

**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

REGINALDO DOMINGOS DE SOUZA

Distorções Harmônicas, Causas e Medidas Mitigadoras

Estudo sobre distorção harmônica em sistemas elétricos, causas e danos a equipamentos e medidas mitigadores para minimizar seus efeitos.

São Paulo

2013

**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

REGINALDO DOMINGOS DE SOUZA

Distorções Harmônicas, Causas e Medidas Mitigadoras

Estudo sobre distorção harmônica em sistemas elétricos, causas e danos a equipamentos e medidas mitigadores para minimizar seus efeitos.

Monografia apresentada como forma de avaliação final do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador: Professor Ivan Eduardo Chabu

São Paulo

2013

FICHA DE APROVAÇÃO

Nome: SOUZA, Reginaldo Domingos.

Título: Distorções Harmônicas, Causas e Medidas Mitigadoras

Subtítulo: Estudo sobre distorção harmônica em sistemas elétricos, causas e danos a equipamentos e medidas mitigadores para minimizar seus efeitos.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em: 06/12/2013.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

Orientador

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

Coordenador de Curso

Prof. Dr. Eduardo Ioshimoto

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Reginaldo Domingos de
Distorções harmônicas, causas e medidas mitigadoras /
R.D. de Souza. – São Paulo, 2014.
69 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Sistemas elétricos 2.Equipamentos elétricos (Danos; Causas) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

À minha família.

Com o apoio e compreensão de minha esposa Patrícia e meus filhos Henrique e Guilherme foi possível concluir mais essa etapa da minha vida.

Ao meu professor orientador que sempre atendeu minhas solicitações.

A alguns amigos que dispensaram parte do seu tempo para conversar comigo sobre a experiência que tinham sobre o tema e até me acompanharam em algumas visitas para a realização de testes com o intuito de orientação da melhor maneira para a realização dos mesmos.

RESUMO

SOUZA, Reginaldo Domingos. Distorções Harmônicas, Causas e Medidas Mitigadoras. 2013. Monografia (Especialização) – Programa de Educação Continuada da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

No meio industrial tem-se falado muito sobre harmônicas e seus efeitos. Quase tudo que acontece e não se consegue explicar é atribuído a distorções harmônicas. Existe um fundo de verdade nisso, mas para que essa conclusão seja segura é necessária uma boa avaliação da instalação. Os maiores geradores de harmônicos são dispositivos controlados e/ou chaveados, como retificadores a diodos e tiristores (SCR - Silicon Controlled Rectifier). Essa situação também ocorre nas instalações residenciais e comerciais. Nas últimas décadas estamos cada vez mais utilizando produtos que possuem controles eletrônicos. Esses controles, se por um lado melhoram a eficiência dos equipamentos, por outro provocam “ruídos” elétricos na rede de alimentação e com isso são gerados alguns problemas que serão apresentados ao longo do trabalho.

Palavras-chave: Distorção harmônica, ruídos elétricos, mitigação de perturbações da rede elétrica, interferência eletromagnética.

ABSTRACT

SOUZA, Reginaldo Domingos. Harmonic distortions, Causes and Mitigating Measures. 2013. Monograph (Specialization) - Continued Education Program at the University of São Paulo, São Paulo, 2013.

In the industrial environment much has been talked about harmonics and their effects. Almost everything that happens and you cannot explain is assigned to harmonic distortions. There is some truth on it, but to be sure about that conclusion is mandatory a good evaluation of the installation. The largest harmonic generators are controlled and/or switched devices as rectifiers, diodes and thyristors (SCR - Silicon Controlled Rectifier). This situation also occurs in residential and commercial installations. In the recent decades we are increasingly using products that have electronic controls. These controls, while in one hand improves the efficiency of equipment on the other cause "noise" in the electrical supply network and thus generates some problems, that will be presented throughout this paper.

Keywords: harmonic distortion, electrical noise, network problems mitigation, electromagnetic interference.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Exemplo de filtro de 1°,2°,3° ordem, tipo C sintonizado e filtro passa-alta.. | 22 |
| Figura 2: Filtro passivo em série com o sistema..... | 22 |
| Figura 3: Filtro passivo em paralelo com o sistema (shunt)..... | 23 |
| Figura 4: Filtro ativo com compensação de harmônicos de tensão e corrente..... | 24 |
| Figura 5: Estrutura de um filtro híbrido com a parte ativa e passiva..... | 25 |
| Figura 6: Gráfico característico de corrente e tensão harmônica..... | 26 |
| Figura 7: Forma de onda senoidal da fundamental e suas decomposições..... | 27 |
| Figura 8: Forma de onda senoidal da fundamental somada as senoides harmônicas com período igual a múltiplos inteiros da fundamental..... | 28 |
| Figura 9: Curva da expectativa de vida útil de um transformador carregado sob influência de harmônicas..... | 33 |
| Figura 10: Circuito trifásico com cargas não lineares balanceadas, com corrente da fundamental e de 3° ordem..... | 35 |
| Figura 11: Fusível danificado por corrente harmônica..... | 36 |
| Figura 12: Representação da forma de onda para carga resistiva, indutiva e capacitiva..... | 37 |
| Figura 13: Defasagem entre tensão e corrente (Fator de potência)..... | 38 |
| Figura 14: “Triângulo” de potência com componentes harmônicas..... | 38 |
| Figura 15: Quanto maior o fator de potência, menor será a perda percentual da potência reativa..... | 39 |
| Figura 16: Exemplo do triângulo de potência com reativo alto $\cos\Phi=0,8$ | 40 |
| Figura 17: Exemplo do triângulo de potência com reativo alto $\cos\Phi=0,95$ | 40 |
| Figura 18: Tiristores (SCR´s) montados em antiparalelo..... | 41 |
| Figura 19: Ângulo de disparo dos scr´s..... | 42 |
| Figura 20: Diagrama de um <i>Soft Starter</i> com scr´s montados em antiparalelo..... | 42 |
| Figura 21: Espectro da distorção total de corrente harmônica (THiD)..... | 43 |
| Figura 22: Diagrama de um conversor de frequência de 6 pulsos..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 23: Transformador para conversor de 12 pulsos defasagem 30°..... | 44 |
| Figura 24: Transformador para conversor de 18 pulsos defasagem 20°..... | 45 |
| Figura 25: Motor – Dados da placa do motor..... | 46 |
| Figura 26: Bomba – Dados de placa da bomba..... | 46 |
| Figura 27: Dados do conversor de frequencia..... | 47 |
| Figura 28: Foto da instalação..... | 47 |
| Figura 29: IHM do conversor com a indicação de corrente consumida pelo motor.... | 47 |
| Figura 30: IHM do filtro com a indicação de THDi e corrente de entrada..... | 47 |
| Figura 31: THDv em 6,2%..... | 48 |
| Figura 32: THDi em 32,2%..... | 48 |
| Figura 33: IHM do conversor com a indicação de corrente consumida pelo motor.... | 49 |
| Figura 34: IHM do filtro com a indicação de THiD e corrente de entrada..... | 49 |
| Figura 35: THDv em 3,8%..... | 50 |
| Figura 36: THDi em 5.8%..... | 50 |
| Figura 37: CCM (Centro de controle de motores)..... | 52 |
| Figura 38: Indicação das potências e fator de potência (Fluke)..... | 52 |
| Figura 39: Indicação das potências multimedidor..... | 53 |
| Figura 40: Indicação do fator de potência multimedidor..... | 53 |
| Figura 41: Barramentos de alimentação de motores e acionamentos..... | 53 |
| Figura 42: Identificação do transdutor de corrente TC (4000 A / 5 A)..... | 53 |
| Figura 43: Foto do equipamento (Filtro Ativo para Harmônicos)..... | 54 |
| Figura 44: Identificação do filtro ativo para 310 A..... | 54 |
| Figura 45: Multimedidor com a indicação da distorção harmônica..... | 54 |
| Figura 46: Analisador de energia com indicação de valor médio THiD em 6,4%..... | 54 |
| Figura 47: Multimedidor com a nova indicação do FP em 0,98..... | 55 |
| Figura 48: Nova indicação de valor médio de THiD em 2,9%..... | 55 |
| Figura 49: Multimedidor com a indicação do FP em 0,92..... | 56 |
| Figura 50: Indicação de valor médio de THiD em 3,6%..... | 56 |
| Figura 51: Fator de potência em 0,92 e THiD em 4%..... | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 52: Analisador de energia com valor médio de THiD em 4,4%..... | 56 |
| Figura 53: Multimedidor com indicação das potências e FP em 0,78..... | 57 |
| Figura 54: Multimedidor com indicação das potências e FP em 0,92..... | 57 |
| Figura 55: Potências ativa, reativa e aparente e fator de potência..... | 57 |
| Figura 56: Potências ativa, reativa e aparente e fator de potência..... | 57 |
| Figura 57: Apresentação gráfica do software MCT-31..... | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Classificação das componentes harmônicas..... | 28 |
| Tabela 2: Referência de distorção harmônica de tensão..... | 30 |
| Tabela 3: Limite de distorção da corrente para sistemas de distribuição de tensão entre 120V a 69KV..... | 31 |

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

| Símbolo | Descrição da unidade | Observação |
|---------|-----------------------------------|------------|
| Hz | Hertz | Frequência |
| Cos | cosseno | Graus |
| Φ | Phi | - |
| LC | Indutor e Capacitor | H e C |
| AC | Corrente Alternada | A |
| CC | Corrente Contínua | A |
| P | Potência Ativa | W |
| S | Potência Aparente | VA |
| Q | Potência Reativa | VAR |
| D | Potência Harmônica | W |
| Fp | Fator de Potência | - |
| EA | Energia Ativa | W |
| ER | Energia Reativa | VAR |
| DTT | Distorção Harmônica de Tensão | % |
| Hmax | Ordem Harmônica Máxima | - |
| V1 | Tensão Fundamental Medida | V |
| V2 | Tensão Harmônica de Ordem h | V |
| PAC | Ponto de Acoplamento Comum | - |
| K | Fator K (Fator de Depreciação) | - |
| Ipico | Corrente de Pico do Transformador | A |
| IRMS | Corrente Eficaz do Transformador | A |
| FC | Fator de Crista | - |
| Smax | Potência Máxima do Transformador | VA |
| Snom | Potência Nominal do Transformador | VA |

| Símbolo | Descrição da unidade | Observação |
|----------------|---------------------------------------|-------------------|
| I_{Total} | Corrente Total | A |
| A | Ampere | A |
| J | Joule | W |
| Fr | Frequência de Ressonância | Hz |
| THiD | Distorção Harmônica Total de Corrente | A |
| THvD | Distorção Harmônica Total de Tensão | V |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| Ficha de Aprovação..... | 03 |
| Ficha Catalográfica..... | 04 |
| Agradecimentos..... | 05 |
| Resumo..... | 06 |
| Abstract..... | 07 |
| Lista de Figuras..... | 08 |
| Lista de Tabelas..... | 11 |
| Lista de Símbolos e Unidades..... | 12 |
| Sumário..... | 14 |
| | |
| 1.0 – Introdução..... | 16 |
| 1.1 – Objetivos..... | 18 |
| 1.2 - Objetivo Específico..... | 18 |
| 1.3 - Justificativa..... | 19 |
| 1.4 – Metodologia..... | 19 |
| | |
| 2.0 – Estado da Arte..... | 20 |
| 2.1 – Filtros Passivos..... | 21 |
| 2.2 – Filtros Ativos..... | 23 |
| 2.3 – Filtros Híbridos..... | 24 |
| | |
| 3.0 - Definições..... | 26 |
| 3.1 – Origens dos Harmônicos..... | 27 |
| 3.2 – Classificação dos Harmônicos..... | 28 |
| | |
| 4.0 – Prodíst..... | 29 |

| | |
|--|----|
| 5.0 – Equipamentos e dispositivos em instalações com harmônicos..... | 30 |
| 5.1 – Transformadores..... | 30 |
| 5.1.1 – Fator K dos transformadores..... | 31 |
| 5.2 – Condutores Elétricos..... | 33 |
| 5.3 – Dispositivos de Proteção..... | 35 |
| 5.4 – Motores Elétricos..... | 37 |
| 5.5 – Fator de Potência..... | 37 |
| 5.6 – Soft Starter..... | 41 |
| 5.7 – Conversor de Frequência..... | 43 |
| 6.0 – Estudo de Caso..... | 46 |
| 6.1 – Estudo de Caso 01 – SAAE Mogi Mirim/SP..... | 46 |
| 6.1.1 – Apresentação de Resultados – Estudo de Caso 01..... | 51 |
| 6.2 – Estudo de Caso 02 – Usina de Açúcar e Etanol..... | 52 |
| 6.2.1 – Apresentação de Resultados – Estudo de Caso 02..... | 56 |
| 7.0 – Considerações Finais..... | 57 |
| 8.0 – Conclusão..... | 59 |
| 9.0 – Referência Bibliográficas..... | 60 |
| Anexo I..... | 63 |
| Anexo II..... | 65 |

1.0 - INTRODUÇÃO

Harmônicos, dispositivos e condições que as produzem e forma de mitigação

Podem ser chamadas "distorções" os desvios ou variações que ocorrem na forma de onda das tensões e correntes, que originalmente são sinais cíclicos (senoidais) em uma frequência fixa de 60Hz.

Os desvios ou variações podem ter como causas o desequilíbrio de fases, transitórios de tensão e/ou corrente, interrupções no fornecimento e harmônicos.

Em linhas gerais, harmônicos são os correspondentes múltiplos inteiros da frequência fundamental da tensão e corrente de um sistema elétrico.

As componentes harmônicas tem sua origem na instalação de cargas não lineares cuja forma de onda da corrente não acompanha a forma de onda senoidal da tensão de alimentação.

Nos transformadores é consequência da relação não linear entre o fluxo magnético e a corrente de excitação correspondente, originada pela saturação do material ferromagnético do núcleo. Ainda nos transformadores, as correntes harmônicas são responsáveis por um aumento nas perdas, principalmente nos enrolamentos por causa da deformação das linhas de campo de dispersão.

As perdas em um transformador geram calor no núcleo e nos enrolamentos o que a longo prazo deterioram a sua isolação e conseqüentemente levam a uma redução do tempo de sua utilização (vida útil do dispositivo).

Em sistemas alimentados por geradores, quando estes não estão preparados para absorver a distorção harmônica, as consequências são possíveis danos nos enrolamentos do circuito do estator. Para uso de geradores onde se encontram distorções harmônicas os mesmos devem possuir um fator de serviço maior do que 1.0. Produtos como fontes chaveadas, reatores eletrônicos para lâmpadas compactas e fluorescentes, "***No Break***", arrancadores suaves ("***soft starter***") e inversores de frequência são exemplos de dispositivos geradores de distorção harmônica que, se por um lado melhoram a eficiência de equipamentos e o rendimento de máquinas,

provocam aquecimento e sobrecarga em transformadores e cabos que consequentemente geram maior consumo de energia.

Os harmônicos também interferem em dispositivos de proteção que não tem imunidade a estes efeitos além de causar danos em bancos de capacitores instalados com a função de correção de fator de potência.

Mesmo não sendo tema central deste estudo, não temos como não descrever em algum momento o assunto *fator de potência*, que se não estiver sob “controle” também impacta em custos na conta de energia elétrica.

O fator de potência ou " $\cos \Phi$ " é o cosseno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente num circuito elétrico e faz com que o sistema possa apresentar-se mais indutivo ou capacitivo de acordo com os dispositivos instalados. O mais comum de se encontrar são circuitos indutivos. São instalações que possuem muitos motores elétricos, por exemplo.

A portaria do DNAEE nº 85 de março/1992 determina que as instalações devam atender um fator de potência de 0,92 ou maior. Quando mais próximo de 1,0 o fator de potência menor será a potência aparente (S). As contas de energia elétrica são cobradas sobre o valor de potência aparente.

Quando uma instalação tem fator de potência baixo e indutivo são inseridos bancos de capacitores que fazem a correção do mesmo, trazendo essa instalação a atender a norma.

Como ponto de estudo também, podemos comentar que os bancos de capacitores expostos às frequências harmônicas tem uma diminuição da sua impedância e aumento das perdas no dielétrico, com risco de danos aos mesmos.

Transformadores e motores com baixo fator de utilização (carregamento) são causadores de fator de potência baixo, razão pela qual a recomendação é que não se faça o sobre dimensionamento destes equipamentos.

Por conta dos problemas citados e suas conseqüências, se vêm estudando formas de mitigação desses efeitos e por consequência proporcionar economia de energia elétrica. Esses estudos demonstram algumas alternativas que passam por adequações das instalações, redimensionamento de equipamentos como geradores e transformadores com fator de serviço maior que 1.0, motores de rendimento superior e a utilização de filtros que podem ser passivos ou ativos.

Filtros passivos são basicamente circuitos LC (indutores e capacitores) instalados em série no circuito e são dimensionados conforme a carga. Já os filtros ativos são equipamentos que conseguem, através medição junto à saída do transformador, identificar e gerar "contra-harmônicos" (harmônicos de mesma ordem da perturbação porém em oposição de fase) resultando em valores globais mais baixos e assim atendendo as normas.

1.1 - Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo estudar as causas e efeitos dos harmônicos em instalações onde temos transformadores, motores, reatores eletrônicos e dispositivos conhecidos como cargas não lineares. Esses dispositivos são geradores de harmônicos que são prejudiciais ao sistema elétrico.

Conhecendo os geradores, suas causas e efeitos, será possível apresentar alternativas e correções para sua mitigação.

