides provocadas pelas cargas chamadas não lineares. Estas cargas não lineares vêm crescendo devido a constante evolução da tecnologia utilizada nas instalações elétricas navais, industriais e residenciais. Como exemplo do meio naval pode-se citar a eletrônica de potência. Apresenta os conceitos básicos de distorções harmônicas, seus efeitos e algumas medidas mitigadoras deste distúrbio para obter uma qualidade de energia gerada. A qualidade da energia elétrica é de vital importância para a manutenção de equipamentos e para a segurança em geral das instalações elétricas. O estudo orienta profissionais desta área sobre este distúrbio para que possivelmente, venha identificar, corrigir ou amenizar estas interferências evitando prejuízos através da avaria dos equipamentos e perdas da energia geradas pela dissipação causada pelo mesmo.

Palavras-chave: Harmônica, qualidade de energia, deformações da senóide.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 01: Componentes harmônicas da original | 14 |
| Figura 2.1: Forma de onda típica de corrente de lâmpada fluorescente..... | 15 |
| Figura 2.2: Decomposição harmônica da forma de onda de lâmpada fluorescente..... | 16. |
| Figura 2.3: (a) Forma de Onda de Tensão, (b) Espectro Harmônico de Tensão | 17 |
| Figura 2.4: (c) Forma de Onda de Corrente, (d) Espectro Harmônico de Corrente | 17 |
| Figura 2.5: Gráfico do disparo de diodos | 19 |
| Figura 2.6: Multímetro Digital | 20 |
| Figura 2.7: Osciloscópio Digital | 21 |
| Figura 2.8: Analisador Gráfico..... | 22 |
| Figura 2.9: Analisador Espectral | 23 |
| Figura 3.1: Relação entre tensão e corrente num circuito formado por elementos lineares (HERRERA, 2001)..... | 25 |
| Figura 3.2: Forma de onda de corrente distorcida num circuito formado por elementos não-lineares (HERRERA, 2001) | 26 |
| Figura. 3.3: Forma de onda e respectivo espectro harmônica da corrente na fase A - máquina solda ESM-43 | 27 |
| Figura 3.4: Retificador monofásico com filtro capacitivo | 28 |
| Figura 3.5: (a)Corrente de entrada e tensão de alimentação de retificador alimentando filtro capacitivo. (b) Espectro da corrente | 28 |
| Figura 3.6: Inversor do tipo controle de histerese pag 19 senai/tubarão 2004 | 29 |
| Figura 5.1: Filtro Passivo | 39 |
| Figura 5.2: Filtro Ativo..... | 40 |
| Figura 5.3: Filtro Híbrido | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 2.1: Influência dos harmônicos no acréscimo da corrente e na redução do fator de potência. | 18 |
| Tabela 2.2: Relação fator de crista e forma da onda | 19 |
| Tabela 4: Efeito de harmônicos em componentes do sistema elétrico | 35 |
| Tabela 5: Tabela 10.3 da IEEE 519-2, limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição em geral (120 V a 69000 V) | 38. |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 HARMÔNICA - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA..... | 14 |
| 2.1 O que é harmônica | 14 |
| 2.2 Espectro harmônico | 15 |
| 2.3 Taxa de distorção harmônica total (thd) | 16 |
| 2.4 Fator de potencia e $\cos \varphi$ | 17 |
| 2.5 Fator de crista | 18 |
| 2.6 Medição de Harmônicos | 20 |
| 2.6.1 Multímetros Digitais | 20 |
| 2.6.2 Osciloscópios | 21 |
| 2.6.3 Analisadores de Energia | 21 |
| 2.6.4 Analisadores de Espectro | 22 |
| 2.7 Normas que regulam a injeção harmônica | 23 |
| 3 CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICA | 25 |
| 3.1 Cargas lineares e não-lineares | 25 |
| 3.2 Exemplo de cargas geradores de harmônico | 26 |
| 3.2.1 Máquinas de soldar elétrica | 27 |
| 3.2.2 Retificadores com filtro capacitivo | 27 |
| 3.2.1 Controlador de velocidade de corrente AC. | 28 |
| 3.2.4 Fonte de alimentação monofásica | 30 |
| 4-EFEITOS CAUSADOS PELAS HARMÔNICAS | 31 |
| 4.1 Condutores | 31 |
| 4.2 Iluminação | 32 |
| 4.3 Máquinas rotativas | 32 |
| 4.4 Equipamentos eletrônicos | 32 |
| 4.5 Transformadores | 33 |
| 4.6 Capacitores | 34 |
| 4.7 Relés de proteção | 34 |
| 5 PREVENÇÃO CONTRA AS HARMÔNICAS | 36 |
| 5.1 Dimensionamento de fase e neutro | 36 |
| 5.2 Dimensionamento do Transformador..... | 37 |
| 5.3 Filtros de harmônicas | 37 |
| 5.3.1 Filtros Passivos | 39 |
| 5.3.2 Filtros Ativos | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 5.3.3 Filtros Híbridos | 41 |
| 5.4 Transformadores de separação | 42 |
| 5.4.1 Transformador de separação de 3^a harmônica e suas múltiplas | 42 |
| 5.4.2 Transformador de separação para 5^a e 7^a harmônica e suas múltiplas | 42 |
| 6 CONCLUSÃO | 43 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 44 |
| GLOSSÁRIO | 45 |

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica é de vital importância para a manutenção de equipamento e pela segurança em geral das instalações elétricas. Embora utilizada em diversos tipos de equipamento da área naval assim como na área residencial, rural, industrial e comercial a preocupação principal, na maioria das vezes, é voltada para a questão econômica. Para o consumidor residencial, por exemplo, o que ele tem em mente como qualidade de energia elétrica é realmente a falta da energia, desde que essa falta não seja muito longa não haverá grandes transtornos ou mesmo perdas econômicas por parte do consumidor. Porém, quando se trata de consumidores navais, industriais e comerciais esta análise é diferenciada.

Consumidores dos segmentos navais, comerciais e industriais possuem equipamentos de alta tecnologia, os quais são extremamente sensíveis a qualquer tipo de perturbação. Caso haja uma falta de energia durante um pequeno intervalo de tempo, todo o processo industrial pode ser alterado e o apagar de uma embarcação que trabalho no limite da segurança com as diversidades de mar e tempo, qualquer perda de energia torna a embarcação vulnerável. Dessa forma, é muito importante que a energia gerada seja livre de distúrbios.

Contudo, os valores associados aos parâmetros que caracterizam um sinal de tensão ou corrente em uma instalação elétrica podem ser alterados em função de muitos fatores, tais como: partida de motores, utilização de equipamentos eletrônicos, entre outros.

Em geral são produzidos quatro tipos de perturbações elétricas básicas em um sinal de tensão ou correntes: perturbações na amplitude da tensão; perturbações na frequência do sinal; desequilíbrios de tensão/corrente em sistemas trifásicos; perturbações na forma de onda do sinal.

As perturbações na amplitude da tensão ocorrem quando, sobre um sinal perfeitamente senoidal, são produzidas variações de tensão. Como exemplos dessas perturbações podemos citar: a) *sag* (afundamento): diminuição brusca da tensão, seguida por um restabelecimento após um curto intervalo de tempo (10ms a 1 min.); b) interrupção da alimentação: ocorre quando a tensão é inferior a um certo limite; c) sobretensão (*swell*): tensão com valor eficaz superior a um dado valor de tensão de alimentação (normalmente aceita-se como 10%); d) sobretensão transitória: é de curta

duração (máximo alguns mili segundos); e) flutuações de tensão: variações na amplitude do sinal, periódicas ou aleatórias (mais ou menos 10% em torno do valor nominal); f) cintilação (flicker): pode ser notada pela sensação visual de que a luminosidade está variando no tempo.

As perturbações na frequência do sinal são variações em torno do valor da frequência nominal e são causadas, geralmente, por problemas nos sistemas de geração e transmissão. Causam a atuação de protetores de sub frequência e o mau funcionamento dos motores geradores.

Os desequilíbrios de tensão ou corrente são produzidos nos sistemas trifásicos quando existem diferenças significativas entre os valores eficazes das tensões presentes na instalação. Eles ocorrem quando as intensidades que circulam pelas três fases não são iguais, provocando uma corrente diferente de zero no condutor neutro da instalação.

O resultado desta circulação de corrente é o sobreaquecimento nos componentes da instalação. Geralmente, admite-se nas instalações um desequilíbrio de corrente máximo de 10% e de tensão entre 2 e 3%.

Já as perturbações na forma de onda são deformações na forma de onda presentes nas instalações elétricas, o que resulta nas chamadas tensões e correntes harmônicas, tema abordado nesta monografia.

Segundo Srinivasan (1996) recomenda a análise da distorção da tensão de alimentação em estudos de fluxo de carga harmônico. O autor mostra, entre outros aspectos, que cargas puramente indutivas ou capacitivas, ou seja, cargas lineares, quando submetidas à tensão não-linear comportam-se como cargas não-lineares, pois suas impedâncias são dependentes da frequência.

Morrison (1997) avalia as distorções harmônicas em estabelecimentos comerciais e considera que, apesar destas distorções muitas vezes excederem níveis aceitáveis em normas, os impactos provocados no sistema decorrentes dessas cargas, apesar de pequenos, devem ser considerados em estudos por serem crescentes e por problemas de ressonâncias em casos de correção de fator de potência. Isso pode variar dependendo do nível de capacitância a ser chaveada.

Para Dell'Áquila; Lassandro e Zanchetta (1998) a produção harmônica por parte dos dispositivos de controle de velocidade dos motores de indução de velocidade variável deve ser reduzida ao nível de projeto com a utilização de equipamentos de

filtragem ativa ou passiva. Os autores afirmam que se deve ter uma normalização quanto à produção harmônica a partir destes dispositivos.

Este estudo, realizado por meio de pesquisa bibliográfica, tem como objetivo analisar a GERAÇÃO DE HARMÔNICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS. O mesmo está dividido em seis capítulos. Inicialmente, apresentamos a Introdução.

No Capítulo 2, versamos sobre o significado de harmônica e explicitamos as características gerais dos sinais harmônicos, tais como: espectro harmônico, taxa de distorção harmônica total (thd), fator de potência, $\cos \varphi$ e fator de crista, além de mostrar os medidores de harmônica e normas que regulam a injeção destas nos sistemas elétricos.

No capítulo 3 será abordado as cargas geradoras de harmônica, definindo o que são cargas lineares/não-lineares e citando assim alguns exemplos de cargas geradoras de harmônica mais comuns, como: máquina de solda elétrica, retificador com filtro capacitivo, controlador de velocidade de corrente AC e fonte de alimentação monofásica.

O Capítulo 4 trata sobre os efeitos causados pelas harmônicas nos dispositivos de iluminação, máquinas rotativas, equipamentos eletrônicos, transformadores, capacitores e relés de proteção.

No Capítulo 5 apresentamos prevenções contra as harmônicas através de dimensionamento de fase e neutro, dimensionamento do transformador, filtros de harmônicas (passivos, ativos e híbridos), transformadores de separação de 3^a, 5^a e 7^a harmônica e suas múltiplas.

No Capítulo 6 finalizaremos com a conclusão.

2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA DISTORÇÃO HARMÔNICA.

2.1 O que é harmônica

De acordo com (COGO, 1996), harmônicos são ondas de corrente ou tensão que possuem frequências múltiplas da frequência fundamental. As ondas de correntes ou tensões cujos formatos não são senoidais podem ser obtidas a partir de um somatório de ondas senoidais em diversas frequências. Estas ondas senoidais, nas diversas frequências, são chamadas de componentes harmônicos da onda original.

No sistema brasileiro, a fundamental é a frequência padrão 60 Hz, tendo assim como 2º harmônico uma onda senoidal de 120 Hz, 3º harmônico uma onda senoidal de 180 Hz e assim por diante.

A forma da onda ou da corrente de uma instalação que esteja sendo afetada por harmônicos tem uma forma de onda deformada com relação a uma onda fundamental.

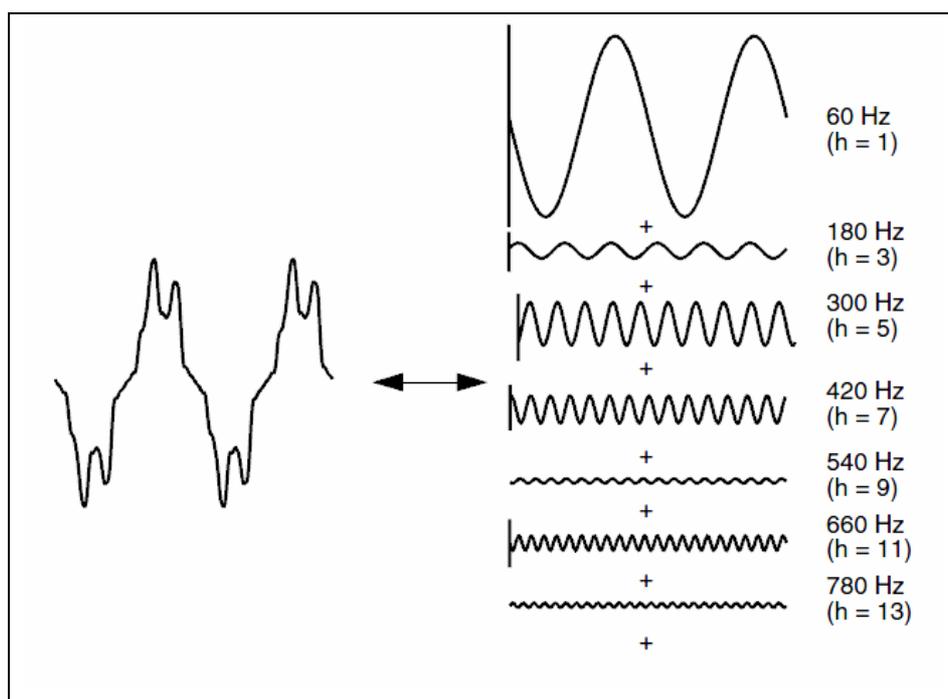


Figura 01- Componentes harmônicas da original (P. 170 Electrical Power Systems Quality – Second Edition)

O tipo de harmônica que existe em Sistema de frequência de 60Hz é classificada como harmônica de ordem 1. Existem dois tipos de harmônicas: ímpares e pares. As ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral e as pares existem nos casos de haver assimetria do sinal.

As seqüências poderão ser positivas, negativas ou nulas. Num motor trifásico as harmônicas de seqüências positivas tendem a fazer o motor girar no mesmo sentido da componente fundamental e com isso, provocando uma sobrecorrente nos enrolamentos, ocasionando aumento de temperatura e diminuição da vida útil do motor.

As harmônicas de seqüência negativa fariam o motor girar no sentido contrário ao da componente fundamental, freando o motor e causando também aquecimento.

As harmônicas de seqüência nula, ou homopolares, não provocam efeitos na rotação dos motores, mas somam-se algebricamente no condutor neutro, com isso podem ocorrer situações em que pode circular no condutor neutro uma corrente de terceira ordem que pode ser três vezes maior do que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase e isso ocasiona aquecimentos excessivos no condutor neutro, destruindo os bancos de capacitores e outros.

2.2 Espectro harmônico

O “espectro harmônico” permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representá-lo na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência com valor eficaz e defasagem.

Em instalações onde predomina sinais de corrente alternada, o espectro apresenta apenas harmônicas de ordem ímpar, enquanto que as harmônicas de ordem par são encontradas nas instalações com sinais deformados em corrente contínua.

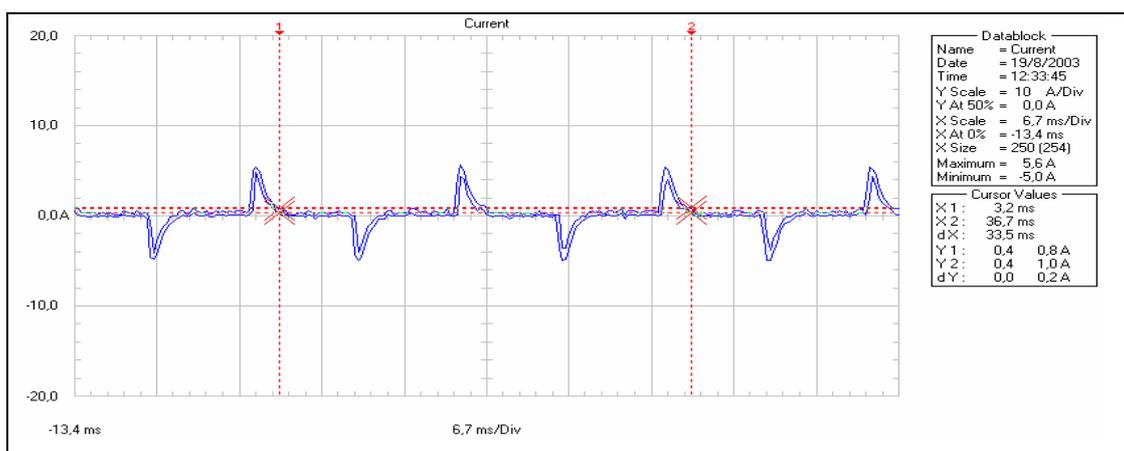


Figura 2.1: Forma de onda típica de corrente de lâmpada fluorescente

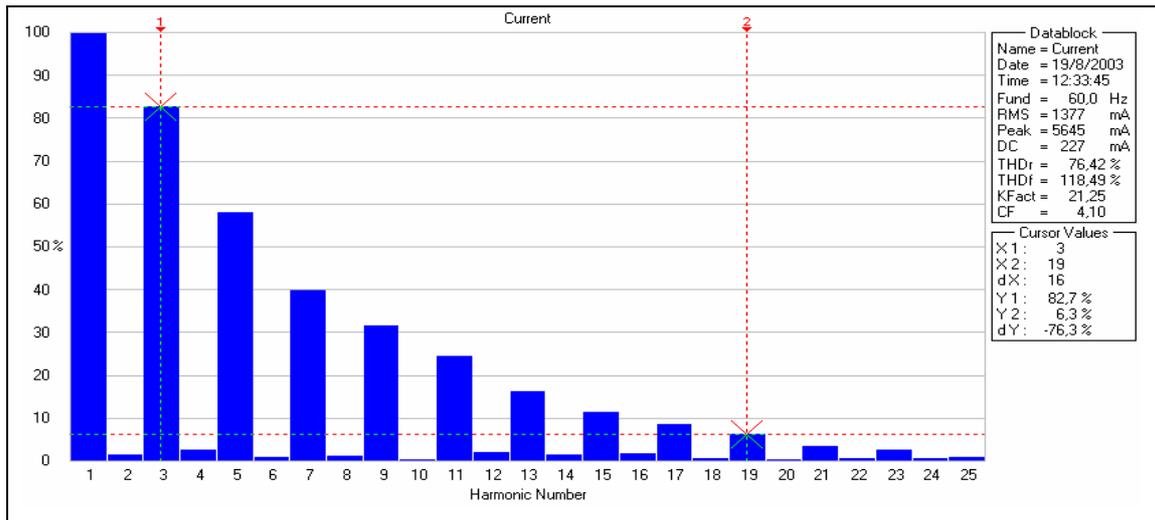


Figura 2.2: Decomposição harmônica da forma de onda de lâmpada fluorescente.

2.3 Taxa de distorção harmônica total (THD)

A THD é definida em consequência da necessidade de se determinar numericamente as harmônicas presentes em um dado ponto de da instalação. Existe duas formas de se qualificar a THD:

FORMULA DE CÁLCULO DE HARMÔNICAS

$$THDf = \sqrt{(I_{h2})^2 + (I_{h3})^2 + (I_{h4})^2 + \dots + (I_{hn})^2} / I_{h1} \times 100\%$$

$$THDr = \sqrt{(I_{h2})^2 + (I_{h3})^2 + (I_{h4})^2 + \dots + (I_{hn})^2} / \sqrt{(I_{h1})^2 + (I_{h2})^2 + (I_{h3})^2 + (I_{h4})^2 + \dots + (I_{hn})^2} \times 100\%$$

Nota: O mesmo acontece para as tensões.

Onde a THDr representa o grau de distorção harmônica total em relação ao sinal total, enquanto que a THDf indica a distorção harmônica total em relação à componente fundamental.

São definidos dois valores para THD, sendo uma por tensão (THDU) e outro para corrente (THDI), os quais indicam, respectivamente, o grau de distorção das ondas de tensão e corrente, quando comparadas com as senóides puras.

As distorções de correntes indicadas pela THDI é provocada pela carga e a distorção THDU é produzida pela fonte geradora devido à circulação de correntes distorcidas pela instalação.