1.2 - Objetivo Específico

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- ✓ Estudar e entender as normas técnicas:
 - IEEE std 519-1992
 - IEC 61000-3-2
 - NBR 5410
 - Prodint no que se diz respeito a harmônicos.
- ✓ Pesquisar trabalhos relacionados ao tema.
- ✓ Informativos e periódicos de fabricantes que possuam dispositivos que produzem ou mitigam harmônicos.
- ✓ Informar dispositivos que possam ser incorporados para adequação das instalações.

1.3 – Justificativa

Nas últimas décadas ouvimos muito falar sobre economia de energia ou eficiência energética. Muitas empresas passaram a trabalhar em melhorias de processos e na aquisição de máquinas e equipamentos que proporcionem melhor desempenho sem diminuição de produção. Com isso, não só equipamentos são mais bem utilizados, mas também as instalações elétricas oferecem benefícios ao sistema elétrico.

Um exemplo disso é o estabelecimento de um fator de potência mínimo de 0,92 para as instalações comerciais e industriais.

Esses equipamentos que melhoram os processos por possuir controles eletrônicos produzem um efeito negativo como a geração de distorções harmônicas que tem seus efeitos sentidos em transformadores que aquecem e dispositivos de proteção que atuam mesmo não tendo sua capacidade excedida.

Com os causadores destes efeitos identificados é possível aplicar equipamentos que se utilizam das mesmas tecnologias de controles eletrônicos fazendo correções e minimizando os impactos gerados.

1.4 - Metodologia

A metodologia deste estudo consiste em:

- ✓ Estudar e entender as normas relacionadas ao tema;
- ✓ Identificar causadores de harmônicos;
- ✓ Indicar os principais efeitos do problema;
- ✓ Indicar possíveis correções e alternativas;
- ✓ Apresentar informações sobre estudo de caso.

2.0 – ESTADO DA ARTE

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica sempre foi um marco importante para o desenvolvimento de países e regiões. A economia cresce com as indústrias, além de proporcionar melhoria na qualidade de vida das pessoas. Hoje seria difícil imaginar não ter disponíveis os benefícios que a energia elétrica nos trás todos os dias.

Com o contínuo aumento do consumo de energia elétrica como consequência desse desenvolvimento, temos novos equipamentos elétricos e eletrônicos inseridos no sistema elétrico que são geradores de harmônicos. Desde sistemas de iluminação e computadores para nossas residências como controles de motores elétricos e fornos de arco elétrico nas indústrias.

Com a crescente preocupação sobre o aumento dos níveis de distorções harmônicas no sistema elétrico, as comissões regulamentadoras como a **International Electrotechnical Commission (IEC)** e a **Electro Magnetic Compatibility (EMC)** vêm trabalhando junto a fabricantes de produtos elétricos e eletrônicos com o intuito de que as diretivas de emissão eletromagnética e níveis de distorções sejam cumpridos.

Para nosso estudo aplica-se a IEC 61000-3-2 que lida com os níveis de compatibilidade das harmônicas para sistemas industriais de baixa tensão.

Paralelo a essa medida o **Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)** indica que as distribuidoras sejam responsáveis pela qualidade da energia entregue ao consumidor, respeitando cada nível de tensão.

A base de pesquisa foi a IEEE 519-1992.

No Brasil, a Norma Brasileira Regulamentadora 5410 (NBR 5410) é a responsável por indicar os limites aceitáveis para as instalações. Sempre onde não houver uma NBR associada ao problema, deve-se utilizar normas internacionais.

Existem algumas maneiras de minimizar ou mitigar os harmônicos, como adequação de instalações, aumento da corrente de curto circuito e redistribuição de cargas, mas isso requer um estudo para cada caso e a preocupação deste trabalho é criar maneiras mais usuais e de fácil implementação.

As formas de mitigar os harmônicos passam por modificar a resposta em frequência do sistema com a instalação de indutâncias e capacitâncias em série com o

sistema, com o cuidado de que não haja frequências de ressonância ao instalar esses filtros.

Em acionamentos de motores com conversores estáticos, a técnica é instalar indutâncias que podem estar do lado da corrente alternada (AC) como do lado de corrente contínua (CC) para a redução das correntes harmônicas.

Ainda existe a possibilidade de instalar filtros que possam desviar ou impedir as correntes harmônicas. Uma maneira é a implementação de filtros que podem ser passivos, ativos ou híbridos com sua disposição nos sistemas em série ou paralela, como serão apresentados a seguir.

Os filtros devem criar um caminho de baixa impedância com característica resistiva, sendo o caminho preferencial das correntes harmônicas de baixa ordem que são as de maior amplitude.

Técnicas do uso de acionamentos de 12 pulsos têm custo elevado e a necessidade de um transformador com duplo secundário e defasagem de 30 graus o que normalmente pode encarecer o sistema.

2.1 - Filtros Passivos.

São os mais comuns e atenuam de forma satisfatória os componentes harmônicos.

Os filtros passivos são basicamente circuitos compostos por indutores e capacitores (LC) que podem proporcionar um caminho de maior ou menor impedância entre a fonte geradora de energia e as cargas dispostas no sistema.

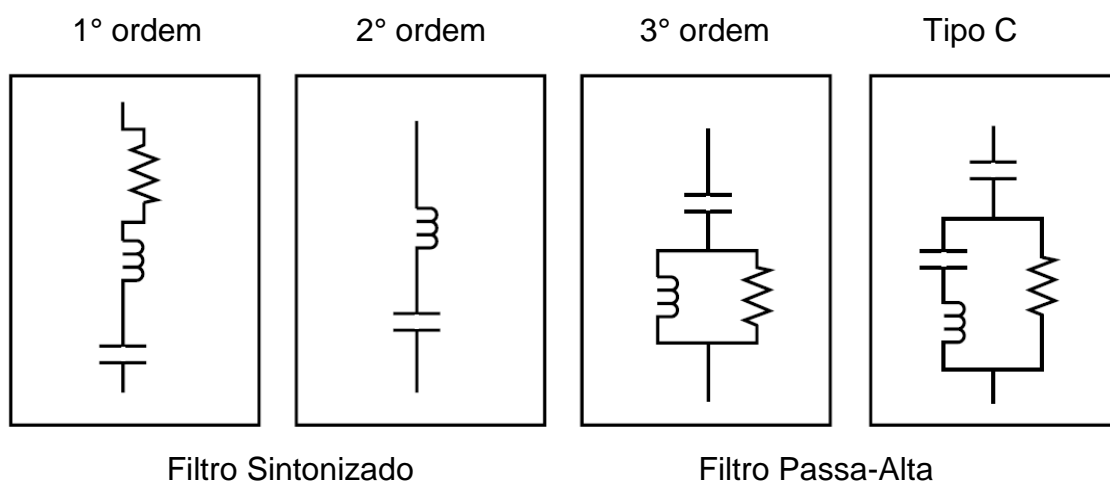


Figura 01 – Exemplo simplificado de filtros sintonizados e que permitem a passagem de frequências altas (filtro passa alta).

Fonte: Harmonic and Power Systems

Os filtros são projetados de maneira a estar sintonizados com uma ou mais faixas de frequências harmônicas. Por esse motivo o filtro pode apresentar diversos estágios com circuitos dispostos de maneira igual, mas com componentes de valores diferentes.

Isso proporciona a “filtragem” de harmônicos de ordem distinta. Os exemplos a seguir mostram dois tipos de filtros, sendo o primeiro em série com circuito e o segundo em paralelo. [09], [10].

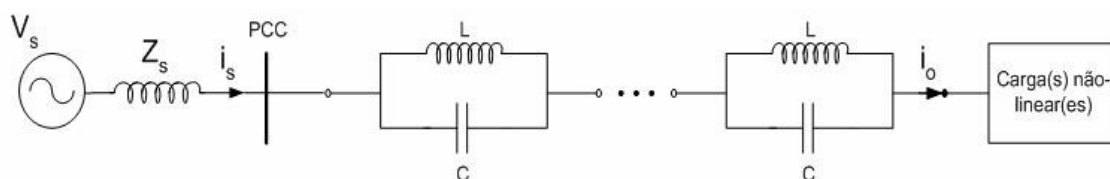


Figura 02 – Filtro passivo em série com o sistema.

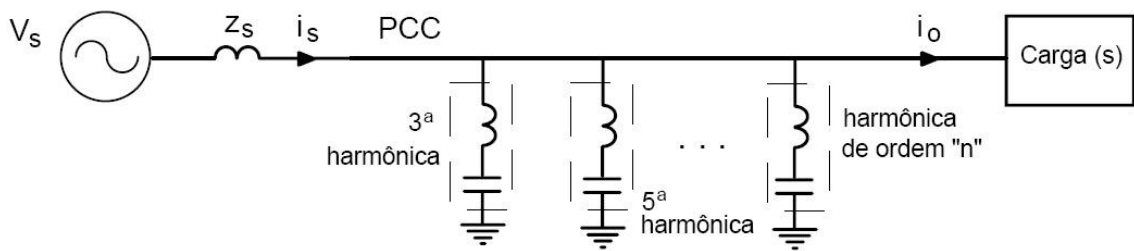


Figura 03 – Filtro passivo em paralelo com o sistema – (Shunt).

O exemplo da figura 03 demonstra os filtros que são calculados para os harmônicos de 3º, 5º e nº ordens. Um ponto ruim dos filtros passivos é a condição da implementação de novas cargas. Nessa condição o filtro deve ser recalculado.

2.2 - Filtros Ativos.

Filtros ativos são equipamentos eletrônicos como conversores estáticos conectados a rede elétrica que além de mitigar os harmônicos de tensão e/ou corrente, corrigem o fator de potência.

O filtro conectado ao sistema permanece monitorando as fases durante todo o tempo em que estiver “ligado” identificando as correntes que são produzidas pela carga e assim gera o espectro harmônico das componentes que devem ser “tratadas”. Esse filtro agora gera correntes defasadas em 180 graus (contra harmônicas) que serão injetadas na carga para que a resultante seja apenas a corrente fundamental.

O diagrama da figura 04 demonstra a estrutura de um filtro ativo. [09], [11].

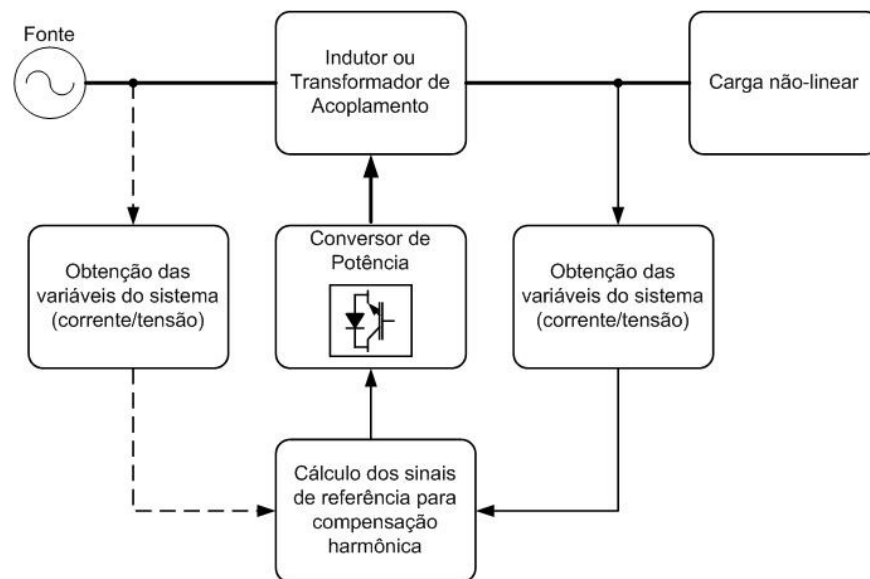


Figura 04 – Filtro ativo com compensação de harmônicos de tensão e corrente.

Fonte: Passive Shunt Harmonic Filter for Low and Medium Voltage

A corrente a ser gerada é medida a partir da carga e subtraída da corrente fundamental. Com essa configuração paralela, a carga “enxerga” o filtro como uma baixa impedância para as frequências harmônicas e impedância infinita para a frequência fundamental. Com essa mesma configuração o filtro compensa os reativos. [12]

Os benefícios do filtro ativo são desde ser instalado diretamente sobre a carga geradora de harmônicos, em quadros de distribuição para que uma parte da instalação seja atendida até o ponto de distribuição geral, provendo a correção geral das correntes harmônicas. Podem ainda fazer a correção do fator de potência atuando em potências reativas e proporcionam o equilíbrio das correntes nas três fases eliminando assim a corrente de neutro.

2.3 - Filtros Híbridos

Os filtros híbridos são uma composição dos filtros passivo e ativo. Visam à redução de custos e apresentam um desempenho superior, onde a parcela passiva compensa os reativos e elimina harmônicos de alta frequência e a parcela ativa faz a compensação dos harmônicos de baixa ordem.

Na figura 05, podemos ver a configuração de um filtro híbrido. Pode-se notar que o filtro ativo está conectado entre o capacitor e o indutor do filtro passivo. Com essa configuração, mesmo que o filtro ativo pare de funcionar o filtro passivo ainda estará em operação. [15]

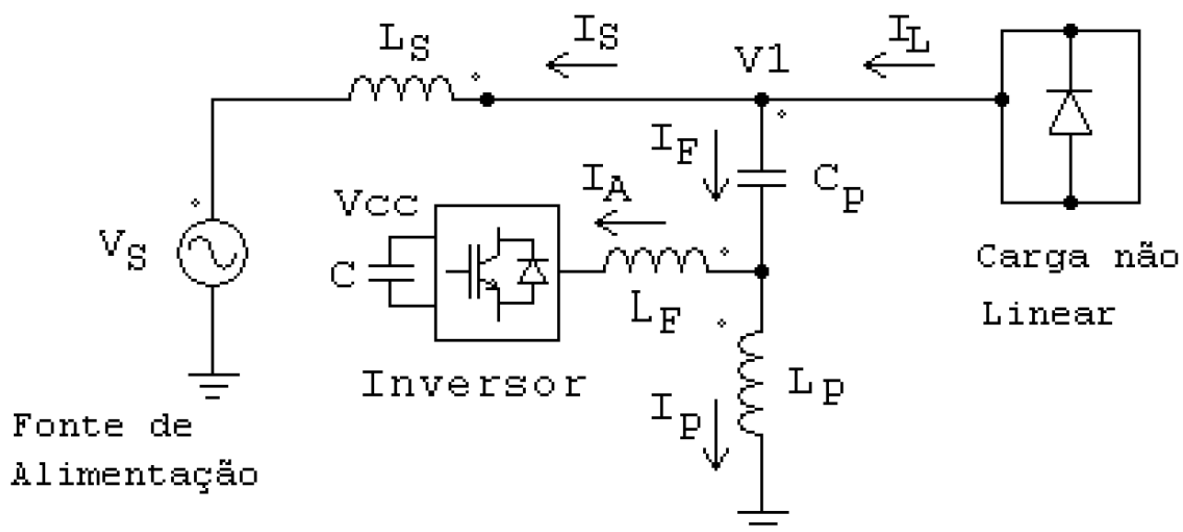


Figura 05 – Estrutura de um filtro híbrido com a parte ativa e passiva.

A figura 06 apresenta um espectro ilustrativo dos níveis de distorção harmônica de corrente e tensão de um sistema qualquer. Apesar de ser apenas um exemplo, representa o perfil característico de uma carga não linear de um retificador de 6 pulsos, com geração de harmônicos de 5°, 7°, 11°, 13°, 17° e 19° ordem. [16]

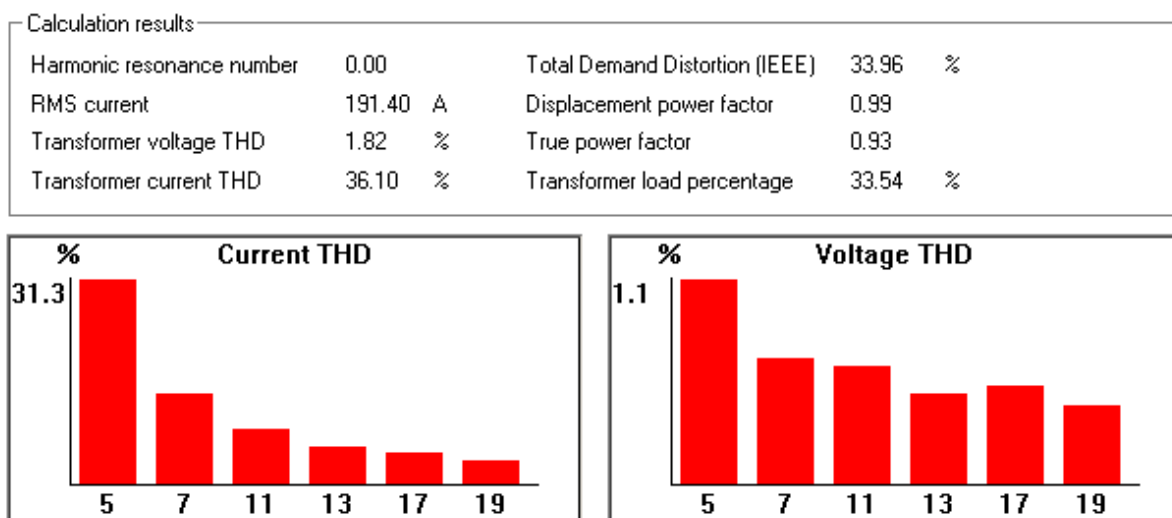


Figura 06 – Gráfico característico de corrente e tensão harmônica.