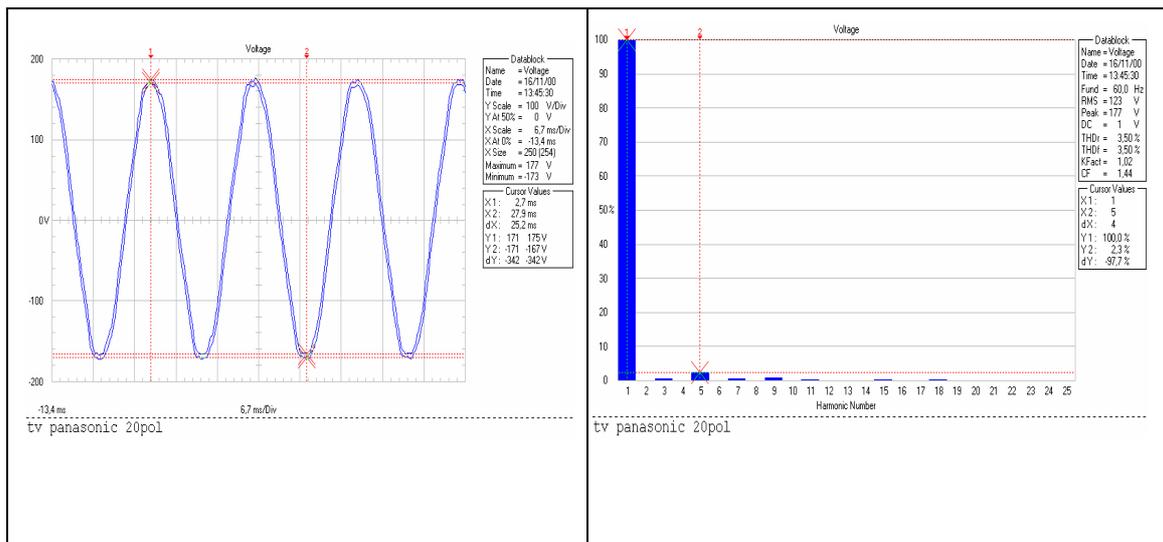


Figura 2.3: (a) Forma de Onda de Tensão, (b) Espectro Harmônico de Tensão.

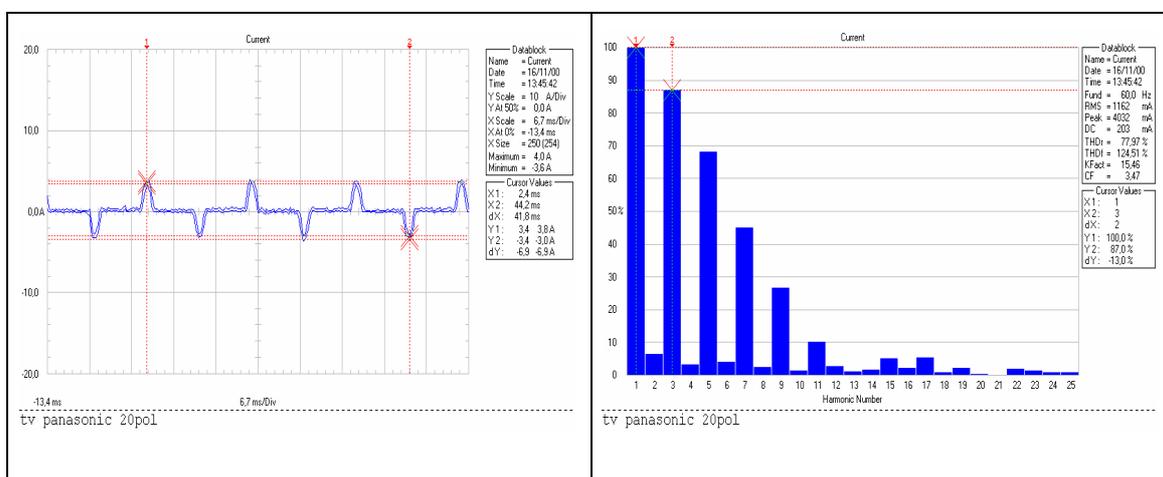


Figura 2.4 - (c) Forma de Onda de Corrente, (d) Espectro Harmônico de Corrente.
Figura (a)(b)(c)(d) - Características de Tensão e Corrente de um Televisor dueto.

2.4 Fator de potência e $\cos \varphi$

Fator de potência (FP) é uma razão entre a potência útil para realizar o trabalho real (potência efetiva) pela energia gerada (potência aparente) para um sinal periodico senoidal. Em outras palavras, fator de potencia é a razão entre potências que mede a porcentagem de energia despendida para o uso pretendido (potencia reativa). O $\cos(\varphi)$ e o fator de potência somente serão iguais se não existirem harmônica no Sistema, caso os sinais senoidais sejam puros.

Visando a uma fácil distinção entre as potências elétricas mencionadas, três unidades representativas são utilizadas para descrevê-las:

- potência aparente (Pa) – VA (Volt Ampère),
- potência efetiva (Pe) – W (Watt) e
- potência reativa (Pr) – VAr (Volt Ampère Reativo).

Em se tratando de circuito CA for trifásico o cálculo da potência deverá ser acrescido do fator “ $\sqrt{3}$ ”.

$$Fp = Pe (W) / Pa (VA)$$

O $\cos(\varphi)$ é a relação entre a potência ativa e a potência aparente definido para cada um das componentes harmônicas nominal (senoidais).

$$\cos(\varphi) = Phn (W) / Shn (VA)$$

Geralmente mede-se o $\cos(\varphi)$ da componente fundamental e o fator de potencia do sinal deformado (total). Neste caso, em circuitos que apresentam valores de fator de potencia e $\cos(\varphi)$ muito diferentes entre si possuem uma forte quantidade de harmônicas tanto de corrente quando de tensão. Isso pode causar aquecimento excessivo generalizados na instalação e principalmente sérias avarias de bancos de capacitores. Ao contraio, valores muito próximos de fatos de potencia e $\cos(\varphi)$ indicam a pequena presença de harmônicas nos circuitos.

| Distorção de corrente – THD _i (%) | Acréscimo de corrente (%) | Fator de potência total ² |
|---|------------------------------|---|
| 0 | 0,00 | 1 |
| 10 | 0,50 | 0,995 |
| 30 | 4,40 | 0,958 |
| 50 | 11,80 | 0,894 |
| 70 | 22,07 | 0,819 |
| 90 | 34,54 | 0,743 |
| 100 | 41,42 | 0,707 |
| 120 | 56,20 | 0,640 |
| 150 | 80,28 | 0,555 |

Tabela 2.1: Influência dos harmônicos no acréscimo da corrente e na redução do fator de potência.

2.5 Fator de crista

O fator de crista é definido como a relação entre o valor de pico da corrente ou da tensão e o valor eficaz de um sinal.

$$FC = I \text{ pico} / I \text{ rms} \quad FC = U \text{ pico} / U \text{ rms}$$

Quando o sinal é perfeitamente senoidal essa relação é igual a esta equação:

$$FC = \sqrt{2} = 1,414$$

Para o mesmo valor eficaz, a corrente de pico pode ser muito diferente, dependendo do grau de deformação da onda.

Para um sinal não senoidal, pode ser que seja inferior, seja superior a $\sqrt{2}$. Este fator é mais particularmente útil para atrair a atenção sobre a presença de valores de crista excepcionais em relação ao valor eficaz. O valor de crista nos equipamentos eletrônicos tem relação direta com o disparo de diodos e outros componentes.

Observando o gráfico da figura 2,5, somente com o sinal 1, o disparo de um diodo ocorreria em um tempo igual a 15 e com o sinal T (com harmônicas), o disparo ocorreria em um tempo igual a 13 (antes!).

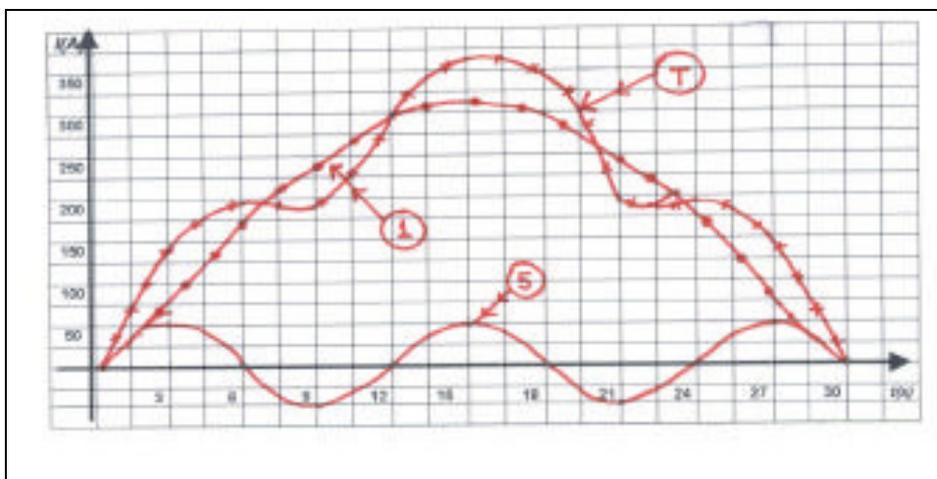


Figura 2.5: Gráfico do disparo de diodos.

| Sinal | Ip(A) | Ief(A) | FC | Obs.: |
|-------|-------|--------|------|------------|
| 1 | 310 | 220.2 | 1,41 | Senóide |
| 5 | 50 | 35,4 | 1.41 | Senóide |
| T | 360 | 222 | 1,62 | Distorcido |

Tabela 2.2: Relação fator de crista e forma da onda.

O fator de crista típico das correntes absorvidas pelas cargas não-lineares é muito superior a $\sqrt{2}$: pode tomar valores iguais a 1,5 ou 2, chegando até 5 nos casos críticos. O fator de crista com nível elevado significa sobrecargas específicas considerável. Estas sobrecargas, detectadas pelos dispositivos de proteções, podem ser a origem dos disparos intempestivos dos mesmos.

2.6 Medição de Harmônicos

As medições são essenciais para a identificação de componentes harmônicos em sistemas elétricos. Devem ser realizadas as medições da tensão e corrente em vários pontos do sistema possibilitando a análise de harmônicos. Estas medições precisam ser realizadas cuidadosamente para garantir uma reprodução fiel das componentes harmônicas a serem medidas.

A medição de tensão e corrente à frequência fundamental não apresenta desafios para os instrumentos utilizados atualmente, mas quando se deseja medir estas grandezas elétricas para analisar sua composição harmônica, ou seja, à frequência fundamental e suas múltiplas, é importante que a instrumentação utilizada seja capaz de reproduzir com fidelidade tensões e correntes em todas as faixas de frequência de interesse.