Fonte: Software de simulação MCT 31. [16]

3.0 - DEFINIÇÕES

Todo e qualquer desvio ou variação que possa ocorrer em uma forma de onda (vamos considerar um sinal elétrico com frequência de 60 Hz) seja na tensão, corrente ou frequência pode ser uma anomalia. Essa anomalia pode ter muitas razões como, por exemplo, interrupções no fornecimento, variações de curta duração, desequilíbrios e distorções da forma de onda.

Os harmônicos ou distorções harmônicas são tensões e correntes com correspondentes múltiplos e inteiros da frequência fundamental. Sendo um sinal periódico, podemos nos basear na série trigonométrica de Fourier¹, que descreve como todo o sinal pode ser decomposto em uma sucessão de senoides.

Assim como o instrumento musical Harmônica, os harmônicos dos sinais elétricos têm suas frequências próprias.

¹ Jean Baptiste Joseph Fourier – matemático e físico francês - 1768 - 1830

3.1 – Origens dos Harmônicos

Os harmônicos tem sua origem em cargas chamadas de não lineares. Alguns exemplos são equipamentos que possuem pontes retificadoras e acionamentos chaveados de motores elétricos como "*Soft-Starters*" e Inversores de Frequência dentre outros.

Esses harmônicos são prejudiciais ao sistema elétrico de potência causando problemas na qualidade da energia que até pouco tempo atrás não eram conhecidos.

O surgimento dos harmônicos fez com que o IEEE 519 analisasse seus efeitos criando orientações e viesse a criar limites de distorção de tensão e corrente nas "Práticas e requisitos recomendados para harmônicos e controle em sistemas elétricos de potência", porém em 1992 foi mais específico e estabeleceu os parâmetros que são seguidos atualmente [01].

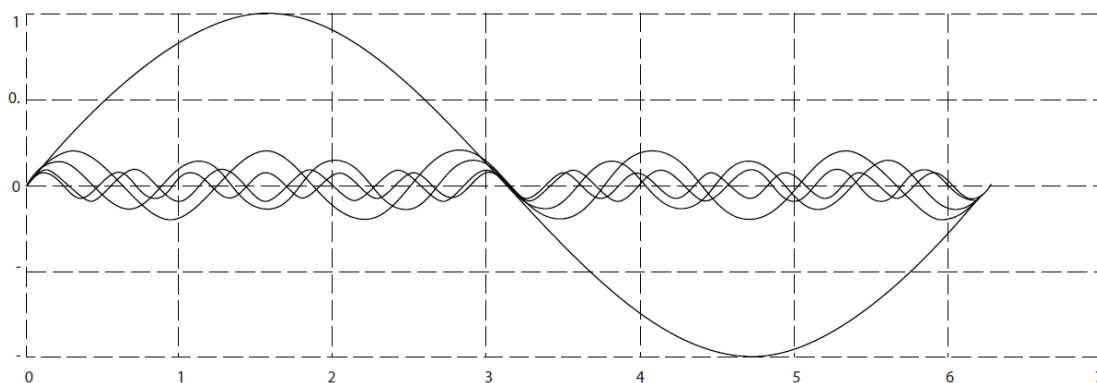


Figura 07 - Forma de onda senoidal da fundamental e suas decomposições.

Fonte: Manual de Produto Filtro AHF

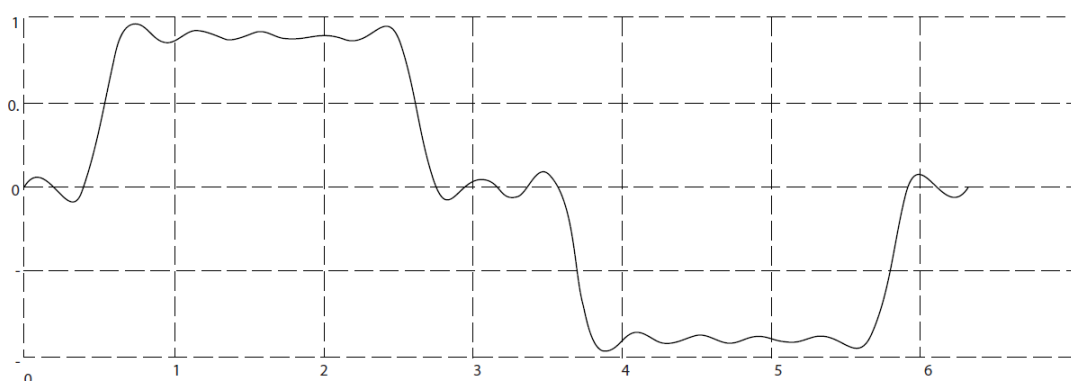


Figura 08 - Forma de onda senoidal da fundamental somada as senoides harmônicas com períodos iguais a múltiplos inteiros da fundamental.

Fonte: Manual de Produto Filtro AHF

3.2 - Classificação dos Harmônicos.

Os componentes harmônicos possuem ordens de grandeza e freqüências próprias além de uma seqüência referente à fase baseada na freqüência fundamental. Isso significa dizer que um harmônico de seqüência positiva “gira” no mesmo sentido da fundamental e a de seqüência negativa “gira” no sentido oposto.

Tabela 01 - Classificação das Componentes Harmônicas

| Ordem | Fundamental | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° | 8° | 9° |
|------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Frequência | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 |
| Seqüência | + | - | 0 | + | - | 0 | + | - | 0 |

| Seqüência | Rotação | Efeitos (efeitos de superfície correntes parasitas etc.) |
|-----------|---------|---|
| Positiva | Adiante | Aquecimento de condutores, interruptores de circuito etc. |
| Negativa | Reversa | Aquecimento de condutores, baixo rendimento e problemas em motores. |
| Zero | Nenhum | Aquecimento de condutores e correntes que se somam ao neutro do sistema trifásico a 4 condutores. |

Fonte: Periódico do Instituto Brasileiro de Cobre (Procobre) – 1° Ed. - 2001

4.0 - PRODIST

O Prodíst (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) em seu módulo 8 trata do tema de qualidade da energia elétrica e estabelece os critérios a serem seguidos. Para nosso estudo serão comentados somente os itens relacionados a fator de potência e harmônicos que estão relacionados ao trabalho.

O fator de potência deve ser calculado a partir da potência aparente (S) e da reativa (Q), ou respectivas energias (EA e ER), pelas equações a seguir:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (4.1)$$

As unidades consumidoras devem garantir o fator de potência entre 0.92 e 1.00 indutivo ou entre 1.00 e 0,92 capacitivo. As condições não cumpridas são oneradas na própria conta de energia.

Para os harmônicos o PRODIST explica que o fenômeno é a deformação das formas de onda de tensão e de corrente comparada à frequência fundamental 60 Hz.

A distorção harmônica total de tensão pode ser demonstrada a seguir:

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (4.2)$$

Onde:

DTT = Distorção harmônica total de tensão;

hmáx = Ordem harmônica máxima;

h = Ordem harmônica;

V1 = Tensão fundamental medida;

Vh = Tensão harmônica de ordem h.

A medição em sistemas trifásicos deve ser feita entre fase-neutro em sistemas com o transformador em estrela aterrado e fase-fase para outras configurações. As medições devem levar em consideração entre a fundamental até no mínimo a 25ª ordem harmônica. [23]

Tabela 02 – Referência de distorção harmônica de tensão.

| <i>Tensão nominal do Barramento</i> | <i>Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]</i> |
|--|---|
| $V_N \leq 1kV$ | 10 |
| $1kV < V_N \leq 13,8kV$ | 8 |
| $13,8kV < V_N \leq 69kV$ | 6 |
| $69kV < V_N < 230kV$ | 3 |

Fonte: Prodist modulo 8

5.0 – EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS EM INSTALAÇÕES COM HARMÔNICOS.

5.1 - Transformadores

Em transformadores, os harmônicos causam aumento de perdas por saturação do núcleo, ressonância, vibrações nos enrolamentos e aquecimento proporcionando redução da vida útil por deterioração de isolamento.

Harmônicos de tensão geram perdas no ferro enquanto que os de corrente elevam as perdas no cobre acentuadas pelo efeito pelicular em frequências elevadas.

Há também as perdas relacionadas às correntes induzidas pelo fluxo disperso mais evidente nos enrolamentos e nas partes metálicas próximas ao enrolamento que causam ressonância no transformador.

Entre espiras há uma influência das capacitâncias parasitas que também produzem ressonância [03] e [07].

A IEEE C57.12.00-1987 estabelece limites de distorção harmônica de corrente em transformadores de 5% quando este está carregado simetricamente e de 10% quando em vazio e indica que a medida deve ser realizada no Ponto de Acoplamento Comum² (PAC) e não de forma individual conforme sugerido pela IEC 61000-3-2.

² PAC - Ponto de Acoplamento Comum é definido como o ponto de ligação ou interface entre o sistema de distribuição ao usuário e o sistema de distribuição elétrica. Embora simples em termos de conceito, as vezes a identificação deste ponto é mal interpretada e a medição não reflete a realidade da instalação.

A IEEE 519 também estabelece limites diferentes de distorção conforme os níveis de tensão e corrente de curto-circuito no PAC, conforme tabela abaixo [01].

Tabela 03 - Limite de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição de tensão entre 120V a 69kV. [01]

| Máxima Distorção de Corrente Harmônica em Porcentagem de IL | | | | | | |
|--|------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| Ordem da harmônica individual (Harmônicas ímpares) | | | | | | |
| I_{sc}/I_L | <11 | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TDD |
| <20* | 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 |
| As harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares indicadas acima | | | | | | |
| Distorção de corrente que resulta em um deslocamento DC. exemplo conversor meia onda não são permitidos. | | | | | | |
| * Todo equipamento de geração está limitado a esses valores de distorção de corrente independente de I_{sc}/I_L | | | | | | |
| Onde: I_{sc} = Máxima corrente de curto circuito no ponto de conexão. I_L = Máxima corrente de projeto (Frequência Fundamental) no ponto de conexão PCC. TDD = Demanda total máxima, distorção máxima de corrente (em %) da carga de 15 a 30 min. de demanda. PCC = Ponto de Acoplamento Comum (em inglês Point of common coupling) | | | | | | |

FONTE: IEEE 519-1992

5.1.1 – Fator K dos Transformadores

Diante dos fatos apresentados anteriormente sobre transformadores expostos a harmônicos, se faz necessário a adequação dos mesmos para operar sem que sua vida útil seja reduzida.

Para isso, existe a utilização do Fator K (fator de depreciação) norma UL-1561 de 1994. Trata-se de um índice que pode variar de 1 a 50 (K1 até K50). Um transformador com fator K=1 significa que este é um transformador convencional e não está preparado a operar em condições de distorção harmônica. Caso isso ocorra, o transformador começará a aquecer e terá sua vida útil reduzida consideravelmente.

As alterações na construção do transformador passam por aumentar o tamanho do enrolamento do primário, blindagem eletrostática entre enrolamentos e aumento na

classe de isolamento para 220°C para tolerar melhor os harmônicos bem como isolações transpostas, dois condutores em paralelo para a redução do efeito pelicular, fiação do neutro com seção duplicada e condutores de com menor resistência no secundário. [20]

De forma mais simplificada, pode ser considerado como um sobre dimensionamento do transformador.

A expressão matemática aproximada para o cálculo do fator K pode ser descrita como:

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} = \frac{FC}{\sqrt{2}} \quad (5.1)$$

Onde:

I pico – Corrente de pico do transformador.

I rms – Corrente eficaz do transformador.

FC – Fator de Crista.

Para a potência máxima de um transformador temos:

$$S_{max} = \frac{S_{nom}}{K} \quad (5.2)$$

FONTE: Periódico do Instituto Brasileiro de Cobre (Procobre) – 1º Ed. – 2001

Onde:

K: Fator de depreciação

Smax: Potência máxima do transformador

Snom: Potência nominal do transformador

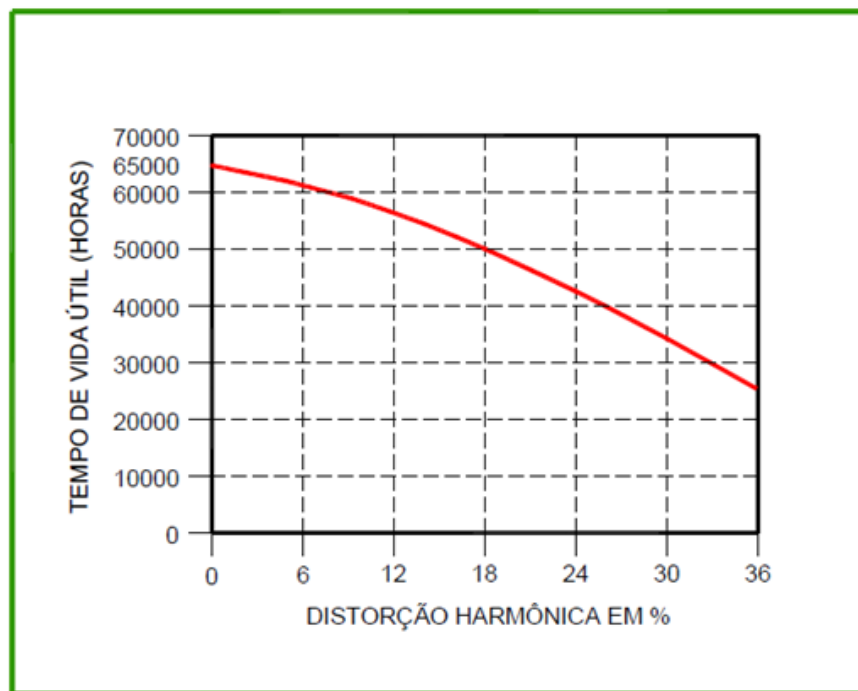


Figura 09 – Curva da expectativa de vida útil de um transformador carregado sob influência de harmônicos.

FONTE: Periódico do Instituto Brasileiro de Cobre (Procobre) – 1º Ed. - 2001

5.2 - Condutores Elétricos.

Quando se faz a especificação de condutores de alimentação para máquinas e equipamentos considerando as especificações da NBR 5410 leva-se em consideração uma corrente de projeto. Em uma instalação trifásica com o sistema equilibrado um projetista adotaria uma regra prática e dimensionaria o condutor de neutro com a metade da seção do cabo das fases. Com o conhecimento de que praticamente todas as instalações estão sujeitas os harmônicos esse dimensionamento de condutores deve ser revisto. Isso pode significar que o condutor de neutro tenha uma seção maior até que o condutor das fases. Para que seja de melhor entendimento o exemplo a seguir é de um circuito trifásico com condutor neutro.

O exemplo, retirado de [05] é parte da NR5410, demonstra como deve-se calcular o condutor de neutro em uma instalação com harmônicas de 3º, 5º e 7º ordens com valores respectivos de corrente de 57, 25 e 17 amperes. A corrente da fundamental é indicada como 110 A.

Essa condição faz com que o circuito esteja carregado com uma corrente (I_{total}) de 127 Amperes.

$$I_{total} = \sqrt{(I1)^2 + (I3)^2 + (I5)^2 + (I7)^2} \quad (5.3)$$

$$I_{total} = \sqrt{(110)^2 + (57)^2 + (25)^2 + (17)^2} = 127 A$$

Para esse exemplo, a corrente que irá circular pelo condutor de neutro (I_n) será a de 3° ordem e seus múltiplos ímpares (9°, 15° etc) que passam pela fases, com uma soma algébrica: $I_n = 57 + 57 + 57 = 171 A$

Com isso temos a corrente total ($I_t = \frac{127 - 110}{110} \times 100$) 15,5% maior que a corrente fundamental que é de 110 A, a corrente de neutro ($I_n = \frac{171 - 110}{110} \times 100$) 55% maior que a corrente fundamental de 110 A. [05]

Com a consideração de que a instalação possui 4 condutores carregados, usamos a tabela 42 da NBR 5410 para o dimensionamento do cabo.

O dimensionamento dos condutores leva em consideração a recomendação da tabela 33 da NBR 5410.

$$(Seção = \frac{\text{Corrente de Fase para 3 condutores carregados}}{\text{Fator para feixe de cabos embutidos}} = \frac{127A}{0,8} = 159 A) \quad (5.4)$$

Seção prevista para 159 Amperes.

Seção=70 mm² conforme tabela 33 da NBR5410/2004.

$$(Seção = \frac{\text{Corrente de Neutro para 3 condutores carregados}}{\text{Fator para feixe de cabos embutidos}} = \frac{171A}{0,8} = 219 A)$$

Seção prevista para 219 Amperes.

Seção=95 mm² conforme tabela 33 da NBR5410/2004.

Se o sistema fosse todo dimensionado sem a consideração de harmônicos, teríamos:

Corrente fundamental de 110 A que indicaria um condutor de Seção=35 mm², e um condutor de neutro de 25 mm² considerando a tabela 31 da NBR 5410.