Os principais tipos e sistemas de medição estão descritos a seguir:

2.6.1 Multímetros Digitais

A princípio, as medições realizadas com multímetro digital pode fornecer informações úteis sobre o que está ocorrendo na rede de alimentação.



Figura 2.6: Multímetro Digital. Fonte:

(http://2.bp.blogspot.com/-kCTh0qQ_ws4/TjraPYMz1yI/AAAAAAAAAIA/34Vf3ndNyco/s1600/rei.jpg)

Com esse instrumento, porém, apenas três tipos de problemas podem ser detectados: subtensões, sobretensões, e desbalanceamento.

Talvez essas informações não sejam suficientes para chegar-se a um diagnóstico preciso. Temos que ter um cuidado com as características de operação do multímetro. A maioria desses é calibrada para fornecer valores eficazes (RMS), porém, através de diferentes métodos.

O primeiro deles é o método de medição por pico, onde o instrumento lê o pico do sinal e divide por 1,414 para obter o valor RMS.

O segundo é o método referencial, onde o instrumento retifica o sinal, e multiplica o resultado da tensão por uma constante $K = 1,1$. Esse valor é usado para todas as formas de onda.

O terceiro, e mais eficiente, é o multímetro true RMS, que divide o sinal em amostras, período por período, e, então, extrai a raiz quadrada do resultado.

2.6.2 Osciloscópios

O osciloscópio tem uma eficiência maior que o multímetro na análise da rede elétrica, uma vez que o próprio sinal pode ser visualizado na tela e proporciona o que de fato está ocorrendo com a forma de onda.

Alguns osciloscópios digitais podem armazenar e imprimir via computador a forma de onda para uma melhor análise.



Figura 2.7: Osciloscópio Digital. Fonte: (<http://www.lami.pucpr.br/engcomp/laboratorios/imagens/OciloscopioTDS210.jpg>)

2.6.3 Analisadores de qualidade de Energia

Esse instrumento é capaz de medir variações de distúrbios desde muito pequenos (nanos segundos) a muito longos (vários dias), bem como registrar as ocorrências e imprimi-las em papel ou qualquer mídia para computador.

Basicamente podemos encontrar dois tipos no mercado de analisadores: convencional e análise gráfica.

O convencional pode apresentar apenas um resumo das principais ocorrências, tais como: queda de tensão temporária (sags), elevação de tensão (swell), transientes (distúrbio na curva senoidal, resultando em rápido e agudo aumento de tensão), harmônicos, fator de potência etc. Porém, devido ao pequeno número de amostras, muitos distúrbios podem ocorrer sem serem detectados, visto que este tipo de instrumento analisa a rede em intervalos de tempo. Caso o fenômeno ocorra entre os tempos das amostras, ele não será detectado.

O analisador gráfico funciona de modo diferente, e monitora a rede em tempo real (sem intervalo). Claro que seu hardware (rapidez de processamento, e espaços de memória) é mais complexo que o primeiro tipo.

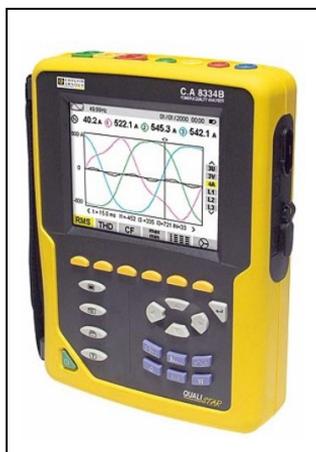


Figura 2.8: Analisador Gráfico(http://www.jroma.pt/images/qualistar_3.jpg)

2.5.4 Analisadores de Espectro

Os analisadores de espectro permitem avaliar os harmônicos, realizar a análise espectral, da distorção total (THD), porcentagem da fundamental (ou RMS) para cada harmônico individual.

O Analisador Espectral é um equipamento de medição cuja utilização principal está na determinação do conteúdo harmônico de tensões ou correntes elétricas distorcidas. A tensão ou corrente, na forma de um sinal analógico é transformada em pontos digitalizados que são armazenados em memória RAM. Estes pontos são extraídos de um ciclo da frequência fundamental e permitem a identificação discreta da onda analisada com grande precisão. A onda armazenada é então processada através da

técnica FFT - Fast Fourier Transform, utilizando software implementado em microprocessador.



Figura 2.9: Analisador Espectral (http://www.rohde-schwarz.com.br/live/rs/mediadb/psfile/image/38/eslemiimg_4bc8688d765b6.jpg)

Os resultados, correspondentes as componentes harmônicas até a 50ª ordem e outras informações relevantes ao tipo de análise, são obtidos com grande precisão e impressos em relatório de saída. Para a impressão pode-se utilizar uma mini-impressora alfanumérica cuja impressão pode ser feita em papel comum. Quanto ao sinal amostrado, este pode ser único, correspondendo a um ciclo da necessidade do operador ou pode ser repetitivo, em período pré-programado.

2.7 Normas que regulam a injeção harmônica

Os efeitos que as distorções harmônicas de tensão e de corrente causam nos equipamentos elétricos podem mudar a operação do sistema e caracterizam-se como fenômenos prejudiciais à qualidade da energia elétrica. Com o intuito de manter-se a convivência harmoniosa entre equipamentos perturbadores e equipamentos sensíveis, faz-se necessário o estabelecimento de limites e normas para controle de tais fenômenos.

Em 1975, a norma europeia EN50006 foi apresentada pela CENELEC (*Commission Européen pour la Normalisation Eléctrique*) e substituída, em 1982, pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) de número 555 e revisada em 1991.

Os principais padrões, atualmente, são o europeu IEC-61000-3-2 e IEC-61000-3-4 e o americano IEEE-519.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT é o órgão responsável pela elaboração de normas em geral (Norma Brasileira – NBR). A fim de compatibilizar muitas das normas existentes internacionalmente, a ABNT é associada ao IEC. Existem também documentos emitidos pelo Grupo Coordenador para Operação Interligada – GCOI e pelo Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos – GCPS que contêm recomendações sobre procedimento e limites de distorção harmônica, desequilíbrio de tensão e cintilação, principalmente sobre estudos desenvolvidos no setor industrial para consumidores com cargas especiais.

3. CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICA

3.1 Cargas lineares e não-lineares

Em um sistema de potência idealmente "limpo", tanto a forma de onda da corrente como a da tensão são puramente senoidais. Na prática, correntes não-senoidais resultam de correntes que passam por cargas que não se relacionam linearmente com a tensão aplicada sobre elas. Em um circuito simples, que possui apenas elementos lineares (resistores, indutores e capacitores), a corrente que flui é proporcional à tensão aplicada (em uma frequência particular). Portanto, se uma tensão senoidal é aplicada, uma corrente senoidal irá fluir, conforme ilustrado na figura 3.1 abaixo.

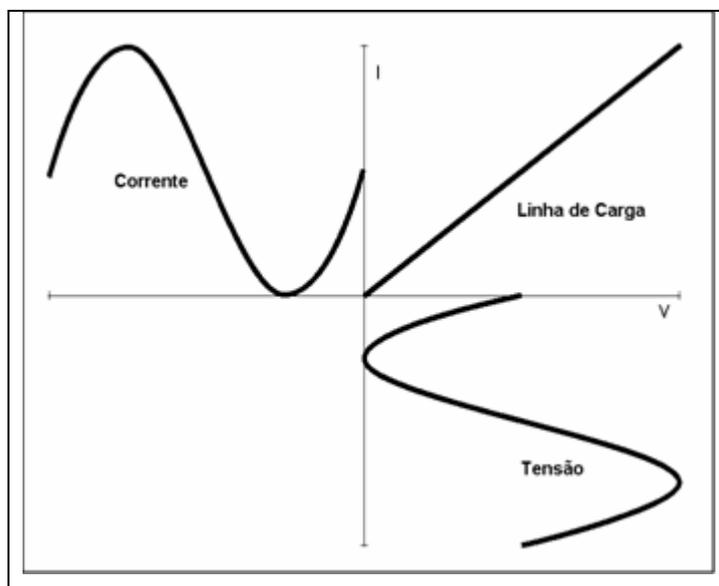


Figura 3.1: Relação entre tensão e corrente num circuito formado por elementos lineares (HERRERA, 2001).

A figura 3.2 apresenta uma situação em que a carga é uma ponte retificadora de onda completa e um capacitor. Neste caso, a corrente flui somente quando a tensão suprida ultrapassa a tensão armazenada no capacitor, isto é, próximo ao valor de pico da tensão senoidal, como é mostrado pela forma da linha de carga.

Tendo em vista que qualquer onda periódica pode ser decomposta em uma somatória de senóides com uma frequência fundamental mais um certo número de harmônicos, a onda distorcida da figura 3.2 pode ser representada pela fundamental mais uma porcentagem de segundo harmônico, mais uma porcentagem do terceiro harmônico e assim por diante, até o h-ésimo harmônico. Para uma onda simétrica (em

que o ciclo negativo e o positivo têm a mesma forma e amplitude), os harmônicos pares são iguais a zero e apesar de relativamente raros, aparecem em situações em que a retificação de meia onda é utilizada.

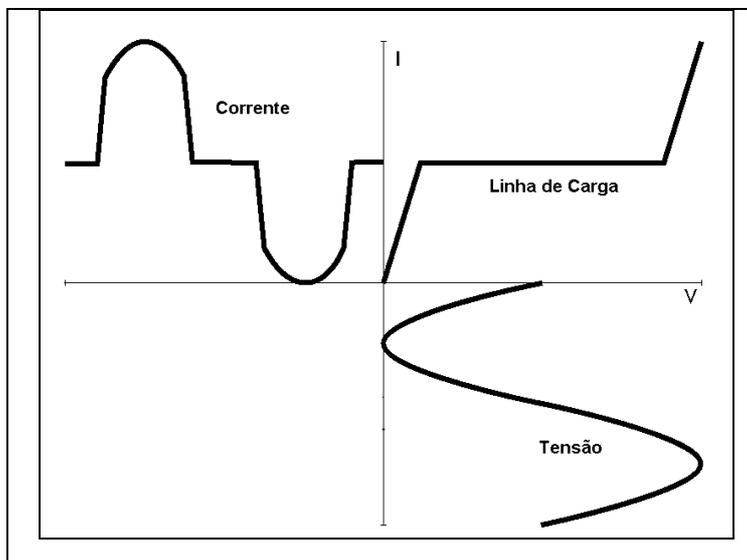


Figura 3.2: Forma de onda de corrente distorcida num circuito formado por elementos não-lineares (HERRERA, 2001).