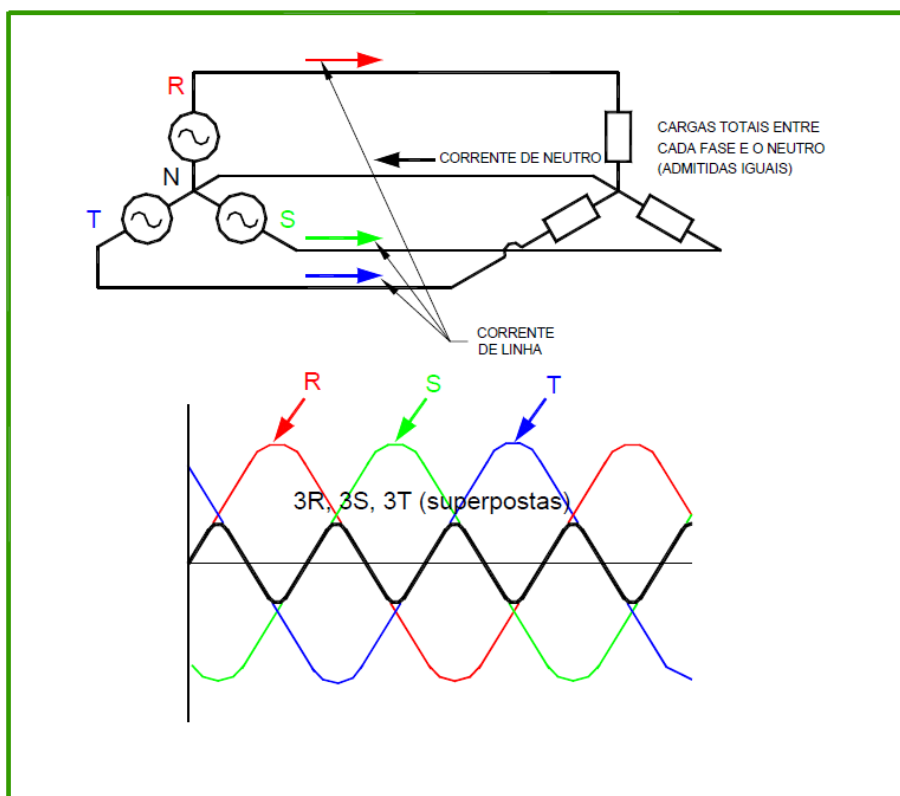


Figura 10 - Circuito trifásico com cargas não lineares balanceadas, com correntes da fundamental e de 3º ordem.

Fonte: Dimensionamento de condutores na presença de harmônicas

5.3 – Dispositivos de Proteção

Outra consequência aos sistemas com harmônicos são os problemas relacionados aos dispositivos de proteção.

Os harmônicos de corrente que circulam no sistema elétrico são somados à corrente de frequência da fundamental e provocam aquecimento adicional nesses dispositivos que tem sua atuação prejudicada, uma vez que são construídos e dimensionados para trabalho em correntes da fundamental. O exemplo a seguir demonstra um fusível exposto a harmônicos. Mesmo que a corrente de operação seja

menor que a nominal do fusível, esse teve o seu elemento interno danificado, mesmo sem que ocorresse sobre corrente.

As fotos abaixo ilustram um fusível que sofreu aquecimento de dentro para fora e o elemento de fusão rompeu-se.



Figura 11 – Fusível danificado por harmônicos de corrente.

Relês de proteção e disjuntores atuam ou desarmam de forma inadequada e inesperada sob presença de harmônicos. Como descrito pelo autor em [19], “harmônicos de 3° ordem que correspondem a correntes e tensões de seqüência zero podem causar a operação indevida das proteções a terra”.

Fabricantes destes dispositivos de proteção informam em suas literaturas técnicas que até 15% de distorção harmônica não interferiria em seus funcionamentos, mas a recomendação é a de que esse nível seja controlado a um nível máximo de 10%. [19]

Outro fator importante é que as medições onde se deseja identificar harmônicos sejam realizadas com equipamentos adequados que possam “enxergar” o valor eficaz RMS para que não seja feita a leitura errada.

5.4 – Motores Elétricos.

Os motores sofrem os efeitos harmônicos de forma semelhante aos transformadores. As correntes harmônicas geram perdas por efeito Joule (aquecimento) no enrolamento do estator e conseqüentemente reduzindo seu rendimento. Para minimizar esse problema a solução encontrada é reduzir o torque nominal ou o sobredimensionamento do motor.

5.5 – Fator de Potência.

O fator de potência é a relação entre a tensão e a corrente num sistema elétrico que pode ser indutivo ou capacitivo como demonstrado nos exemplos da figura 12.

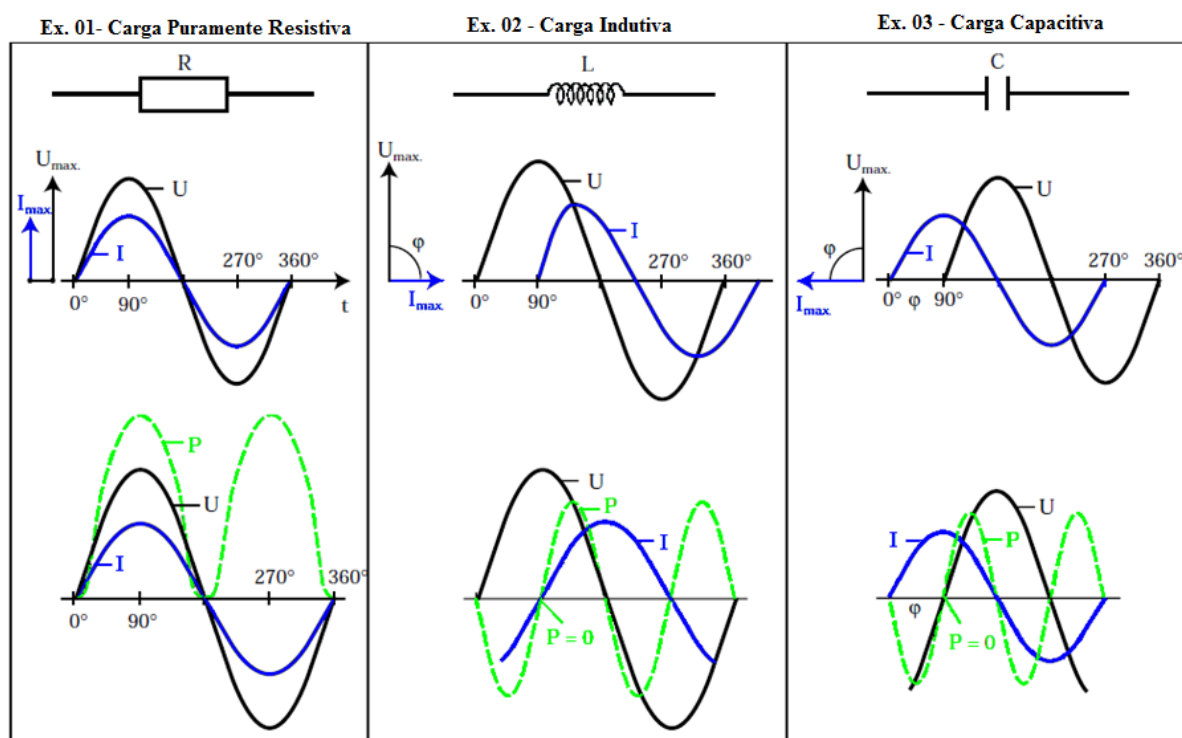


Figura 12 - Representação da forma de onda para carga resistiva, Indutiva e capacitiva.

Fonte: Material de treinamento sobre filtros de harmônicas - Danfoss

Ex. 01 – Carga Resistiva. Não há defasagem entre a tensão e a corrente.

Ex. 02 – Carga Indutiva. A corrente está atrasada em 90° em relação à tensão.

Ex. 03 – Carga Capacitiva. A corrente está adiantada em 90° em relação à tensão.

Quando ocorre a distorção da forma de onda, o fator de potência tem influencia do THiD e passa a ser dependente das potência ativa, reativa e harmônica, indicada pela equação abaixo.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (5.5)$$

Onde:

S = Potência Aparente

P = Potência Ativa

Q = Potência Reativa

D = Potência harmônica

A figura 13 ilustra a defasagem entre a corrente e a tensão chamado de fator de potência e a figura 14 representa o “triângulo” de potência que agora com a componente harmônica passa a ser tridimensional com o gráfico com coordenadas X,Y e Z .

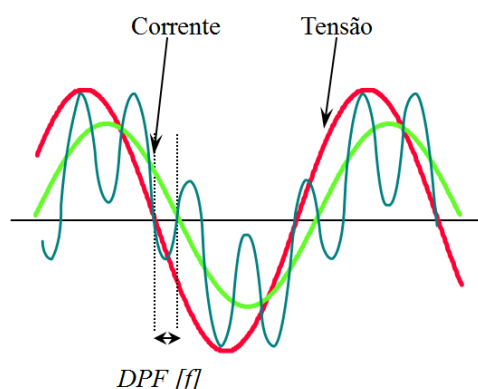


Figura 13 – DPF. Defasagem no Fator de Potência.

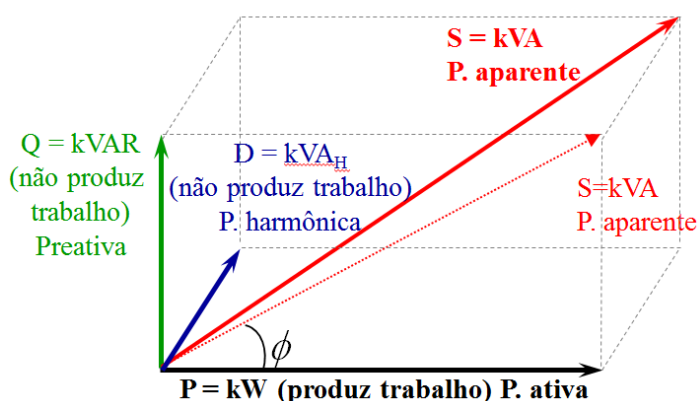


Figura 14 – Diagrama fatorial harmônica.

Como a maioria das instalações existentes tem como base o uso de motores elétricos, ou seja, cargas indutivas, se faz necessário a implementação de bancos de capacitores com o intuito de fazer a correção do fator de potência. A instalação dos bancos de capacitores deve prever algumas situações, como harmônicos e ressonância do sistema elétrico. Esse tópico descreve os cuidados com esse dispositivo para que não ocorram problemas com sua utilização.

Fator de potência é a relação entre a e a potência ativa (P) que é a realmente utilizada pelo dispositivo (aqui o motor) e a potência aparente (S) cobrada na conta de energia elétrica

$$FP = \frac{P (W)}{S (VA)} = \cos \phi \quad (5.6)$$

Onde:

FP = Fator de Potência

P = Potência Ativa

S = Potência Aparente

As recomendações das concessionárias de energia é a de que esse fator seja igual ou superior a 0,92. A figura abaixo demonstra que quanto maior o fator de potência, menores serão as perdas por potência reativa.

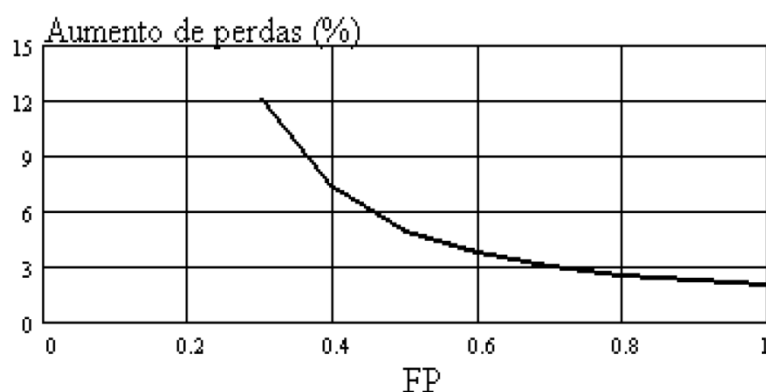


Figura 15 – Quanto maior o fator de potência, menor a perda percentual por potência reativa.

Fonte: Curso de Extensão da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

Quando o valor do fator de potência encontrado é menor que o 0,92, existe a cobrança de multa. Com o auxílio do triângulo de potência é possível perceber que quanto maior for o fator de potência, ou seja, quanto menor o ângulo Φ mais próximo será o valor de potência ativa e potência aparente e conseqüentemente mais eficiente será o sistema.

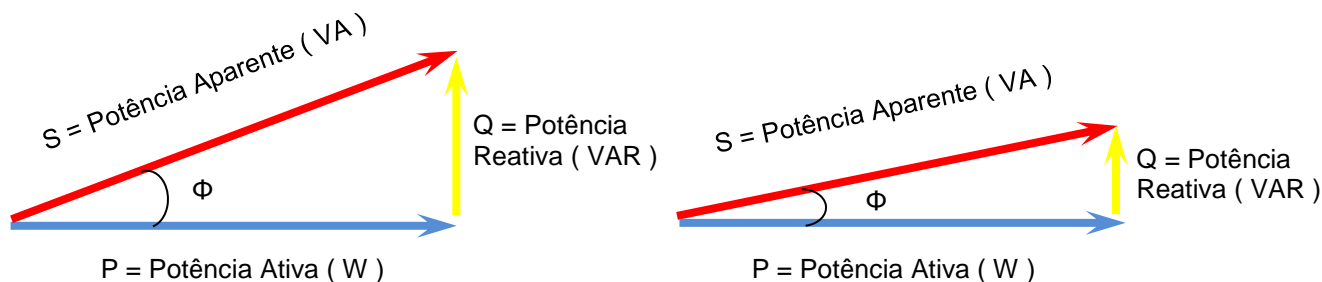


Figura 16 e 17 - Triângulo de potências com variação do fator de potência.

Pode se observar na figura 16 que quanto maior o ângulo Φ em relação à figura 17, maior será a potência aparente. De forma análoga, podemos comparar o sistema com um fator de potência próximo a 1 com uma fonte e uma carga que possuem praticamente a mesma impedância, o que proporciona um “casamento de impedância” e com isso a máxima transferência de potência.

Com o banco de capacitores instalado temos a solução para o fator de potência, mas nesse momento deve ser verificado o problema com os harmônicos do sistema. Frequências mais elevadas fazem com que o capacitor tenha sua impedância reduzida e com isso o risco de dano ao mesmo reduzindo drasticamente sua vida útil, além que ainda pode ocorrer ressonância que “amplifica” tensão e corrente do sistema.

Frequência de Ressonância

$$f = \frac{1}{(2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C})} \quad (5.7)$$

Onde:

f – Frequência de Ressonância

L – indutância

C – Capacitância

Para minimizar esses problemas, pode-se instalar em série com os capacitores uma impedância e essa associação comporta-se como um dispositivo indutivo para frequências menores e limitando agora a corrente harmônica que circula no capacitor.

Os capacitores instalados do lado de baixa tensão proporcionam uma redução de perdas por efeito “joule” do transformador e melhoram o nível de tensão em pontos mais afastados das subestações. [06].

5.6 – Soft Starter.

Um dispositivo de partida suave (ou em inglês *soft starter*) é um equipamento eletrônico formado por dois ou três tiristores (scr's) na configuração antiparalelo.

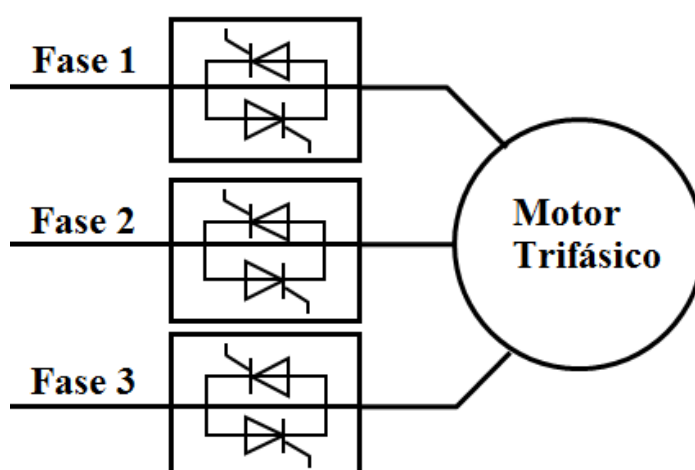


Figura 18 – Tiristores (SCR's) montados em antiparalelo

Fonte: Manual do equipamento Aucom MVS – Ref. 710-08792-00A

Através de uma eletrônica de controle, esses SCR's são acionados (disparados) ajustando a tensão nos terminais de saída. Esse controle de tensão é possível porque a eletrônica determina o ângulo de disparo dos SCR's e desta forma consegue minimizar a corrente de partida do motor.

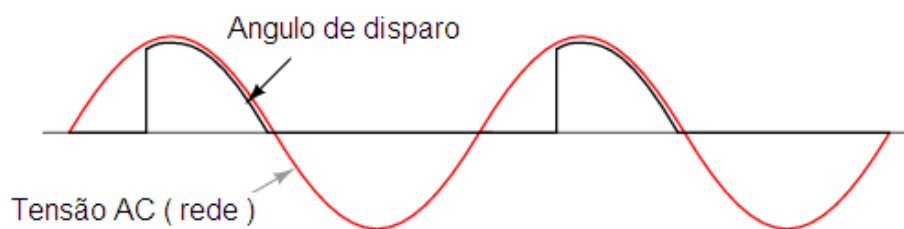


Figura 19 – Ângulo de disparo dos scr's

Fonte: Manual do equipamento Aucom MVS – Ref. 710-08792-00A

Quando a abertura do ângulo é concluída, os SCR's passam a ser um “curto-circuito” e o motor vai operar em tensão plena. Alguns equipamentos possuem um contator (K0) colocado em paralelo com os terminais de entrada e saída do *soft starter*. Esse contator é acionado quando o equipamento finaliza o controle de disparo e proporciona o curto-circuito entre a entrada e a saída fazendo com que os SCR's não tenham corrente sobre eles.

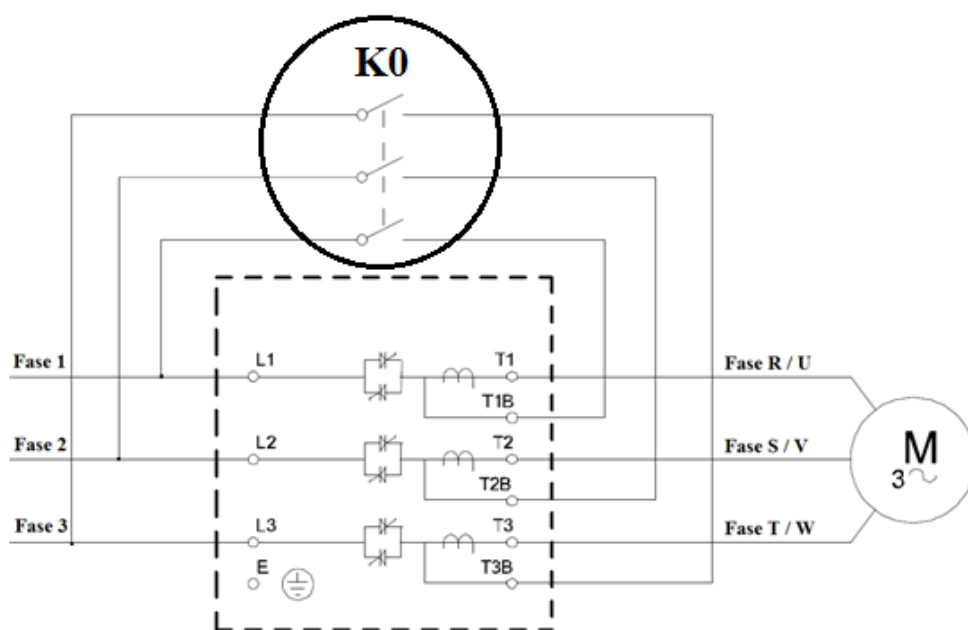


Figura 20 – Diagrama de um *Soft Starter* com SCR's montados em antiparalelo

Fonte: Manual do equipamento Aucom MVS – Ref. 710-08792-00A

Todos esses comentários tem a finalidade de demonstrar que o *Soft Starter* tem as mesmas características de uma carga não linear, mas com uma diferença que pode ser muito importante. O chaveamento dos SCR's sempre vão ocasionar harmônicos,

mas isso ocorre durante um tempo relativamente curto. O que se espera de um equipamento deste tipo é que a “partida” ou o acionamento do motor ocorra entre 5 e 30 segundos. Com isso, pode não ser necessária nenhuma correção, como a instalação de filtros.

5.7 – Conversor de Frequência

São equipamentos destinados a controlar motores elétricos variando sua velocidade através da modulação da frequência. Os conversores são cargas não lineares porque possuem retificadores na entrada de alimentação que podem ser controlados ou não. Esses retificadores podem ser de 6 diodos (6 pulsos - $6.h \pm 1$) que geram harmônicas de 5°, 7°, 11°, 13°, 17° e 19° ordem com amplitudes para as menores ordens que variam entre 10% a 40% dependendo da característica de produção do conversor.

O gráfico abaixo demonstra um exemplo de harmônicas geradas por um conversor de 6 pulsos.

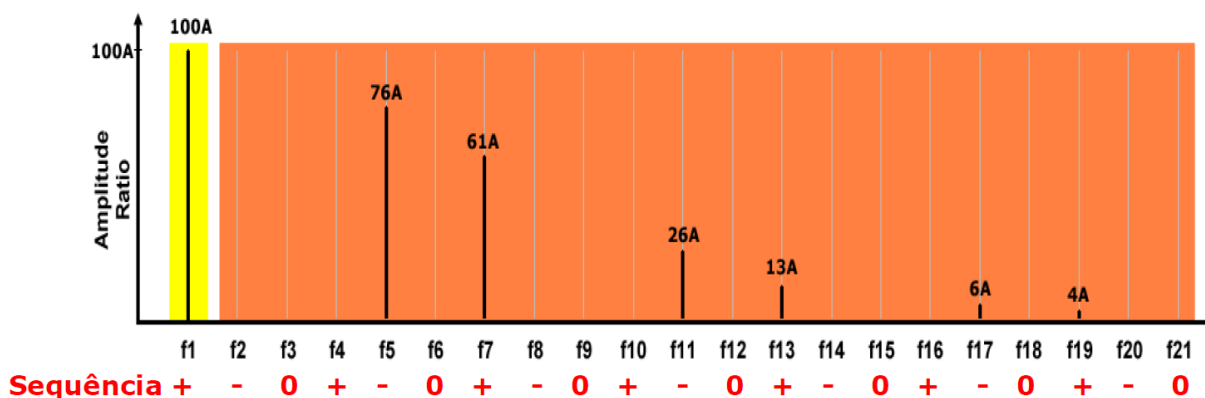


Figura 21 – Espectro da Distorção Total de Corrente Harmônica – THiD.

Fonte: Treinamento de filtros de harmônica

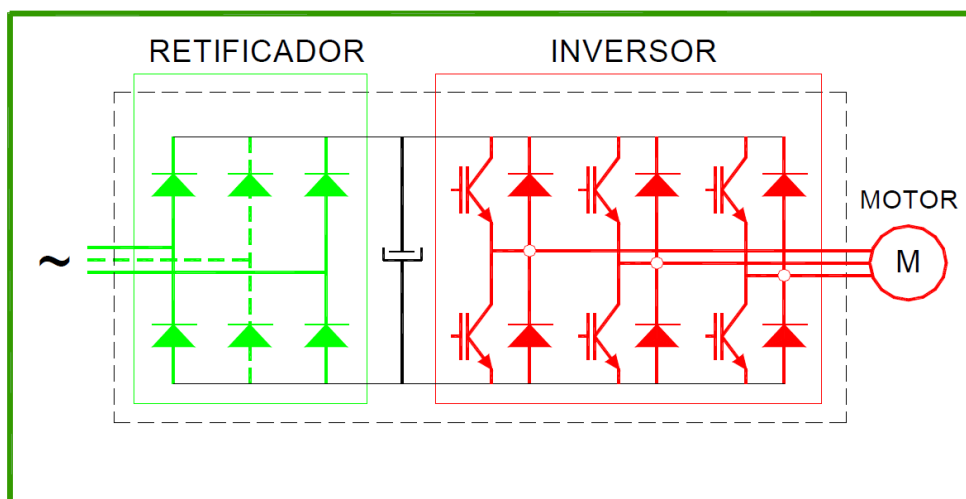


Figura 22 – Diagrama de um conversor de frequência de 6 pulsos

Fonte – Artigo Técnico Conservação de energia e sua relação com a qualidade da energia elétrica.

Já os retificadores com 12 diodos (12 pulsos - $12 \cdot h \pm 1$) geram harmônicas de 11°, 13°, 17°, 19°, 23° e 25° ordem que são as mais expressivas. Harmônicas de ordens maiores possuem amplitudes menores. Para um sistema de 12 pulsos, o conteúdo harmônico já é estimado entre 10 a 15%. A figura abaixo demonstra um transformador com defasagem em 30° para que seja possível fazer a alimentação de um conversor de 12 pulsos.

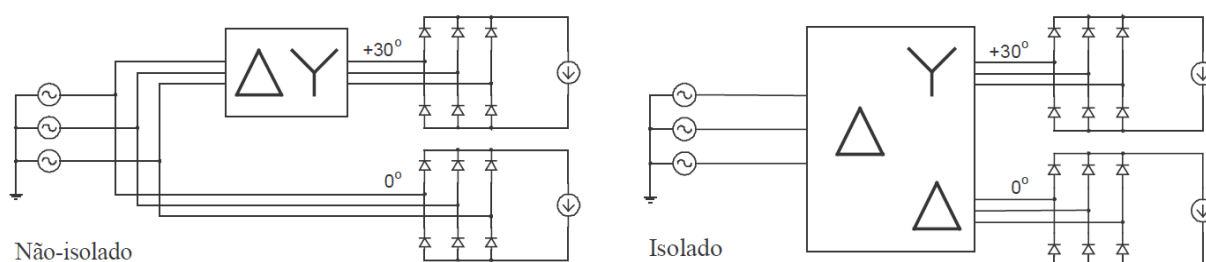


Figura 23 – Transformador para conversor 12 pulsos - Defasado em 30°

Fonte: Redução de harmônicos de Corrente em Retificadores de Múltiplos Pulsos.

Em sistemas com 18 pulsos já será menor que 10%. Para todos os casos e demais tipos deve-se levar em consideração a condição $K \cdot h \pm 1$, onde K é o número de pulsos e o resultado será a ordem do harmônico que será inserido ao sistema. A figura 24 demonstra um transformador com defasagem em 20° para que seja possível fazer a alimentação de um conversor de 18 pulsos.

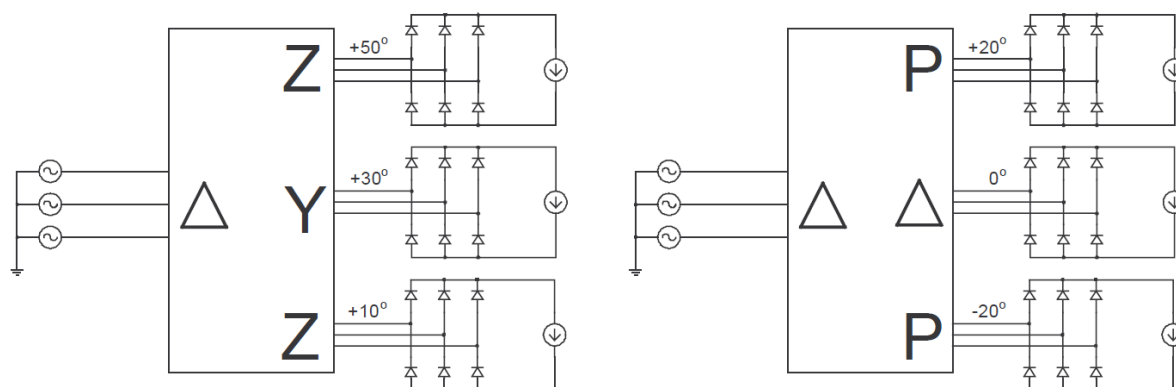


Figura 24 – Transformador para conversor 18 pulsos - Defasado em 20°

Fonte: Redução de harmônicos de Corrente em Retificadores de Múltiplos Pulsos.

O problema da alternativa de aumentar o número de pulsos está relacionado a custo do equipamento. Os conversores comerciais mais usuais são de 6 pulsos. Inversores de 12 e 18 pulsos dependem de instalações “dedicadas” com transformadores de alimentação especiais com secundários duplo ou triplo defasados entre eles. Como não são modelos “standard” seu custo é bem mais elevado. A informação vale tanto para os transformadores quanto para os conversores de frequência.

6.0 – ESTUDO DE CASO.

6.1 – Estudo de Caso 01 - SAAE Mogi Mirim / SP.

O estudo de caso relata a ampliação de um acionamento de motor elétrico (conversor de frequência) no sistema de abastecimento de água na cidade de Mogi Mirim, interior de São Paulo, visando atender a necessidade da cidade que está para receber um CPD (Centro de Processamento de Dados) de grande porte de banco.

Esse projeto teve parte do pagamento subsidiado pela distribuidora de energia CEMIRIM (Cooperativa de Eletrificação e Desenvolvimento da Região de Mogi Mirim) dentro dos projetos de investimento de eficiência energética da mesma.

Esse site já possuía três bombas de água bruta de 300 kW com acionamento por partida direta. O sistema atual não atenderia a necessidade das novas instalações do CPD e por essa razão foi instalada uma quarta bomba agora aplicando um conversor de frequência de fabricação Danfoss com filtro ativo incorporado. Esse produto recebe o nome de LHD (Low Harmonic Drive).

Abaixo algumas características dos equipamentos, motor e bomba d'água e conversor de frequência.

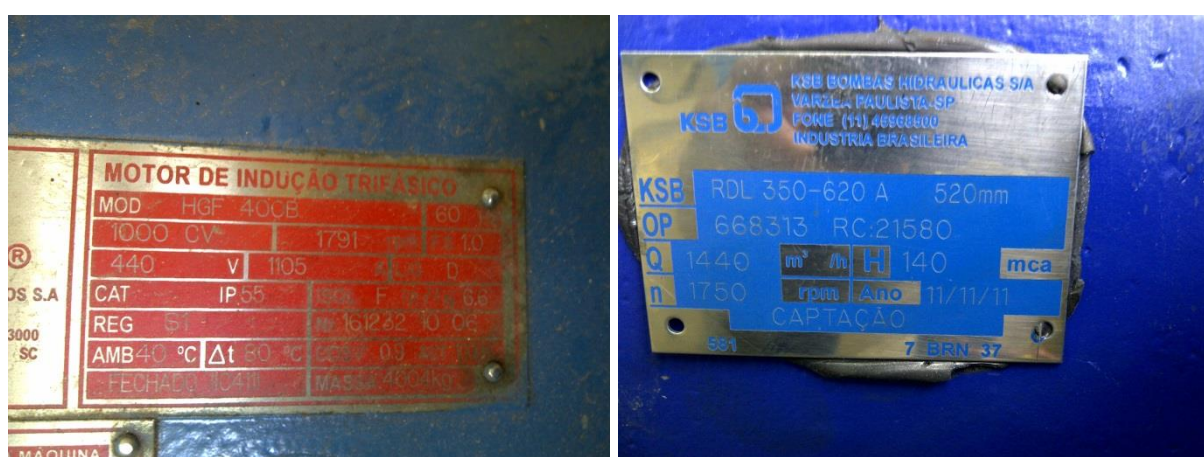


Figura 25 - Motor: WEG 1000 CV – 440 VAC – 1105 A – 1791 RPM – FS 1.0

Figura 26 - Bomba: KSB RDL 360-620 A – Vazão 1140 M3 – 1750 RPM



Figura 27 - Conversor de Freqüência: Modelo VLT FC 202 - 1000HP – 440 VAC – 1160 A.

Figura 28 – Fotos da instalação. Motor, bomba e conversor de freqüência.

Após a instalação do equipamento e parametrização, o novo conjunto de motor e bomba foi acionado e a monitoração dos harmônicos foi realizada.

Nesse exemplo o conversor de frequência está controlando o motor a 57 Hz com uma corrente de operação de 960 A. O filtro está apenas energizado, mas não está em operação.

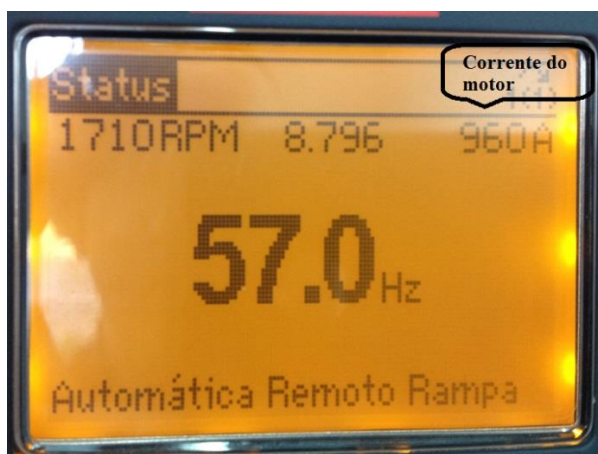


Figura 29 – Motor em operação consumindo uma corrente de 960 A.



Figura 30 – IHM do filtro (ainda fora de operação) com corrente na entrada de 929 A.

A indicação na figura 30 é de uma THiD (distorção harmônica total) de 31%.

A medição foi comparada através de um analisador de qualidade de energia marca Fluke 435. As figuras abaixo mostram a medição do analisador da distorção harmônica de tensão de 6,2% e a de corrente em 32,2%.

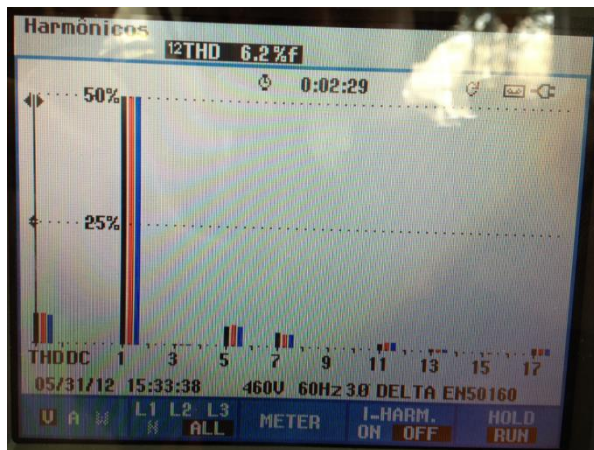


Figura 31 – THvD de 6,2%

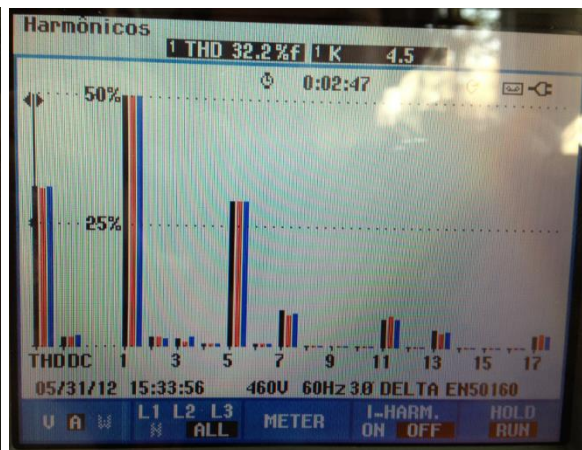


Figura 32 – THiD de 32,2%

A partir da medição realizada, temos a estimativa dos valores para as correntes harmônicas indicadas abaixo para o calculo da corrente total (THiD).

Cálculo Estimado:

I fundamental = 929 A (dado retirado da leitura de corrente de entrada do filtro).