As cargas não-lineares são classificadas em três categorias de acordo com a natureza da distorção harmônica por elas provocadas; SILVA (1997):

CATEGORIA 1 - Equipamentos com característica operativa de arcos voltaicos, tais como os fornos a arco, máquinas de solda, iluminação fluorescente e outros. A natureza da distorção da corrente é oriunda da não linearidade do arco voltaico.

CATEGORIA 2 - Equipamentos de núcleo magnético saturado, tais como reatores e transformadores de núcleo saturados. A natureza da distorção da corrente é oriunda da não linearidade do circuito magnético.

CATEGORIA 3 - Equipamentos eletrônicos, tais como inversores, retificadores, UPS, televisores, fornos de microonda, computadores e outros. A natureza da distorção da corrente é oriunda da não linearidade dos componentes eletrônicos.

3.2 Exemplo de cargas geradores de harmônico

Diante das composições harmônicas, é importante que se saiba alguns dos grandes vilões geradores da harmônica mais comuns no dia a dia na área naval, industrial e inclusive na área residencial.

3.2.1 Máquinas de soldar elétrica

Equipamento muito utilizado em embarcações e que exemplifica a categoria 01. São cargas que apresentam o consumo instável de energia e sobre apenas uma fase. A forma de onda da corrente gerada pela máquina de soldar tem certa semelhança com a forma de onda da fonte de alimentação, porém o tempo de consumo de energia é maior.

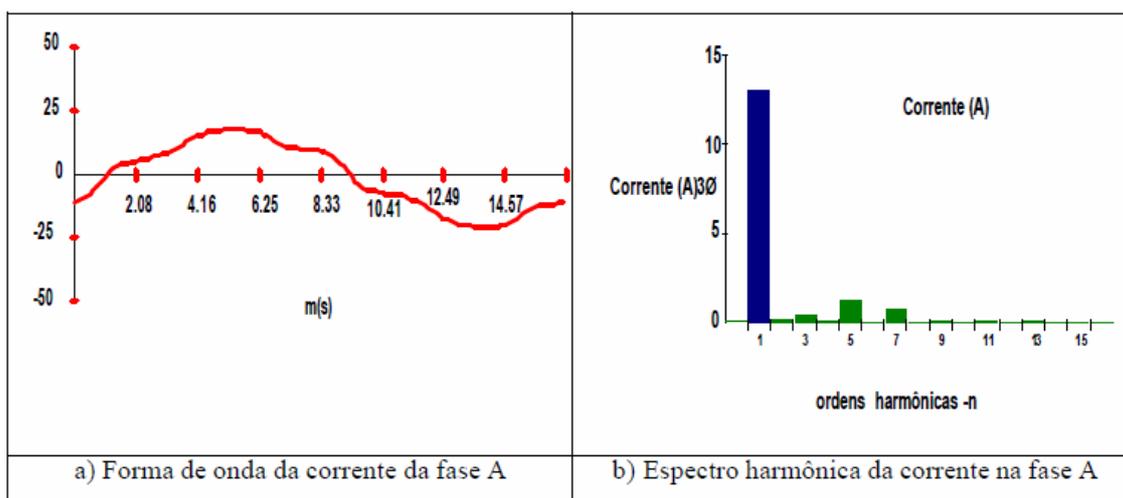


Fig. 3.3: Forma de onda e respectivo espectro harmônica da corrente na fase A - máquina solda ESM-43 .

A distorção harmônica total da corrente foi de $THDi = 12,46\%$ e a distorção harmônica total da tensão foi de $THDu = 3,99\%$.As ordens harmônicas presentes são as de 3a , 5a e 7a . A harmônica de 5a ordem apresenta um valor de 1,25% da fundamental, enquanto a de sétima ordem é de 0,75%. A harmônica de 3a ordem é aquela que apresenta a menor amplitude entre as presentes, ou seja, é da ordem de 0,50% da fundamental.

As correntes nas outras duas fases apresentam comportamentos semelhantes.

3.2.2 Retificadores com filtro capacitivo

A grande parte dos equipamentos eletrônicos possui um estágio de entrada constituído por um retificador monofásico com filtro capacitivo. Este tipo de circuito produz na rede corrente de forma impulsiva, centrados aproximadamente no pico da onda senoidal. O circuito é mostrado na figura 3.4. Na figura 3.5 mostra as formas das ondas da tensão e da corrente, obtidas por simulação, bem como o espectro da corrente.

Nota-se a grande amplitude das harmônicas, produzindo, certamente, uma elevada THD.

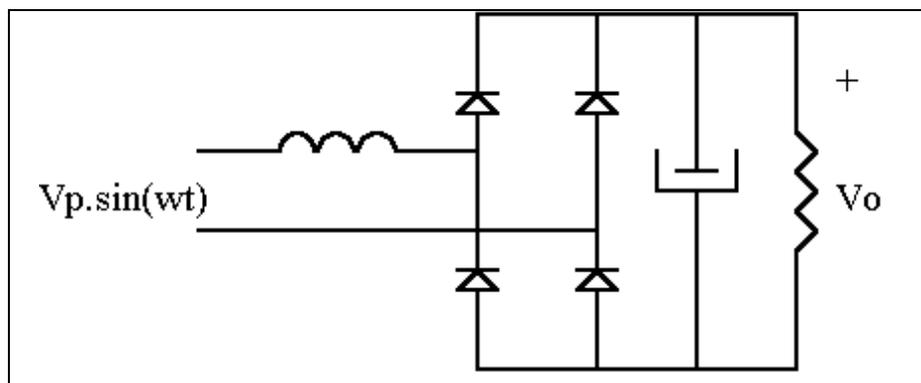


Figura 3.4: Retificador monofásico com filtro capacitivo.

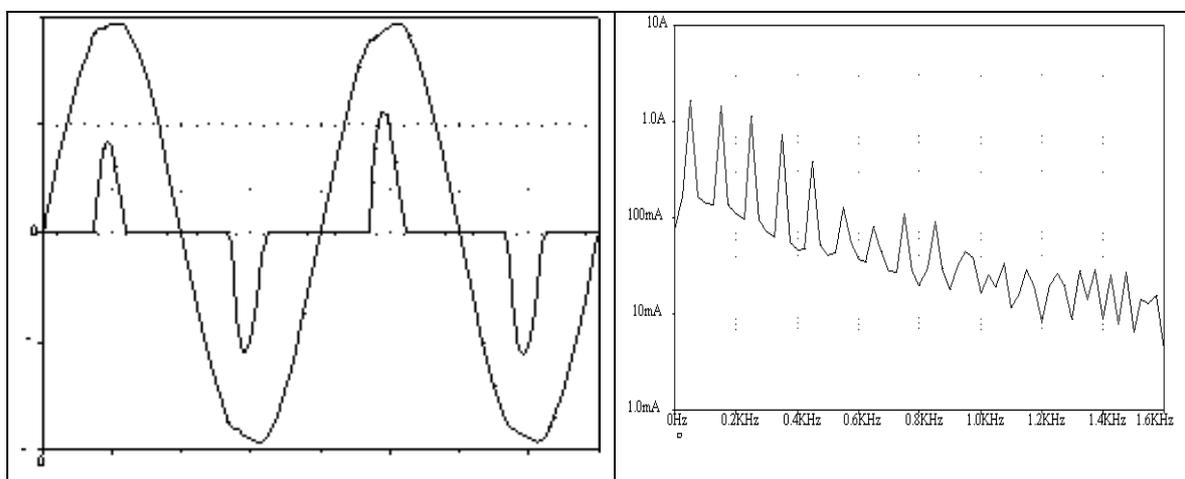


Figura 3.5: (a) Corrente de entrada e tensão de alimentação de retificador alimentando filtro capacitivo. (b) Espectro da corrente.

3.2.3 Controlador de velocidade de corrente AC.

Os variadores de velocidade, que conquistaram o mercado nos últimos anos, principalmente nas partidas de motores, com economia de energia bem como aumentando a vida útil dos motores.

A chave de partida a estado sólido consiste de um conjunto de pares de tiristores (SCR) ou combinações de tiristores/diodos, para cada fase do motor. O ângulo de disparo de cada par de tiristores é controlado eletronicamente para aplicar uma tensão variável no motor durante a aceleração. Este comportamento é, muitas vezes chamado de partida suave (soft-starter). CONTROLE DE VELOCIDADE MOTORES CA-SENAI/Tubarão – 2004.

Os sistemas de controle menos complexos que contam com o estabelecimento da relação tensão/frequência e limitação de corrente, ou controle por meio da determinação do escorregamento, são geralmente conhecidos como controladores escalares. No sistema de controle vetorial, a configuração da forma de onda da corrente pode ser feita por um sistema conhecido como controle da corrente de histerese. A figura 3.6 ilustra o conceito, com os dispositivos do inversor sendo chaveados para manter a corrente dentro de uma banda acima ou abaixo da corrente desejada. Quando a corrente atinge a banda superior, o inversor desliga e, quando a corrente cai para a banda inferior, ele é ligado.