5° harmônica - 27% de 929 A = 250 A

7° harmônica - 8% de 929 A = 74,3 A

11° harmônica - 6% de 929 A = 55,74 A

13° harmônica - 4% de 929 A = 37,16 A

17° harmônica - 3% de 929 A = 27,87 A

$$THiD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{(h)}}{I_{(h1)}} \right)^2} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

)

$$THiD = \sqrt{\left(\frac{-250A}{929A}\right)^2 + \left(\frac{74,3A}{929A}\right)^2 + \left(\frac{-55,74A}{929A}\right)^2 + \left(\frac{37,16A}{929A}\right)^2 + \left(\frac{-27,87A}{929A}\right)^2} \times 100$$

$$THiD = 29,14\%$$

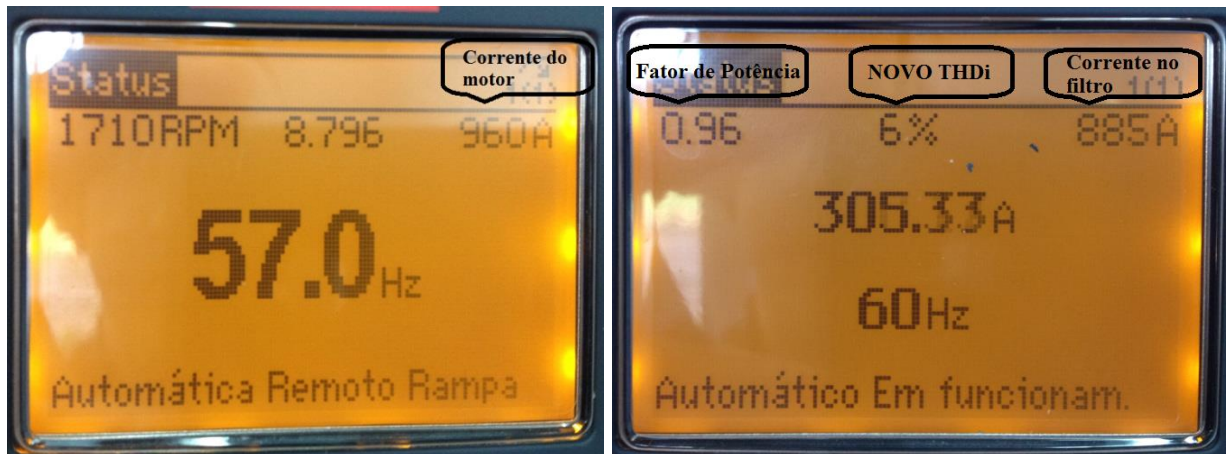


Figura 33 – Motor em operação consumindo uma corrente de 960 A.

Figura 34 – IHM do filtro (em operação) com corrente na entrada de 885 A.

Na figura 34 pode-se ver o fator de potência em 0,96 que está dentro do exigido ($\geq 0,92$) e a corrente que anteriormente era de 929 A na entrada do filtro, baixou para 885 A.

O novo THiD é de 6%. Essa medição foi feita junto à entrada do filtro, como permite a IEC 61000-3-2. A Medição no PAC não foi possível porque não havia disponibilidade de equipamento adequado para a medição em média tensão. Mesmo assim a concessionária informou posteriormente que a instalação estava dentro dos parâmetros estabelecidos com valores menores que 5% em corrente.

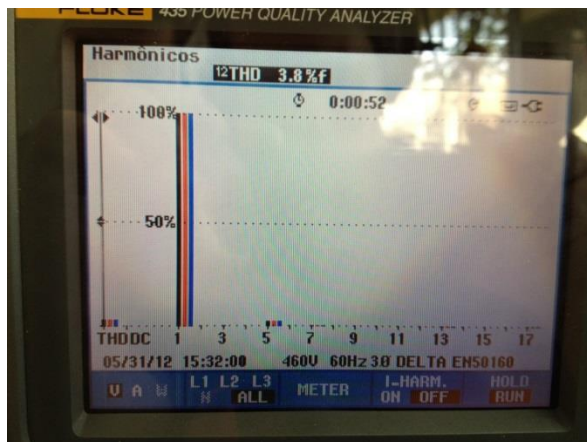


Figura 35 – THvD de 3,8%

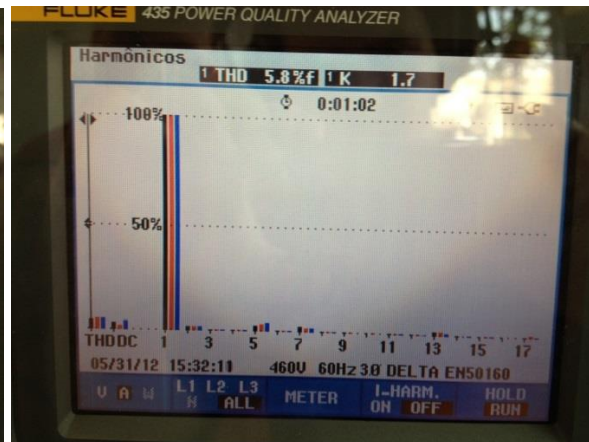


Figura 36 – THiD de 5,8%

Repetimos a medição e os cálculos agora com filtro em funcionamento e o THiD foi reduzido a 5,8% conforme medição realizada pelo equipamento.

Cálculo Estimado:

I fundamental = 885 A (dado retirado da leitura de corrente de entrada do filtro em operação).

5° harmônica - 4% de 885 A = 35,40 A

7° harmônica - 3% de 885 A = 26,55 A

11° harmônica - 0% de 885 A = 0 A

13° harmônica - 2% de 885 A = 17,70 A

17° harmônica - 1% de 885 A = 8,85 A

$$THiD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{(h)}}{I_{(h1)}} \right)^2} \cdot 100\%$$

$$THiD = \sqrt{\left(\frac{-35,4A}{885A} \right)^2 + \left(\frac{26,55A}{885A} \right)^2 + \left(\frac{-0A}{885A} \right)^2 + \left(\frac{17,7A}{885A} \right)^2 + \left(\frac{-8,85A}{885A} \right)^2} \times 100$$

$$THiD = 5,47\%$$

6.1.1 – Apresentação de Resultados – Estudo de Caso 01.

Na aplicação do filtro LHD em conjunto com o conversor de frequência o resultado foi a mitigação dos harmônicos, reduzindo o THiD de 32% para 5,8%. O nível é aceitável pela concessionária e dentro das expectativas da instalação.

Como se tratava de uma nova instalação com a implantação do novo acionamento, toda a estrutura elétrica estava adequada e não foi necessária nenhuma ação que introduzisse limitações ao sistema. Não há registro do fator de potência do sistema anterior à instalação do novo equipamento. A indicação registrada agora foi a de que o fator de potência com o filtro em operação é de 0,96.

Um ponto verificado é a diferença de corrente do sistema com o filtro desligado e ligado. A corrente sem a ação do filtro é de 929A enquanto que com o filtro em funcionamento essa corrente de operação nas mesmas condições passa a ser de 885A, redução de aproximadamente em 5% (44A) que deixam de ser “consumidos”.

Esse fato é reflexo da redução de correntes harmônicas e do maior fator de potência, que em tese, seria na melhor das hipóteses de 0,90 (dado de placa do motor).

6.2 – Estudo de caso 02 – Usina de Açúcar e Etanol / SP.

O estudo de caso 02 apresenta a instalação de um filtro ativo na barra de alimentação de um CCM (Centro de Controle de Motores) com 28 conversores de frequência e alguns motores de pequeno porte com partida direta de uma usina de açúcar e etanol. O sistema é parte do processo de fabricação de levedura da planta e ainda não está em plena carga, estando prevista uma ampliação. Essa instalação possui um transformador de 2MVA que hoje atende a uma potência instalada nominal aproximada de 400 kW, mas que em operação consome 250 kVA.

Como a ampliação prevê a implantação de motores maiores com acionamento através de conversores de frequência, a usina fez a compra de um filtro ativo para mitigar harmônicos e correção de fator de potência. Como a instalação deste filtro é simples, ele foi colocado em operação mesmo não havendo ainda índices elevados de distorção harmônica. Sua principal função nesse momento é a correção do fator de potência que comprovadamente passou de 0,78 para 0,98.

Como início do trabalho foi realizada a medição do sistema sem o filtro. Os valores medidos foram registrados através de fotos demonstradas a seguir:



Figura 37 – Foto do Painel do CCM

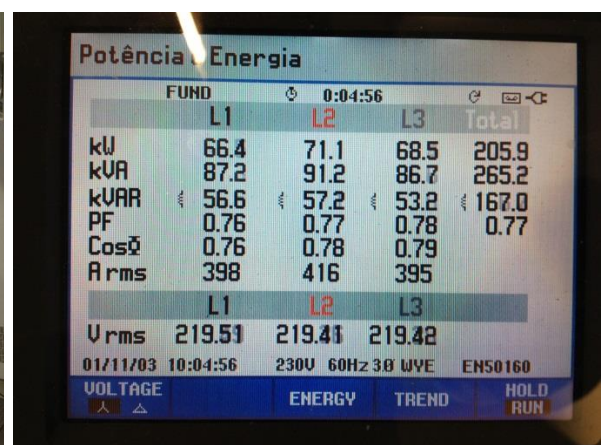


Figura 38 – Foto do analisador de energia com fator de potência igual a 0,77.

As figuras 39 e 40 indicam respectivamente as leituras de um multimedidor com as potências aparente, ativa e reativa e o fator de potência do sistema.



Figura 39 – Multimedidor com indicação da potência consumida pelo sistema.



Figura 40 – Multimedidor com a indicação do fator de potência em 0,78.

Foi realizada a instalação do filtro (conexões elétricas) para a alimentação e sinais do TC (Transdutor de Corrente) para a medição. É através deste sensor de corrente que as “ações” do filtro são realizadas. A medição de corrente na barra que fornece energia aos equipamentos e motores do sistema em questão, proporciona ao filtro a necessidade de correção do fator de potência e dos harmônicos.



Figura 41 – Barramentos de alimentação de motores e acionamentos.



Figura 42 – Identificação do transdutor de corrente TC (4000 A / 5 A).

O filtro, a partir da leitura de corrente harmônica e fator de potência, impõe ao sistema uma corrente harmônica em oposição de fase (contra-harmônica), tendo como resultado o cancelamento de parte da sua amplitude. Isso ocorre através dos módulos de potência IGBT³.

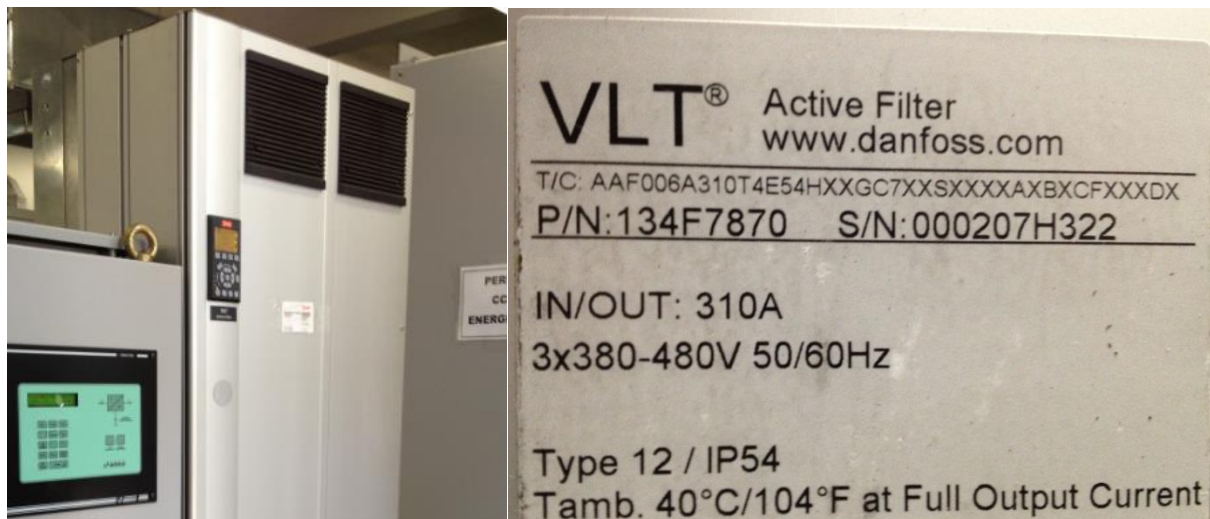


Figura 43 – Foto do equipamento (Filtro Ativo para Harmônicos).

Figura 44 – Identificação do filtro ativo para 310 A.

A medição indicou um THiD médio de 6,5% e um fator de potência de 0,78.

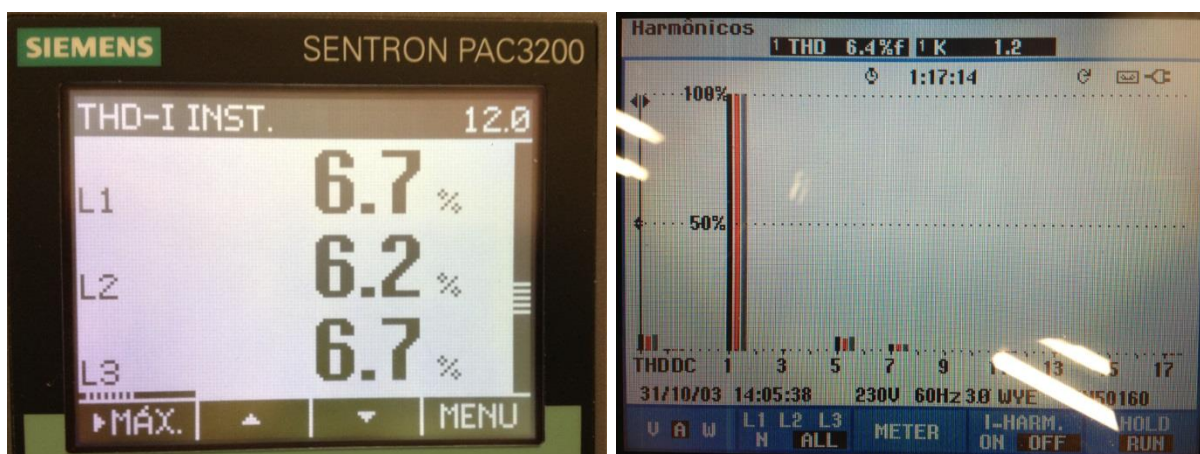


Figura 45 – Multimedidor com a indicação da distorção harmônica.

Figura 46 – Analisador de energia com a indicação de valor médio de THiD em 6,4%.

³ IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor* ou Transistor Bipolar de Porta Isolada.

Com a medição inicial concluída e a parametrização realizada no filtro, foi dado início a nova monitoração de THiD e fator de potência. O teste inicial consistiu em conseguir um fator de potência de 0,98 e verificar a distorção harmônica. Isso foi definido porque a distorção harmônica já era baixa como mencionado anteriormente. A consequência foi o fator de potência verificado em 0,98 e um THiD médio de 2,9%.

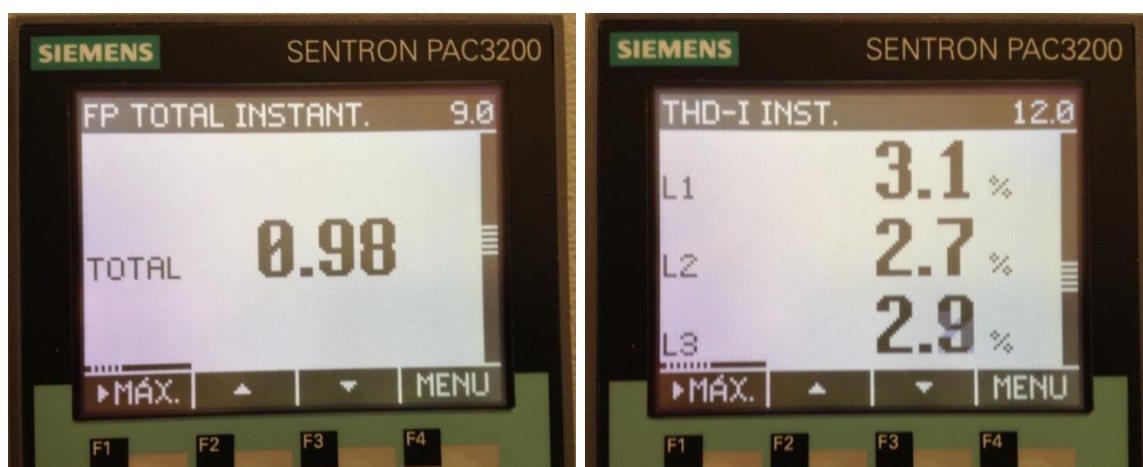


Figura 47 – Multimedidor com a nova indicação do fator de potência em 0,98.

Figura 48 – Nova indicação de valor médio de THiD em 2,9%.

Um novo ajuste foi feito, agora para um fator de potência de 0,92, disponibilizando assim uma corrente maior para a correção de harmônicos quando o sistema estiver carregado. Vale o comentário de que quando o sistema estiver em carga o fator de potência e os harmônicos serão maiores que os encontrados.



Figura 49 – Multimedidor com a indicação do fator de potência em 0,92.