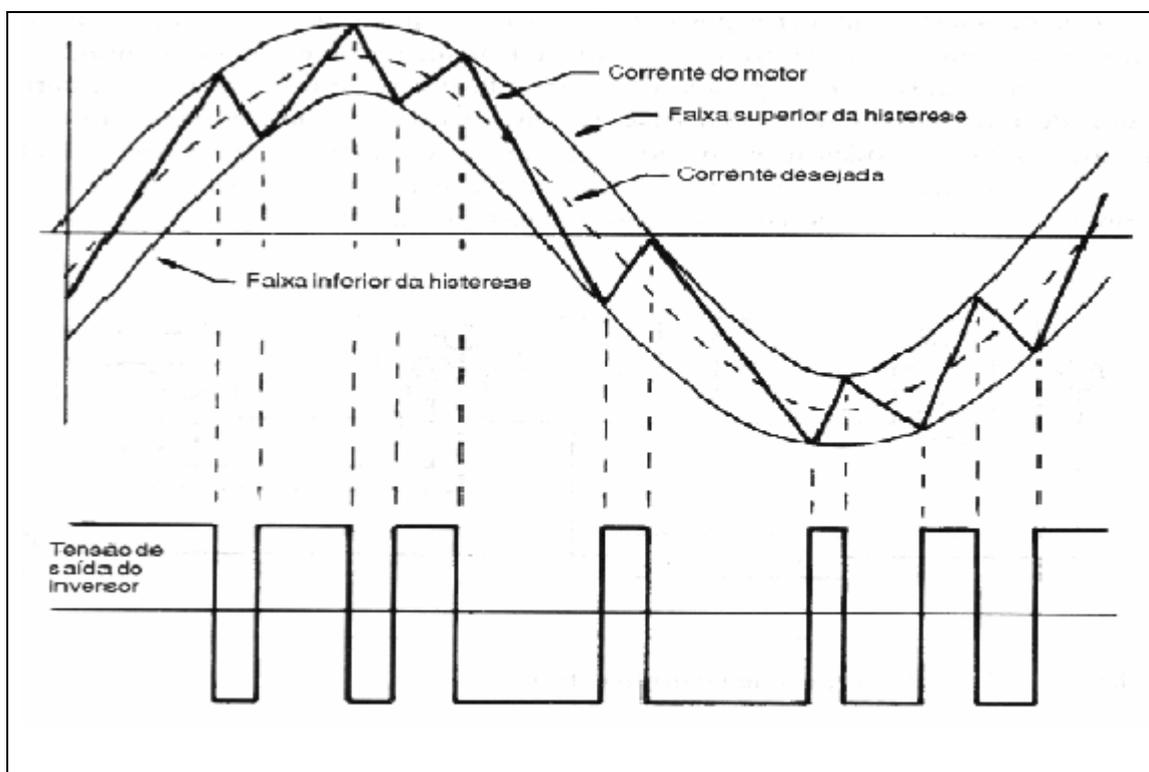


Figura 3.6: Inversor do tipo controle de histerese pag 19 senai/tubarão 2004.

O variador de velocidade é um dos principais poluidores, com alto conteúdo de harmônicas, podendo alcançar distorções de corrente de 100%, significando dizer que o somatório das harmônicas supera o valor da fundamental.

Para Dell'Áquila; Lassandro e Zanchetta (1998) a produção harmônica por parte dos dispositivos de controle de velocidade dos motores de indução de velocidade variável deve ser reduzida ao nível de projeto com a utilização de equipamentos de filtragem ativa ou passiva. Os autores afirmam que se deve ter uma normalização quanto à produção harmônica a partir destes dispositivos.

3.2.4 Fonte de alimentação monofásica

É utilizada em instalações elétricas em geral. Já que equipamentos eletrônicos possuem sua própria fonte de alimentação. Tratam se de fontes comutadoras, de baixo valor financeiro, que estão presentes em computadores, impressoras, aparelhos de fax, entre outros.

Os equipamentos eletrônicos são fontes de harmônicas que corresponde os equipamentos monofásicos que produzirão distorção excessiva. A potência em corrente contínua fornecida para os equipamentos eletrônicos modernos e equipamento de escritório baseado em microprocessadores é usualmente obtido a partir de pontes retificadoras monofásicas a diodo com retificação de onda completa. A percentagem de carga que contém fontes de alimentação eletrônica está aumentando rapidamente, com a utilização dos computadores pessoais em todos os setores comerciais.

Dois tipos principais de fontes de alimentação monofásicas são comuns. As tecnologias antigas empregam métodos de controle de tensão no lado de CA através de transformadores, para reduzir as tensões aos níveis requeridos pela barra CC. A indutância do transformador provê em efeito benéfico pela suavização da forma de onda da corrente de entrada, reduzindo o conteúdo harmônico. Tecnologias mais novas, fontes de alimentação chaveadas, empregam técnicas de conversão CA/CC para obter uma saída CC suave com poucas componentes harmônicas. A ponte retificadora é diretamente ligada à linha CA, eliminando o transformador. Isto resulta em uma tensão CC grosseiramente regulada no capacitor. Esta tensão CC é então convertida novamente para CA em uma frequência muito alta por um circuito chaveador e retificada novamente. Computadores pessoais, impressoras, copiadoras e muitos outros equipamentos eletrônicos monofásicos empregam hoje, quase universalmente, fontes de alimentação chaveadas. As principais vantagens são o pequeno peso, dimensões compactas, operação eficiente e a não necessidade de transformador podendo tolerar uma grande variação na tensão de alimentação.

Devido a não existência de indutância significativa no lado de CA, a corrente de entrada para a fonte de alimentação vem em pulsos curtos à medida que o capacitor restabelece sua carga em cada meio ciclo, gerando harmônica significativa.

4. EFEITOS CAUSADOS PELAS HARMÔNICAS

Um estudo sobre os efeitos das distorções harmônicas sobre os componentes do sistema de energia elétrica faz-se necessário devido ao emprego cada vez mais crescente de cargas com características não lineares. Os problemas causados pelas harmônicas podem ser notados de forma visual, por medidores de temperatura ou um equipamento especial.

Os principais equipamentos afetados, de maneira geral, pelas harmônicas na rede industrial são: condutores, iluminação, máquinas rotativas, equipamentos eletrônicos, transformadores, capacitores e relés de proteção. Através dos mesmos serão mostrada os efeitos causados pelas harmônicas.

4.1 Condutores

Correntes harmônicas em condutores poderão provocar sobreaquecimento se comparados com o aquecimento provocado apenas pela fundamental da corrente. Basicamente existem dois fenômenos físicos que se manifestam simultaneamente nos cabos de alimentação, os chamados Efeito Skin e o Efeito de Proximidade.

O Efeito Skin, ou Efeito Pelicular, é o resultado da não uniformidade da indutância própria através das secções retas do condutor. Como o centro do condutor é enlaçado por mais linhas de fluxo que a sua superfície, sua indutância (reatância) nesse ponto é maior que na superfície fazendo com que a corrente circule em menor densidade no centro do condutor, ou seja, ocorre uma redistribuição de corrente no condutor, devido à blindagem da porção mais interna do condutor para a camada mais externa em função da frequência da rede.

O efeito de proximidade é devido ao campo magnético dos condutores próximos distorcendo a distribuição de corrente nos condutores adjacentes. Em cabos com condutores circulares, o efeito de proximidade é menos pronunciado que o efeito pelicular.

4.2 Iluminação

A lâmpada incandescente poderá ter uma diminuição na sua vida útil quando alimentada por tensões distorcidas, pois estas lâmpadas são sensíveis aos níveis de tensão a elas aplicados. Se a tensão de alimentação for maior que a tensão nominal devido aos harmônicos, a elevação da temperatura no filamento reduzirá a vida útil.

Para lâmpadas de descarga, o fenômeno mais conhecido devido aos harmônicos é um ruído audível. Os capacitores agregados em reatores eletromagnéticos, corrigindo o fator de potência, geram uma ressonância. Esta ressonância é comum na faixa de 75-80 Hz, não interagindo, portanto, com o sistema de alimentação.

4.3 Máquinas rotativas

Tensões não senoidais aplicadas às máquinas elétricas podem causar sobreaquecimento, torques pulsantes ou ruídos. Controladores de velocidade são alimentados por inversores que podem produzir harmônicos, levando a uma grande distorção de tensão.

Um problema que surge na presença de harmônicos é um grande ruído audível se comparado com uma excitação puramente senoidal. Os harmônicos também produzem um fluxo de distribuição resultante no entreferro que pode causar ou contribuir para dois fenômenos: “cogging” (recusa a partida suave) e “crawling” (grande escorregamento).

4.4 Equipamentos eletrônicos

Há várias formas em que as distorções harmônicas afetam os equipamentos eletrônicos. O primeiro efeito a ser considerado são as múltiplas passagens de tensão pelo zero. Em alguns equipamentos eletrônicos, a passagem pelo zero da tensão fundamental é utilizada para contagens temporais. Entretanto, distorções harmônicas causam passagens pelo zero mais frequente, o que prejudica o correto funcionamento daqueles equipamentos. Qualquer equipamento que depende do sincronismo de seu contador com a passagem pelo zero pode ser considerado vulnerável às distorções harmônicas.

Semicondutores mudam seu estado no cruzamento da tensão pelo zero a fim de reduzir interferências eletromagnéticas e correntes de “inrush”. Múltiplos cruzamentos podem mudar o estado dos semicondutores diversas vezes e acarretar na operação inadequada do equipamento eletrônico.

Fontes eletrônicas de potência usam o pico da tensão para manter o capacitor de filtro em plena carga. Dependendo da frequência harmônica e sua fase angular em relação à fundamental, a distorção harmônica de tensão irá suavizar o pico da tensão, diminuindo-o. Esta diminuição provoca uma maior susceptibilidade do equipamento alimentado por esta fonte às quedas de tensão (sags).

Computadores e afins (exemplo: Controladores lógicos programáveis) suportam, no máximo, uma distorção harmônica total de tensão de 5%, limitando os harmônicos individuais em 3%. Níveis altos de harmônicos (THDU > 5%) resultam em dados incorretos e desempenhos imprevisíveis. Assim, muitos destes dispositivos são providos de filtros de linha.

4.5 Transformadores

As perdas provocadas por harmônicos contribuem para aumentar a quantidade de perdas no transformador, fazendo com que eleve sua temperatura e diminua sua vida útil.

Outros problemas advindos dos harmônicos seriam ressonâncias entre a indutância do transformador e capacitores presentes no sistema elétrico, estresses na isolamento mecânica devido ao aumento na temperatura e possíveis vibrações no núcleo, chegando a ser audíveis.

Analisando algumas perdas, as perdas “joulicas” nos enrolamentos serão devido ao efeito pelicular provocado pelas correntes harmônicas, dissipando energia em forma de calor. As perdas devido às correntes parasitas crescerão com o quadrado da corrente e o quadrado da frequência. Perdas devido ao fluxo de dispersão crescerão com aumento da frequência.

Dividindo os harmônicos em harmônicos de tensão e corrente, as correntes harmônicas irão causar perdas no cobre e aumentos no fluxo de dispersão, enquanto as tensões harmônicas aumentarão as perdas no ferro.

4.6 Capacitores

A maior preocupação em relação a capacitores é o possível surgimento de ressonâncias com o sistema elétrico. Este efeito causa sobretensões e sobrecorrentes que afetam tanto o sistema elétrico, como os capacitores.

A reatância de um capacitor diminui com o crescimento da frequência, fazendo com que o capacitor seja um caminho preferencial de correntes harmônicas. Este fenômeno aumenta o aquecimento e stress no seu dielétrico.

O resultado do aumento do aquecimento e do stress no dielétrico é a diminuição da vida útil do capacitor.

4.7 Relés de proteção

Formas de onda distorcidas afetam o desempenho de relés de proteção, causando uma operação indevida ou mesmo a não operação dos mesmos quando necessário. Uma onda senoidal acrescida de harmônicos altera o pico de corrente, diferenciando do que o relé esperaria por presumir que trabalhará com uma onda senoidal. O ângulo das harmônicas em relação a fundamental influencia também no desempenho do relé.

Entretanto, é difícil definir como será o desempenho de um relé devido a uma onda distorcida, pois cada relé tem uma resposta diferente a este fenômeno. Relés de diferentes fabricantes têm respostas diferentes assim como, em algumas vezes, relés do mesmo fabricante e modelo.

Num ambiente distorcido, os relés podem falhar quando ocorrer uma falta no sistema elétrico ou mesmo podem operar quando não houver nenhuma falta. Relés dependentes de pico de corrente ou passagem por zero, não irão operar adequadamente com uma onda distorcida.

Os relés tendem a operar mais lentamente ou com valores de correntes mais altos na presença de harmônicos.

| EQUIPAMENTO | EFEITO DEVIDO À PRESENÇA DE HARMÔNICA |
|--------------------------|--|
| Condutores | - Sobreaquecimento. - Diminuição na capacidade de condução de corrente. |
| Iluminação | - Diminuição da vida útil em lâmpadas Incandescentes. - Ruídos audíveis em lâmpadas fluorescentes |
| Máquinas rotativas | - Torque pulsante - Ruído audível - Sobreaquecimento - Perda de vida útil no isolamento |
| Equipamentos eletrônicos | - Maior susceptibilidade a sags. - Perda de sincronismo em contadores digitais - Imagens distorcidas nos tubos catódicos |
| Transformadores | - Aumento nas perdas nos enrolamentos, ferro e componentes - Sobreaquecimento |
| Capacitores | - Ressonância - Perda de vida útil do dielétrico |
| Relés de proteção | - Operação indevida - Inoperância |

Tabela 4: Efeito de harmônicos em componentes do sistema elétrico.

5. PREVENÇÃO CONTRA AS HARMÔNICAS

A presença de harmônicas é inevitável, a única forma que se tem para mitigar seus efeitos é preparar o sistema através do dimensionando da instalação e utilizando de dispositivos que realizam a filtragem de harmônica, reduzindo assim o efeito delas nos sistemas elétricos.

5.1 Dimensionamento de fase e neutro

Quando é feito o dimensionamento da bitola do cabo da instalação elétrica deve ser levado em consideração à presença de harmônicas.

Primeiramente é feito o dimensionamento sem harmônicas. Onde são levados em consideração seis critérios de dimensionamento, de acordo com a NBR 5410, são elas: seção mínima, capacidade de corrente, queda de tensão, sobrecarga, curto circuito e contato indireto (para esquemas TN).

Para dimensionar esses critérios é necessário definir a corrente de projeto (I_B). Na prática essa é a maior corrente eficaz prevista. Essa corrente de projeto é a corrente nominal afetada por todos esses fatores imagináveis em uma instalação, por exemplo, fator de demanda e fator de reserva. Obtida essa corrente é necessário o uso da tabela da capacidade de condução de cada cabo, onde se calcula a queda de tensão e a escolha do dispositivo de proteção contra sobrecarga.

Antes os cálculos eram feitos dessa forma. No entanto, quando houver harmônicas, elas devem ser consideradas para efeito de cálculo do I_B . Também, dependendo da ordem da harmônica, quando o circuito é trifásico com neutro, a corrente do neutro que teoricamente seria próxima de zero poderá alcançar valores, até três vezes, maior do que a corrente fundamental da fase.

O calculo da corrente de projeto é feita da seguinte forma para sistemas trifásicos, na fase:

$$I_B = \sqrt{[(I_1)^2 + (I_2)^2 + (I_3)^2 + (I_4)^2 + \dots + (I_{n-1})^2 + (I_n)^2]}$$

Já a corrente que passará pelo neutro, influenciada pelas correntes de 3ª ordem e suas múltiplas é dada por:

$$I_{\text{neutro}} = (1/f) \times I_B \times P/100 \times 3(I_{\Sigma} \text{ (corrente de 3ª ordem)}) / \cos(\varphi)$$

Onde,

I_B é a corrente de projeto do circuito

P é porcentagem da harmônica de 3ª ordem (tabela 45 da NBR 5410/97)

f é o fator de correção (tabela 45 da NBR 5410/97)

5.2 Dimensionamento Do Transformador

A potencia nominal e o calor que um transformador dissipa é composto por cargas lineares que, por definição, não produzem harmônica. No entanto, se pelo transformador circular uma corrente que contenha harmônicas, ele sofre um aquecimento adicional, pode poderá levá-lo a uma avaria. O fator K é um fator de desclassificação definido para os transformadores que indica quanto se deve reduzir a potencia máxima de saída quando existirem harmônicas.

A expressão matemática mais usada para definir o fator K é dada por:

$$K = (I_{\text{pico}}/I_{\text{rms}}\sqrt{2}) = FC/\sqrt{2}$$

Já a máxima potência fornecida do transformador é dada por:

$$S_{\text{máx}} = S_{\text{nom}}/K$$

Para utilização dessa expressão, determina-se por medição o valor de pico e a corrente eficaz em cada fase do secundário do transformador. Sendo assim, como exemplo, se o fator K determinado em certo transformador de potencia nominal 1000 kVA vale 1.2, então a máxima potencia que esse equipamento poderia fornecer sem que houvesse o seu sobreaquecimento seria igual a $1000/1,2=833\text{kVA}$.

5.3 Filtros de harmônicas

Os filtros de harmônicas têm a função de garantir a distribuição elétrica “limpa”, com baixo THDI (distorção de harmônico de corrente), através da redução ou até mesmo a eliminação das harmônicas. Bem como obter THDU (distorções harmônicas de tensão) aceitáveis, garantindo uma alimentação senoidal.

Existem normas existentes que devem ser garantidos, para isso é necessário o preparo do sistema, como será citado.

A norma IEC 61000-3-2 estabelece as exigências sobre harmônicas que devem ser atendidas pelos equipamentos que consomem menos de 16 A por fase em redes de 220 V a 415 V.

A relação entre valor eficaz e valor máximo é dada por:

$$I_{[\text{rms}h]} [\text{A rms}] = (I_{\text{mh}} [\text{A max}] / \sqrt{2}$$

O valor efetivo da soma quadráticas do valor eficaz de cada harmônica é dada por:

$$I_{[\text{rms}h]} [\text{A rms}] = \sqrt{[(I_{\text{rms}1})^2 + (I_{\text{rms}2})^2 + (I_{\text{rms}3})^2 + \dots + (I_{\text{rms}h})^2]}$$

A norma IEEE 519-2 recomenda explicitamente os limites de THDI a serem respeitados nos diversos pontos de uma instalação elétrica, conforme a tabela a seguir.

| Máxima corrente harmônica em porcentagem da corrente de carga (I_0 – valor da componente fundamental) | | | | | | |
|---|-----|---------------------|---------------------|---------------------|----------|----------|
| Harmônicos Ímpares | | | | | | |
| I_{cc}/ I_0 | <11 | $11 \leq h \leq 17$ | $17 \leq h \leq 23$ | $23 \leq h \leq 35$ | $35 < h$ | THDi (%) |
| < 20 | 4 | 2 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5 |
| 20-50 | 7 | 3,5 | 2,5 | 1 | 0,5 | 8 |
| 50-100 | 10 | 4,5 | 4 | 1,5 | 0,7 | 12 |
| 100-1000 | 12 | 5,5 | 5 | 2 | 1 | 15 |
| >1000 | 15 | 7 | 6 | 2,5 | 1,4 | 20 |

Tabela 5: Tabela 10.3 da IEEE 519-2, limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição em geral (120 V a 69000 V).

As reduções dos valores de THDI e THDU estão interligadas e dependem da redução ou eliminação das correntes harmônicas predominantes na corrente elétrica. As medidas mitigadoras envolvendo equipamentos adicionais geralmente empregados para minimizar os efeitos dos harmônicos são os filtros L-C, que ficam localizados juntos as fontes de harmônicos e sintonizados em séries na frequência harmônica perturbadora. Esta situação fornece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas fluírem com pequeno retorno para o resto do sistema CA. Entretanto, um filtro separado pode ser necessário para cada fonte harmônica, contudo economicamente inviável.

Existem basicamente três tipos de filtros que acompanharão o sistema de filtragem:

- Utilização de filtro passivo;
- Utilização de filtro ativo e
- Filtro híbrido

5.3.1 Filtros Passivos

A solução clássica para a redução da contaminação harmônica em sistemas elétricos é o uso de filtros sintonizados (LC conectados em série) em derivação. Os filtros passivos são os mais baratos.

A estrutura típica de um filtro passivo de harmônicos de corrente é mostrada, na figura 5.1. As várias células LC série são sintonizadas nas frequências que se deseja eliminar, o que, via de regra, são os harmônicos de ordem inferior. Para as frequências mais elevadas é usado, em geral, um simples capacitor.

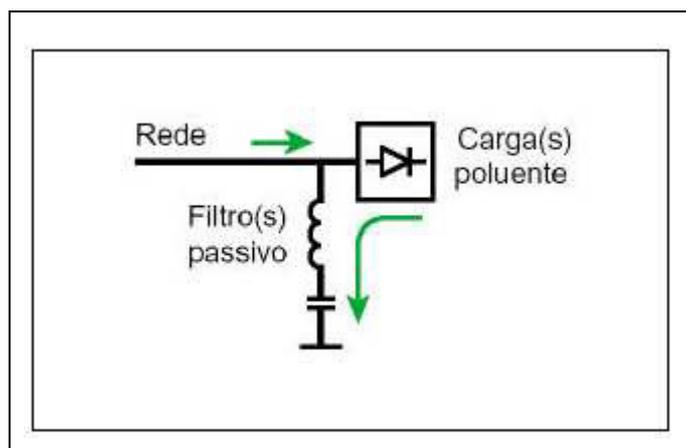


Figura 5.1: Filtro Passivo

O princípio de funcionamento é a instalação de um circuito LC ajustado sobre cada frequência harmônica a filtrar, em paralelo sobre o gerador de harmônicos. Este circuito de derivação absorve os harmônicos e evita que eles circulem na alimentação.