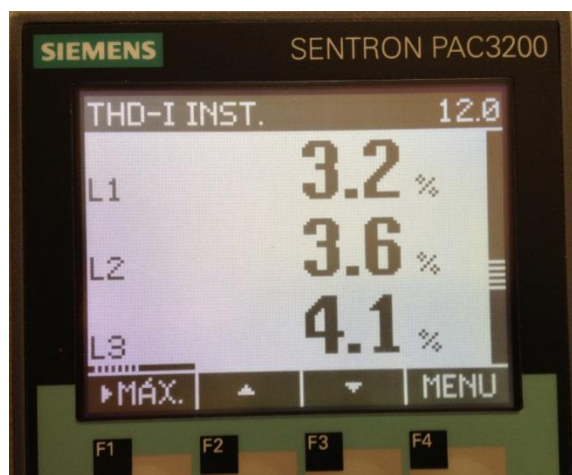


Figura 50 – Indicação de valor médio de THiD em 3,6%.

No filtro e no analisador de energia tivemos as mesmas leituras do multimedidor instalado no painel do CCM.

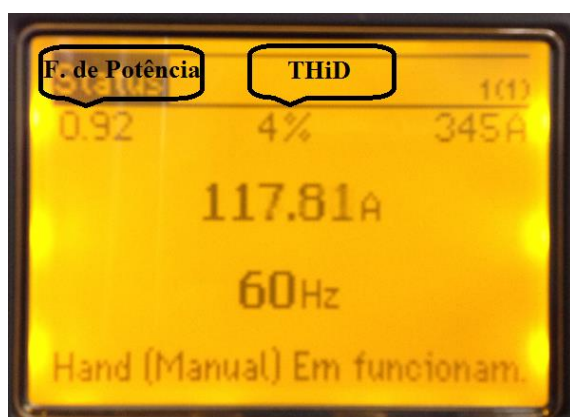


Figura 51 – Fator de potência em 0,92 e THiD em 4%.

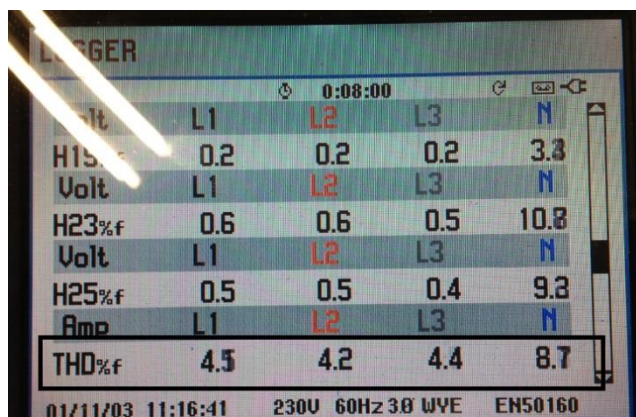


Figura 52 – Analisador de energia com valor médio de THiD em 4,4%.

6.2.1 – Apresentação de Resultados – Estudo de Caso 02.

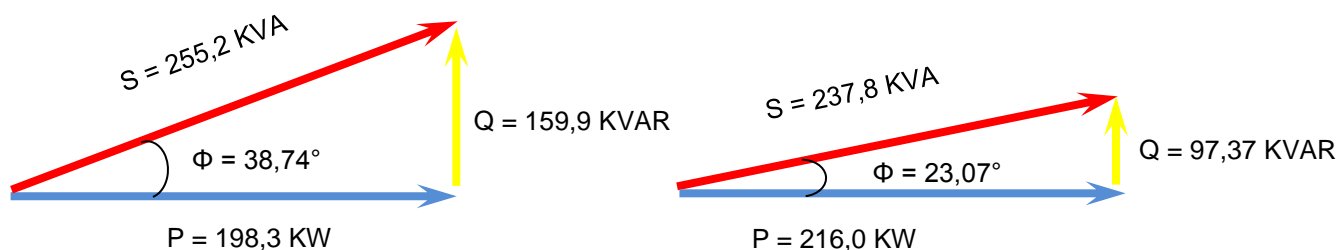
O resultado para esse caso é a diminuição da potência reativa. As reduções em valores absolutos para o exemplo seriam de 64% com a correção do fator de potência de 0,78 para 0,92.

Fica claro que esse valor não é totalmente “real” porque a medição foi realizada em momentos distintos e o valor encontrado de potência ativa não é o mesmo nos dois momentos (redução em 7,3%), mas pode-se confirmar a eficiência do equipamento instalado (filtro ativo). Refeito o cálculo considerando uma correção de aproximadamente 8% nos dados da figura 53, mesmo assim redução da potência reativa seria de 51%.



Figura 53 – Multimedidor com a indicação das potências e fator de potência em 0,78.

Figura 54 – Multimedidor com a indicação das potências e fator de potência em 0,92.



Figuras 55 e 56 – Potências ativa, reativa e aparente e fator de potência.

7.0 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Todos os resultados apresentados foram verificados em campo durante a instalação e implantação dos equipamentos. Para que isso fosse possível, existiu anteriormente um estudo que fez o levantamento da planta visando conhecer as características da instalação. A partir desta avaliação é possível “simular” o comportamento dessa planta e verificar qual seria a condição de harmônicos como também do fator de potência. Isso pode ainda ser melhorado com a medição da instalação com um analisador de energia. Com essa simulação e resultados, é possível inserir o filtro ativo e identificar seu dimensionamento.

O estudo é feito com base em uma ferramenta/software chamado MCT-31. Esse software é carregado com informações da instalação, como dados do transformador, comprimento e bitola de cabos, equipamentos alimentados por esse transformador e outras cargas como motores e banco de capacitores. O resultado está apresentado abaixo. A simulação apresentada reflete o que encontramos descrito no estudo de caso 02.

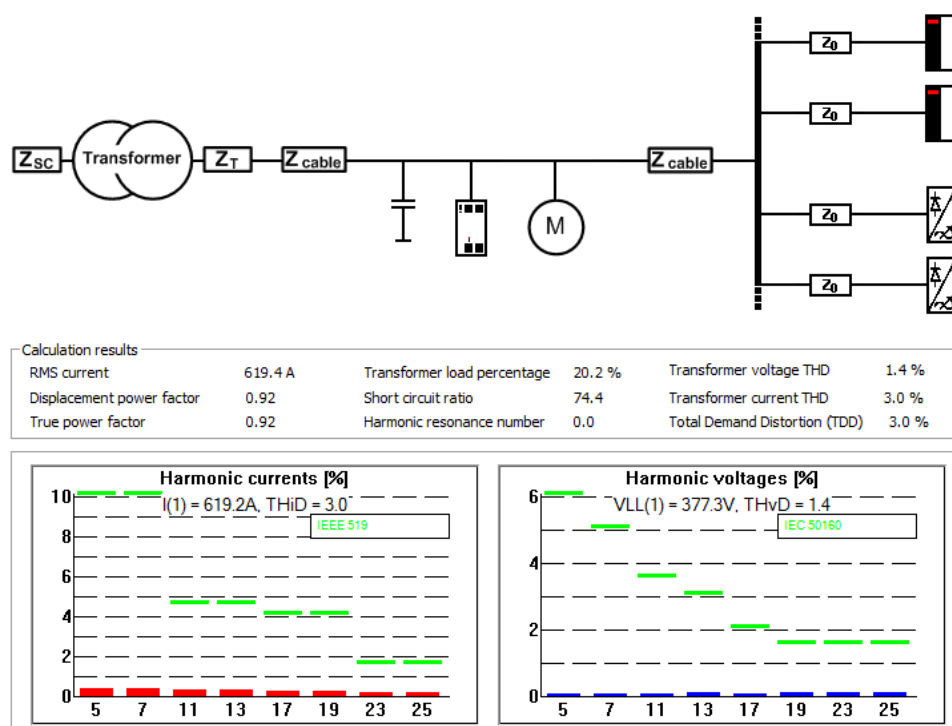


Figura 57 – Apresentação gráfica do software MCT-31.

8.0 – CONCLUSÃO.

O trabalho abordou o problema sobre harmônicos para o sistema elétrico, indicando recomendações sugeridas pelo IEEE 519-1992, IEC 61000-3-2 e no Brasil a norma NBR 5410 além do PRODIST com assuntos relacionados.

Foram identificados alguns dos equipamentos e dispositivos geradores de harmônicos com maior ênfase às indústrias que possuem um número muito grande destes dispositivos. Também apresentamos equipamentos que são comercializados para mitigar os efeitos harmônicos como filtros passivos, ativos e híbridos que possuem características favoráveis e desfavoráveis dependendo da necessidade.

Apresentamos dois estudos de caso, onde foram aplicados equipamentos que são filtros ativos e esses proporcionaram as devidas correções e colocam as instalações dentro de parâmetros aceitáveis com o benefício de redução do uso da energia e consequentemente redução da conta de energia elétrica.

O trabalho também teve como objetivo demonstrar o que deve ser verificado em uma instalação para que a avaliação do problema seja correta levando em consideração os pontos de medição (PAC) para cada situação.

Uma medição em um ponto errado pode levar a uma correção inadequada uma vez que o IEEE o IEC tem pontos de medição distintos e consequentemente os valores medidos também diferentes.

De uma forma geral, o intuito é o de não avaliar a situação por um único ponto de vista, mas sim um conjunto de verificações e medições que vão levar a correção de forma mais rápida e eficaz mesmo que não seja a menos custosa ao usuário final.

9.0 –REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[01] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," June 1992.

[02] Filtros Ativos Paralelos Aplicados a Sistemas Elétricos Trifásicos a Quatro Fios.

- Neto, A. F. – Londrina/PR - 2009 - Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual de Londrina.

[03] Análise de Filtros Passivos de Harmônicas de Conversores CA/CC de Seis Pulsos.

- Silva, M. M. D. – Rio de Janeiro/RJ – 2007 - Dissertação de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[04] Harmônicas nas instalações elétricas – Causas, efeitos e soluções.

- Periódico do Instituto Brasileiro do Cobre (Procobre) – São Paulo/SP – 1º Edição – 2001.

[05] Dimensionamento dos condutores na presença de Harmônicas

- Revista Eletricidade Moderna – Guia EM da NBR5410 – São Paulo/SP – Edição 2007.

[06] Degradação de Capacitores de Potência sob a Influência dos Componentes Harmônicos

- Duarte, L. H. S. e Alves, M. F. – Artigo Técnico para a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – 2001.

[07] Máquinas Elétricas e Transformadores

- Kosow, I. L. – 15º Edição – LOCAL – Editora Globo – DATA.

[08] Fator de Potência e Distorção Harmônica

- Pomilio, J. A. – Curso de Extensão da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul/MS – Junho/1997.

[09] Modern Active Filter and Traditional Passive Filter

- Akagi, H. – Bulletin of the Polish Academy of Sciences – vol. 54, n° 3. – 2006.

[10] Power System Harmonics

- Arrilaga, J. and Watson, N.R. and Wiley, S & Sons – 2003.

[11] Correção de Fator de Potência para Instalações de Baixa Potência Empregando Filtros Ativos

- Souza, F. – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina/SC – 2000.

[12] Passive Shunt Harmonic Filter for Low and Medium Voltage

- Kawann, C. and A.E. Emanuel, voltage: a cost comparison study – Power systems, IEEE Transactions on, vol. 11, n° 4, – 1996.

[13] Electrical Power System Quality

- Dugan, R. C. and McGranaghan, M. B. – Second Edition – McGraw-Hill Companies – 2004.

[14] Procedimentos para Determinação de Filtros Harmônicos Sintonizados, Incluindo Análise de Desempenho e Suportabilidade

- Nascimento, R. P. e Resende, J.W. – Universidade Federal de Uberlândia/MG – 2007.

[15] Comparative Evaluation of Various Single Phase Harmonic Filter of Non-linear Load

- Mathan, M. P. and Amuthan, G. – Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM) – International Conference – 2012.

[16]<http://www.danfoss.com/BusinessArea/DrivesSolutions/Software+MCT31/MCT31+Download.htm>

- Acesso realizado em 19/09/2013

[17] Harmonics and Power Systems

- Rosa, F. C D. L. – Taylor & Francis Group LLC – 2006.

[18] Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica.

- Gama, P. H. e Oliveira, A. – Artigo Técnico – 1999.

[19] Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis Cap. 4 Harmônicos

- Filho J. M. – 4º Edição – 1997.

[20] Estimativa do fator K para Transformadores com Cargas Distorcidas

- Barbosa, R. J. S. – Revista Eletricidade Moderna – Editora Aranda - Ano 37 n°422 – 2009.

[21] Power Electronic Converter Harmonic Multipulse Methods for Clean Power.

- Derek, A. P. – Wiley-IEEE Press – New York – 1996.

[22] Redução de harmônicos de Corrente em Retificadores de Múltiplos Pulsos-
Generalização das Conexões diferenciais.

- Gonçalves, V. A. – Ilha Solteira/SP – 2006 – Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual Paulista.

[23] Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.

- Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - Resolução Normativa n° 424/2010 – Vigência Jan/2011.

[24] Manual / Guia de Operação de Soft Stater – Aucom MVS – Ref. 710-08792-00A

ANEXO I – LOW HARMONIC DRIVE (LHD).

VLT HVAC Instruções Operacionais do Drive de Baixas Harmônicas



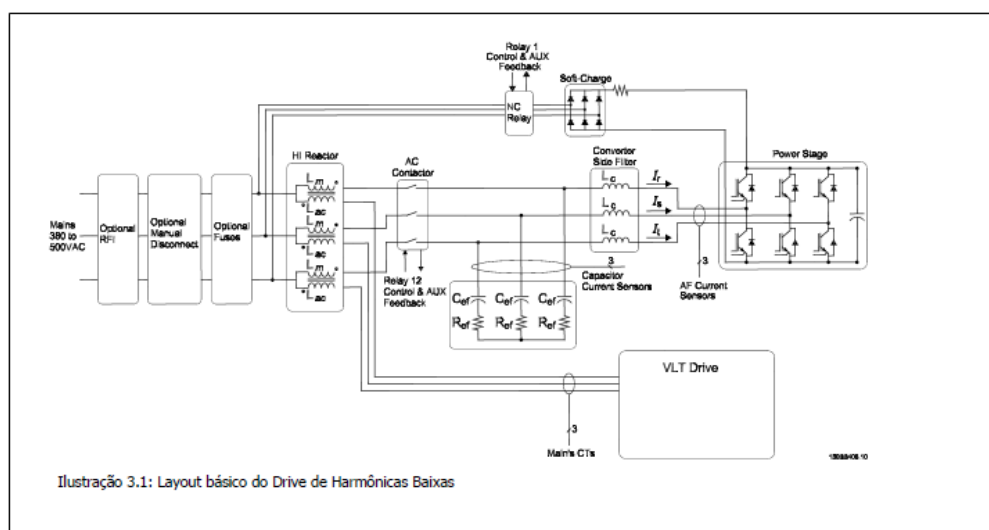
3 Introdução ao Drive de Baixas Harmônicas

3 Introdução ao Drive de Baixas Harmônicas

3.1.1 Princípio de Trabalho

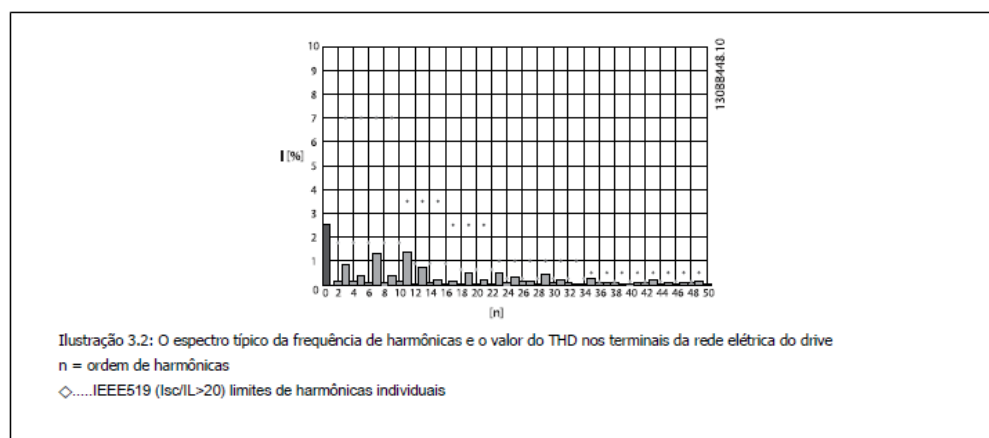
O Drive de Harmônicas Baixas VLT é um conversor de frequência VLT de Alta Potência com um filtro ativo integrado. Um filtro ativo é um dispositivo que monitora ativamente os níveis de distorção de harmônicas e injeta uma corrente de harmônicas compensadoras na linha para cancelar as harmônicas.

3



3.1.2 Conformidade com a IEEE519

Os drives de harmônicas baixas são projetados para traçar uma forma de onda de corrente senoidal ideal da grade de alimentação com fator de potência 1. Onde carga tradicional não-linear traçar correntes em forma de pulso, o drive de harmônicas baixas compensa por meio do caminho do filtro paralelo reduzindo a tensão na grade de alimentação. O Drive de Harmônicas Baixas atende aos padrões de harmônicas mais severos e contém um THD inferior a 5% a uma carga total de <3% de pré-distorção em uma grade trifásica balanceada. A unidade é projetada para atender à recomendação IEEE519 para $I_{sc}/I_L > 20$ nos níveis de harmônicas individuais pares e ímpares. A parte do filtro dos drives de harmônicas baixas contém uma frequência de chaveamento que leva a uma ampla cobertura da frequência fornecendo níveis de harmônicas individuais mais baixos acima do 50º.



3.1.3 Código do Tipo no Formulário para Pedido

É possível projetar um Drive de Harmônicas Baixas VLT conforme as exigências da aplicação, utilizando o sistema de código de compra.