Em geral, o filtro passivo é ajustado sobre uma ordem de harmônico próximo do harmônico a eliminar. Várias ligações de filtros em paralelo podem ser utilizadas quando desejamos uma redução forte da taxa de distorção sobre várias ordens.

As aplicações típicas são:

- Instalações industriais com um conjunto de geradores de harmônicos de potência total superior a 200 kVA (inversores de frequência, alimentações sem interrupções, retificadores,...);

- Instalação apresentando uma necessidade de compensação de energia reativa;
- Necessidade de redução da taxa de distorção em tensão para evitar a perturbação de receptores sensíveis;
- Necessidade de redução da taxa de distorção em corrente para evitar as sobrecargas.

5.3.2 Filtros Ativos

Filtragem ativa de uma carga única, ou um conjunto delas é uma opção a fazer se a correção do fator de potência no estágio de entrada de cada equipamento for utilizada os chamados pré-reguladores de fator de potência.

O objetivo da filtragem da corrente é obter uma forma de onda que siga a forma da tensão, ou seja, que o conjunto carga + filtro represente uma carga resistiva, maximizando o fator de potência, o que vale dizer, minimizando a corrente eficaz absorvida da fonte, mantida a potência ativa da carga.

Filtros ativos são sistemas eletrônicos de potência instalados em série ou em paralelo com a carga não-linear, visando a compensar seja as tensões harmônicas, seja as correntes harmônicas geradas pela carga.

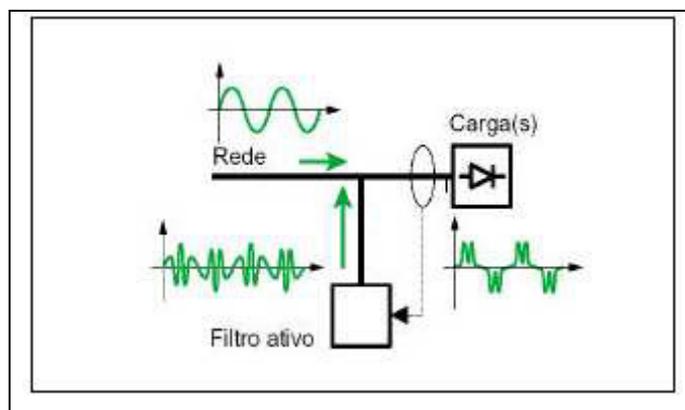


Figura 5.2: Filtro Ativo

As aplicações típicas são:

- Instalações com geradores de harmônicos de potência total inferior a 200 kVA (inversores de frequência, alimentações sem interrupções,...);
- Necessidade de redução da taxa de distorção em corrente para evitar as sobrecargas.

5.3.3 Filtros Híbridos

A fim de reduzir a potência a ser injetado pelo filtro ativo é possível utilizá-lo em associação com filtros passivos, de maneira que a parte ativa deve atuar apenas sobre as componentes não corrigidas pelo filtro passivo.

Os filtros passivos e ativos podem ser associados a um mesmo equipamento e constituir um filtro híbrido. Esta nova solução de filtragem permite acumular as vantagens das soluções existentes e de cobrir um largo domínio de potência e de performances.

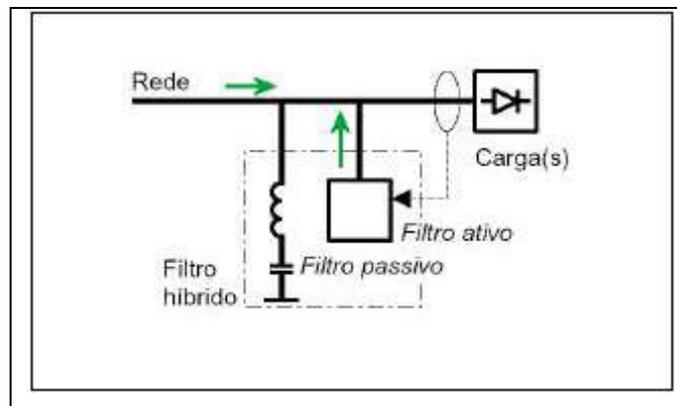


Figura 5.3: Filtro Híbrido

As aplicações típicas são:

- Instalações com um conjunto de geradores de harmônicos de potência total superior a 200 kVA (inversores de frequência, alimentações sem interrupções,...);
- Instalação apresentando uma necessidade de compensação de energia reativa;
- Necessidade de redução da taxa de distorção em tensão para evitar a perturbação de receptores sensíveis;
- Necessidade de redução da taxa de distorção em corrente para evitar as sobrecargas;

5.4 Transformadores de separação

Atualmente os transformadores estão sendo utilizados para evitar os harmônicos, sobretudo por sua capacidade de isolar as cargas das fontes. Assim é possível isolar equipamentos que causam harmônicas, evitando que o sistema se contamine. Porém os transformadores estão sujeitos a maiores níveis de ruídos, vibrações, entre outros.

A forma de ligação dos enrolamentos primária e secundária torna mais adequada cada aplicação, como será vista.

5.4.1 Transformador de separação de 3ª harmônica e suas múltiplas

A utilização da ligação triângulo/estrela permite o confinamento da terceira harmônica e seus múltiplos, permitindo assim o cálculo do dimensionamento do sistema, sobretudo o neutro. São utilizados em equipamentos que possuam fonte monofásica, como computadores, máquinas de fax e eletrodomésticos em geral.

5.4.2 Transformador de separação para 5ª e 7ª harmônica e suas múltiplas

Caso as cargas geradoras de harmônico sejam trifásicas, os harmônicos gerados principais serão de 5ª e 7ª ordem.

Para esse caso são usados transformadores com duplo secundário, onde se tem uma defasagem de 30° entre os enrolamentos. Em outro caso, pode ser usado dos grupos de transformadores, com ligações diferentes, de forma a obter uma defasagem também de 30°, obtendo assim uma redução na taxa de distorção da corrente (THDI) e principalmente das harmônicas de 5ª e 7ª ordem, ocorrendo assim com as de 17ª e 19ª.

Para que se obtenha um resultado satisfatório é necessário que os transformadores devam alimentar apenas cargas trifásicas em ambos os secundários. Particularmente esse tipo de sistema é adotado em variadores de velocidade, trifásicos entre outros.

6. CONCLUSÃO

Nos capítulos anteriores tivemos como objetivo a apresentação dos conceitos básicos de distorções harmônicas, seus efeitos e de modo geral algumas medidas mitigadoras deste distúrbio na qualidade de energia. Contudo é importante salientar que o assunto é complexo, o mesmo vem sendo cada vez mais estudado e ainda é interpretado de vários modos.

O objetivo principal é buscar alertar os profissionais da área devido à evolução da tecnologia baseado na eletrônica de potência, com inversores de frequência, retificadores de CA/CC e dentre outros, que produzem efeitos na qualidade da energia gerada. Incorporando ao profissional uma nova preocupação com a energia, deixando de ser somente pela falta da mesma e sim com os distúrbios que podem ser provados através de diversos tipos de equipamentos não lineares exemplificador no capítulo 03.

Atualmente, a maioria das embarcações de apoio marítimo “Offshore” estão sendo construídos com Propulsão Diesel Elétrica. A tensão gerada a bordo é média e alta tensão, em torno de 6.600V, e potências em torno de 20 Mega Watts. Com isso possibilitando o uso de uma diversidade de máquinas e equipamentos onde os mesmo trazem uma gama de distúrbios que devem ser entendidos e controlados.

Com isso, cabe aos profissionais que irão atuar nessas áreas prepararem-se para identificar, possivelmente solucionar ou amenizar essas interferências, demonstrando a preocupação com a atualização do aprendizado a cada dia e construindo assim uma mão de obra diferenciada no mercado de trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BROZEK, J. P., *The Effects of Harmonics on Overcurrent Protection Devices*, IEEE Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting, 1990.
- (2) BOLLEN, M. H. J., *What is power quality?*, Electric Power Systems Research, 66,2003, p. 5-14.
- (3) *CONTROLE DE VELOCIDADE MOTORES CA-SENAI*- Tubarão – 2004.
- (4) COGO, João Roberto. *Análise da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos*. Apostila, Escola Federal de Itajubá, Itajubá-MG: Editora EFEI , Setembro de 1996.
- (5) DIAS, G.A.D., *Harmônicas em Sistemas Industriais*, 2. ed., EDIPUCRS, 1998.
- (6) DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, N. F.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill, 1996. , p.170-226
- (7) DELL'AQUILA, A.; LASSANDRO, A. & ZANCHETTA, P.; '*Modeling of Line Side Harmonic Currents Produced by Variable Speed Induction Motors Drivers*'; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 3, September 1998.
- (8) ESTUDO DE CASO : DIAGNÓSTICO DO CONSUMO E DA QUALIDADE DE ENERGIA NUMA INDÚSTRIA METALÚRGICA/Antonio Carlos de Carvalho
Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira / FEIS / UNESP
- (9) IEC – INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION STANDARD
61000-3-2
- (10) IEEE-519. Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems of electrical and electronics engineers . 1992.
- (11) MORRISON, R.E.; '*Harmonic distortion in Commercial Establishments*'; Printed and Published by the IEE, Savoy Place, London, WC2R0BL, UK., 1997.
- (12) ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico, criada em 27/05/1998, através de lei n.º 9.648
- (13) REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA SOBRAEP-VOL. 7, Nº 1, NOVEMBRO DE 2002
- (14) SRINIVASAN, K.; '*On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions*', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996.
- (15) SILVA, J E; Curso técnico "*Análise de Cargas Especiais*"; promovido pela TARGET Eng. e Consultoria. 1997.

GLOSSÁRIO

THD- distorção harmônica total

THDr- distorção harmônica total em relação ao sinal total,

THDf- distorção harmônica total em relação à componente fundamental.

THDU- distorção harmônica total de tensão

THDI- distorção harmônica total de corrente

FP- Fator de potência

Pa- potência aparente

VA- Volt Ampère

Pe- potência efetiva

W- Watt

Pr- potência reativa

Var- Volt Ampère Reativo

FC- fator de crista

Ip- corrente de pico

Ief- corrente eficaz

CENELEC- *Commission Européen pour la Normalisation Eléctrique*

IEC- *International Electrotechnical Commission*

IEEE- *Institute of Electrical and Electronics Engineers/ Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos*

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR- Norma Brasileira

GCOI- Grupo Coordenador para Operação Interligada

GCPS- Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas

UPS- Uninterruptible power supply- Fonte de alimentação ininterrupta

CA- corrente alternada

CC- corrente contínua.

I_B. Corrente de projeto