3

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| F | C | - | 0 | P | | | | T | E | | | L | | G | C | X | X | S | X | X | X | X | A | B | C | | | | | D | | | | | | | | |

130BB410.10

| | | |
|------------------------------------|-------|--|
| Grupos de produto | 1-3 | |
| Série de conversores de frequência | 4-6 | |
| Potência nominal | 8-10 | |
| Fases | 11 | |
| Tensão de Rede | 12 | |
| Gabinete Metálico | 13-15 | |
| Tipo de Gabinete Metálico | | |
| Classe do Gabinete Metálico | | |
| Tensão de alimentação de controle | | |
| Configuração do hardware | | |
| Filtro de RFI | 16-17 | |
| Freio | 18 | |
| Display (LCP) | 19 | |
| Revestimento de PCB | 20 | |
| Opcional de rede elétrica | 21 | |
| Adaptação A | 22 | |
| Adaptação B | 23 | |
| Release de software | 24-27 | |
| Idioma do software | 28 | |
| Opcionais A | 29-30 | |
| Opcionais B | 31-32 | |
| Opcionais C0, MCO | 33-34 | |
| Opcionais C1 | 35 | |
| Software do opcional C | 36-37 | |
| Opcionais D | 38-39 | |

Para solicitar um Drive de Harmônicas Baixas VLT, digite a letra "L" na posição 16 da string do código do tipo. Nem todas as seleções/opcionais estão disponíveis para cada variação do conversor de frequência. Para verificar se a versão apropriada está disponível, consulte o Configurador do Drive, na Internet. Para obter mais informações sobre os opcionais disponíveis, consulte o *Guia de Design*.

ANEXO II – FILTRO ATIVO.



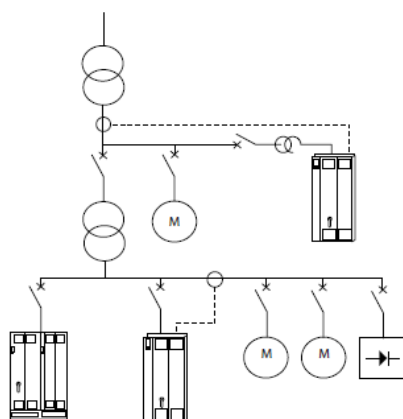
Introdução ao VLT Active Fi...

VLT Active Filter AAF 00x

3 Introdução ao VLT Active Filter AAF00x

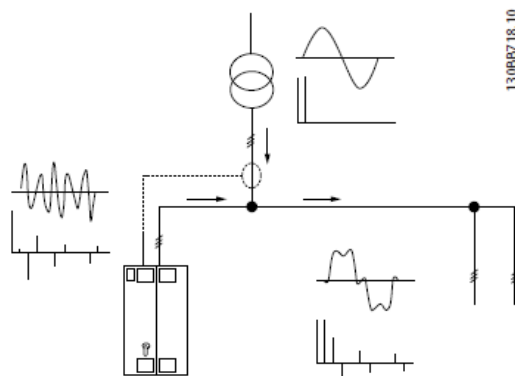
3.1.1 Princípio de Trabalho

VLT® Active Filter AAF00x é um dispositivo para atenuação de correntes harmônicas e compensação de correntes reativas. A unidade foi projetada para instalação em vários sistemas e aplicações como filtro instalado centralmente ou combinada com um VLT conversor de frequência como uma solução empacotada de drive de harmônicas baixas.



130BB717.10

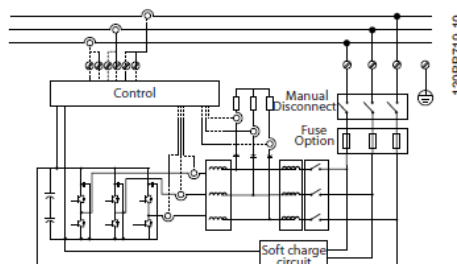
O filtro de derivação elétrica ativo monitora todas as três correntes de linha de fase e processa o sinal de corrente medido por meio de um sistema processador de sinal digital. Em seguida, o filtro compensa impondo sinais ativamente em contrafase nos elementos indesejados da corrente.



130BB718.10

Os sinais de contrafase são gerados configurando diferentes interruptores de IGBT em tempo real alimentando uma tensão CC na grade. A forma de onda da corrente compensada é suavizada por meio de um filtro LCL integrado assegurando que a frequência de chaveamento do IGBT e o componente CC não são impostos à grade. O filtro é capaz de operar com alimentação de transformador ou gerador e é capaz de reduzir motor individual, cargas não lineares ou cargas mistas. Todas as cargas não lineares (cargas de alimentação de diodo) devem manter bobinas CA para proteger essas unidades contra sobrecorrente dos diodos de entrada.

3



130BB719.10

As configurações de fábrica permitem partida rápida, mas programação dedicada é possível através do painel de controle do usuário local LCP permitindo adaptação a aplicações mais exigentes.

O filtro permite módulos de compensação de harmônicas seletivo ou geral. No modo de compensação geral, todas as harmônicas serão reduzidas em direção a zero. Nesse modo de operação o filtro irá também balancear a carga para reduzir a distribuição de carga não uniforme entre as três fases. O desempenho em estado estável permitirá compensar harmônicas de até 40º ordem, mas a injeção de corrente ultrarrápida permitirá também ao filtro compensar tremulação e outro fenômeno rápido e de curto prazo. No modo seletivo o filtro permite ao usuário programar níveis de harmônica individual aceitáveis entre 5º e 25º ordem. O filtro em modo seletivo não reduzirá ordens de harmônicas pares nem triplicações e não suportará balanceamento de carga de fase e redução de tremulação.

Além do modo de compensação de harmônicas, o filtro também permitirá ao usuário programar a prioridade do filtro a partir de corrente criativa ou compensação de harmônicas. Se a compensação de harmônicas for escolhida como a primeira prioridade, o filtro usará a corrente necessária para redução de harmônicas e usará

3

energia para correção de corrente reativa somente se houver energia excessiva disponível. O filtro designará energia entre a primeira e a segunda prioridade de forma automática e contínua para fornecer a maior atenuação possível de compensação tanto reativa quanto de harmônicas. Isso assegura que o fator de potência real seja otimizado continuamente e que seja garantida a mais alta utilização possível de corrente do transformador de alimentação. O filtro LCP dá ao usuário uma estrutura de programação simples de usar e permite múltiplas leituras no LCP. Algumas leituras são calculadas e têm os valores aproximados, por isso não podem ser ponderadas com relação à leitura de um analisador de qualidade de potência devido a conteúdo de ordem de harmônicas e taxas de amostragem diferentes.

Não é possível sobrecarregar o filtro ativo devido ao circuito de autoproteção que reduz automaticamente a corrente compensada para um nível em que o filtro fica em uma condição de temperatura estável. Caso a demanda de mitigação for mais alta do que as características nominais do filtro, o filtro compensará o melhor que puder e deixará não afetadas as correntes reativas ou de harmônicas restantes.

O filtro ativo é equipado como padrão com um filtro de RFI que atende a (segunda) norma de ambiente industrial de EMC IEC55011 Classe A2 categoria igual C3 de IEC61800-3.

3.1.2 Configurador do Filtro

O filtro ativo pode ser projetado de acordo com os requisitos da aplicação utilizando o sistema de código de compra. Para o VLT Active Filter AAF 00x Series é possível encomendar filtros padrão e filtros com opcionais integrados enviando uma string do código do tipo descrevendo o produto para o escritório de vendas Danfoss local, ou seja:

AAF 00XA190T4E21H2xGCXXXSXXXXAxBXCFXXDX

O significado dos caracteres na string pode ser encontrado nas páginas a seguir que contêm os códigos de compra e as configurações de opcionais. No exemplo acima, um filtro ativo 190 A padrão é escolhido em um IP21 gabinete metálico para uma rede de 380-480 V. No configurador baseado na Internet é possível configurar o filtro certo para a aplicação certa e gerar a string do código do tipo. O configurador irá gerar automaticamente um código de vendas com oito dígitos que deverá ser encaminhado ao escritório de vendas local. Além disso, pode-se estabelecer uma lista de projeto, com diversos produtos, e enviá-la ao representante de vendas da Danfoss. O configurador pode ser encontrado no site da Internet global: www.danfoss.com/drives.

Os drives serão entregues automaticamente com um pacote de idiomas relevante para a região de onde o pedido foi gerado. Quatro pacotes regionais de idiomas cobrem os seguintes idiomas:

Pacote de Idiomas 1

Inglês, Alemão, Francês, Dinamarquês, Espanhol, Sueco, Italiano e Finlandês.

Pacote de Idiomas 2

Inglês, Alemão, Chinês, Coreano, Japonês, Tailandês, Chinês Tradicional e Indonésio de Bahasa.

Pacote de Idiomas 3

Inglês, Alemão, Esloveno, Búlgaro, Sérvio, Romeno, Húngaro, Tcheco e Russo.

Pacote de Idiomas 4

Inglês, Alemão, Espanhol, Inglês dos Estados Unidos, Grego, Português do Brasil, Turco e Polonês.

Para fazer pedido de filtros com um pacote de idiomas diferente, entre em contato com o escritório de vendas local.

3.1.3 Formulário de Pedido código do tipo

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 |
| A | A | F | 0 | 0 | x | A | | | | T | 4 | E | | | H | | x | G | C | | x | x | S | x | x | x | x | A | x | B | x | C | x | x | x | x | D | x |

3

| | | Escolha possível |
|--------------------------------------|-------|--|
| Grupos de produto | 1-3 | AAF |
| Série | 4-6 | 005 |
| Características nominais da corrente | 7-10 | A190: 190 Amp A250: 250 Amp |
| Fases | 11 | T: Trifásico |
| Tensão de Rede | 12 | 4: 380-480 V CA |
| gabinete metálico | 13-15 | E21: IP21/Nema Tipo1 ESH: IP54 híbrido |
| Filtro de RFI | 16-17 | H2: Filtro de RFI, Classe A2 (padrão) H4: Filtro de RFI, Classe A1 (opcional) |
| Display (LCP) | 19 | G: Painel de Controlo Local Gráfico (LCP) |
| Revestimento de PCB | 20 | C: Com revestimento de PCB |
| Opcional de rede elétrica | 21 | X: Sem opcional de rede elétrica 3: Desligamento da rede elétrica e fusível 7: Fusível |
| Adaptação A | 22 | Reservado |
| Adaptação B | 23 | Reservado |
| Release de software | 24-27 | Reservado |
| Idioma do software | 28 | Reservado |
| Opcionais A | 29-30 | AX: Sem opcional A |
| Opcionais B | 31-32 | BX: Sem opcional B |
| Configuração do opcional C | 33-37 | CFxxx: Opcional CO ocupado com cartão de controle do filtro ativo |
| Opcionais D | 38-39 | DX: Sem opcionais |

| | | Escolha possível |
|--------------------------------------|-------|---|
| Grupos de produto | 1-3 | AAF |
| Série | 4-6 | 006 |
| Características nominais da corrente | 7-10 | A190: 190 Amp A250: 250 Amp A310: 310 Amp A400: 400 Amp |
| Fases | 11 | T: Trifásico |
| Tensão de Rede | 12 | 4: 380-480 V CA |
| gabinete metálico | 13-15 | E21: IP21/Nema Tipo1 E54: IP54/Nema Tipo 12 E2M: IP21/Nema Tipo 1 com proteção de rede elétrica E5M: IP54/Nema Tipo 12 com proteção de rede elétrica |
| Filtro de RFI | 16-17 | H2: Filtro de RFI, Classe A2 (padrão) H4: Filtro de RFI, Classe A1 (opcional) |
| Display (LCP) | 19 | G: Painel de Controlo Local Gráfico (LCP) |
| Revestimento de PCB | 20 | C: Com revestimento de PCB |
| Opcional de rede elétrica | 21 | X: Sem opcional de rede elétrica 3: Desligamento da rede elétrica e fusível 7: Fusível |
| Adaptação A | 22 | Reservado |
| Adaptação B | 23 | Reservado |
| Release de software | 24-27 | Reservado |
| Idioma do software | 28 | Reservado |
| Opcionais A | 29-30 | AQ: MCA-122 Modbus TCP AX: Sem opcional A |
| Opcionais B | 31-32 | BX: Sem opcional B |
| Configuração do opcional C | 33-37 | CFxxx: Opcional CO ocupado com cartão de controle do filtro ativo |
| Opcionais D | 38-39 | DO: 24 V de reserva DX: Sem opcionais |

4 Como Instalar

4

4.1 Como Iniciar

Este capítulo abrange instalações mecânicas e as instalações elétricas de entrada e saída dos terminais de energia e terminais do cartão de controle.

4.1.1 Como Iniciar

O filtro ativo foi desenvolvido para permitir instalação rápida e correta de EMC, seguindo as etapas descritas a seguir.

⚠️ ADVERTÊNCIA

Leia as instruções de segurança, antes de começar a instalação da unidade.
Deixar de cumprir essas recomendações poderá resultar em morte ou ferimentos graves.

Instalação Mecânica

- Montagem mecânica

Instalação Elétrica

- Conexão à Rede Elétrica e Ponto de Aterramento de Proteção
- Cabos e conexão do TC
- Fusíveis e disjuntores
- Terminais de controle - cabos

Setup Rápido

- Painel de Controle Local do filtro
- Programação

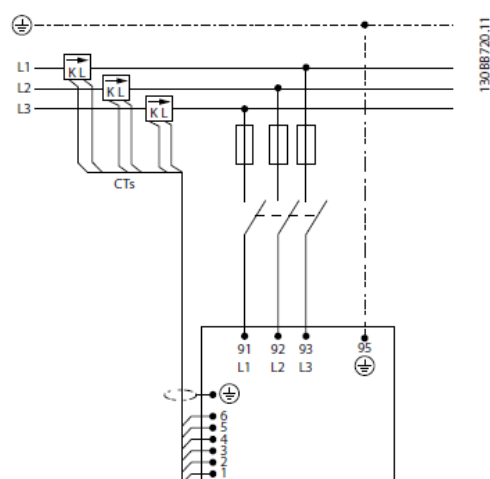


Ilustração 4.1 Diagrama que mostra a instalação básica, incluindo rede elétrica e TCs.

4.2 Pré-instalação

4.2.1 Planejamento do Local da Instalação

OBSERVAÇÃO!

Antes de executar a instalação é importante planejar a instalação do filtro. Negligenciar esse planejamento poderá resultar em trabalho adicional durante e após a instalação.

Selecione o melhor local operacional possível levando em consideração o seguinte (consulte os detalhes nas páginas a seguir):

- Condições de temperatura ambiente
- Altitude no ponto de instalação
- Método de instalação e compensação
- Como refrigerar a unidade
- Posição do filtro ativo
- Ponto de instalação de TC e possibilidade de reutilizar TCs existentes
- Disposição dos cabos e condições de EMI
- Certifique-se de que a fonte de alimentação fornece a tensão e a frequência corretas
- Se a unidade não tiver fusíveis integrados, certifique-se de que os fusíveis externos estão dimensionados corretamente.

8 Especificações Gerais

8.1 Dados Elétricos

8.1.1 Valor Nominal da Potência

Condições de grade:

Tensão de alimentação

380-480V

Tensão de rede elétrica baixa / queda da rede elétrica:

Durante baixa tensão de rede ou queda da rede elétrica, o filtro continua até a tensão de circuito intermediário cair abaixo do nível de parada mínimo, que corresponde tipicamente a 15% abaixo da tensão de alimentação nominal mais baixa do filtro. Não se pode esperar compensação completa na tensão de rede menor que 10% abaixo da tensão de alimentação nominal mais baixa do filtro. Se a tensão de rede exceder a tensão nominal mais alta do filtro, o filtro continua a trabalhar, mas o desempenho de atenuação de harmônicas é reduzido. O filtro não desativará até as tensões de rede excederem 580 V.

Frequência de alimentação

50/60Hz ±5%

Desbalanceamento temporário máximo entre as fases

3,0% da tensão de alimentação nominal

de rede elétrica em que o desempenho de atenuação é mantido alto.

O filtro atenuará em desbalanceamento de rede mais alto, mas o desempenho de atenuação de harmônicas é reduzido. 10% com desempenho de atenuação mantido

Pré-distorção de THDv Máx.

Desempenho reduzido em níveis de pré-distorção mais altos

Desempenho de Atenuação de Harmônicas:

Melhor desempenho <4%

THID

Dependendo da relação filtro x distorção.

Capacidade de atenuação de harmônica individual:

% de características nominais de corrente do filtro

5ª

70%

7ª

50%

11ª

32%

13ª

28%

17ª

20%

19ª

18%

23ª

16%

25ª

14%

Corrente de harmônicas total

90%

Compensação de Corrente Reativa:

Cos phi

Retardo de 1,0 para 0,5 controlável

Corrente reativa, % das características nominais de corrente do filtro

100%

Comprimentos de cabo e seções transversais:

Comprimento máximo do cabo de grade

Ilimitado (determinado pela queda de tensão)

Seção transversal máxima para terminais de controle, fio rígido

1,5mm²/16 AWG (2 x 0,75 mm²)

Seção transversal máxima para terminais de controle, fio flexível

1mm²/18 AWG

Seção transversal máxima para terminais de controle, cabo com núcleo embutido

0,5 mm²/20 AWG

Seção transversal mínima para terminais de controle

0,25 mm²

Especificação de terminais do TC:

Número de TCs necessários

3 (um para cada fase)

O ônus do AAF é igual a

2 mΩ

Características nominais da corrente secundárias

1 A ou 5 A (setup de hardware)

Precisão

Classe 0,5 ou melhor