

**QUALIDADE DE ENERGIA – COMPARAÇÃO DAS NORMAS IEC 61000-3-2 E
IEEE 519**

Felipe Menezes Ferreira dos Santos

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr.Ing.
(Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Gilson Ferreira dos Santos Junior, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
OUTUBRO DE 2007

RESUMO

O desenvolvimento tecnológico permitiu aos fabricantes de dispositivos elétrico-eletrônicos obterem uma redução de tamanho, custo e peso, assim como um menor consumo de potência por estes dispositivos. Porém, acompanhado a essa série de vantagens, os problemas relacionados à qualidade de energia aumentaram nos últimos anos devido ao número cada vez maior de cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico. Essas cargas muitas vezes funcionam no modo descontínuo de operação e assim provocam distúrbios na rede que atingem outros equipamentos sensíveis a estas perturbações. Além disso, com o crescente interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, tem aumentado o uso de equipamentos que, em muitos casos, aumentam os níveis de distorção harmônica e podem levar o sistema a condições de ressonância. O resultado disso pode ser prejudicial para algumas indústrias (como por exemplo, as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica), e por isso, há um esforço em se estabelecer limites de introdução de distúrbios na rede de distribuição de energia elétrica.

Normas como a IEC 61000-3-2 e a IEEE 519 tratam especificamente de distúrbios harmônicos e têm o objetivo de limitar a ocorrência dessa perturbação na rede elétrica.

Esse trabalho tem o objetivo de apresentar os diversos distúrbios relacionados à qualidade de energia final percebida pelos consumidores, além de apresentar as normas IEC 61000-3-2 e a IEEE 519, mostrando como elas limitam a introdução de harmônicas.

ÍNDICE

RESUMO	i
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABELAS	vi
I. Introdução	1
I.1. Contexto atual	1
I.2. Motivação	2
II. Qualidade de energia	3
II.1. Introdução	3
II.2. Tipos de perturbações elétricas	5
II.2.1. Perturbações na amplitude de tensão	5
II.2.2. Perturbações na frequência do sinal	7
II.2.3. Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos	7
II.2.4. As perturbações nas formas de ondas	8
II.3. Os custos da má qualidade de energia	8
II.3.1. Distorção Harmônica	8
II.3.2. Interrupções	9
II.3.3. Afundamentos e surtos de curta duração	9
II.3.4. Transitórios	11
III. Harmônicas	12
III.1. Introdução	12
III.2. Espectro Harmônico	14
III.3. Taxa de Distorção Harmônica Total (THD)	15
III.4. Fator de Potência e $\cos\phi$	18
III.5. Fator de redução da capacidade nominal	19
III.6. Fator de Crista	19
III.7 Cargas que produzem Harmônicas	20
III.8. Causas e Efeitos	21
III.8.1 Causas	22
III.8.1.1. Cargas monofásicas:	22
III.8.1.1.1. Fontes chaveadas	22
III.8.1.1.2. Lâmpadas Fluorescentes	23
III.8.1.2. Cargas trifásicas:	24
III.8.2. Efeitos	26
III.8.2.1. Problemas causados por correntes harmônicas	26
III.8.2.1.1. Aquecimento do condutor neutro	26
III.8.2.1.2. Efeito nos transformadores	27
III.8.2.1.3. Disparo de dispositivos de proteção	28
III.8.2.1.4. Sobre estresse de capacitores de correção de fator de potência (PFC)	28
III.8.2.1.5. Efeito Pelicular	29
III.8.2.2. Problemas causados por tensões harmônicas	29
III.8.2.2.1. Distorções na tensão	30
III.8.2.2.2. Perdas nos motores de indução	31
III.8.2.2.3. Ruídos em detectores de zero	32

III.9. Medidas para mitigação de harmônicas	32
III.9.1. Filtros Passivos	32
III.9.2. Transformadores de separação e redução de harmônicas	35
III.9.3. Filtros Ativos	38
IV. Comparação das normas IEEE 519 e IEC 61000-3-2	41
IV.1. IEC	41
IV.2. IEEE	42
IV.3. IEC 61000-3-2 (2005)	43
IV.4. IEEE 519 (1992)	46
V. Conclusões	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Perturbações de Tensão - % da tensão nominal X tempo _____	7
Figura 2 – Curva ITIC - % da tensão nominal X tempo _____	10
Figura 3 – Onda deformada e suas componentes harmônicas _____	10
Figura 4 – Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal _____	14
Figura 5 – Forma de onda e espectro de um sinal distorcido _____	15
Figura 6 – Forma de onda de corrente e seu espectro harmônico _____	10
Figura 7 – Forma de onda de corrente e seus espectros harmônicos _____	10
Figura 8 – Forma de onda com diferença entre fator de potência e $\cos\phi$ _____	18
Figura 9 – Exemplo de fator de crista _____	20
Figura 10 – Forma de onda no circuito com dispositivo não linear _____	21
Figura 11 – Espectro Harmônico de um computador com fonte chaveada _____	23
Figura 12 – Espectro Harmônico de uma lâmpada fluorescente compacta _____	25
Figura 13 – Ponte trifásica ou de seis pulsos _____	24
Figura 14 – Espectro Harmônico de uma típica ponte de seis pulsos _____	25
Figura 15 – Ponte de doze pulsos _____	26
Figura 16 – Correntes harmônicas de ordem 3N somadas ao neutro _____	25
Figura 17 – Circuito equivalente de uma carga não linear com capacitor _____	29
Figura 18 – Distorções de tensão causadas por cargas não lineares _____	10
Figura 19 – Separação de cargas lineares e não lineares _____	310
Figura 20 – Filtro Passivo de Harmônicas em paralelo com a carga _____	33
Figura 21 – Filtro Passivo em paralelo e série com a carga _____	33
Figura 22 – Emprego de filtro de harmônicas não compensado para atenuação de uma harmônica específica _____	34
Figura 23 – Emprego de filtro de harmônicas compensado para atenuação de uma harmônica específica _____	35
Figura 24 – Ligação delta estrela _____	36
Figura 25 – Transformador para confinamento de harmônicas de ordem 3N _____	37
Figura 26 – Transformador para confinamento de harmônicas de 5ª e 7ª ordem _____	37
Figura 27 – Filtro ou condicionador ativo _____	38
Figura 28 – Ligação em paralelo do Filtro Ativo _____	39
Figura 29 – Exemplo de atuação de filtro ativo _____	40
Figura 30 – Exemplo de sistema de distribuição _____	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Indústria X Perdas financeiras por evento _____	10
Tabela 2 – Valores para os sinais 1, 5 e T da Figura III.1 _____	13
Tabela 3 – Ordem, frequência e seqüência das harmônicas para equipamentos de eletrônica de potência _____	13
Tabela 4 – Exemplo de correntes harmônicas em um dado sinal _____	16
Tabela 5 – Limites para equipamentos Classe A _____	44
Tabela 6 – Limites para equipamentos Classe C _____	45
Tabela 7 – Limites para equipamentos Classe D _____	45
Tabela 8 – Máximo Limite para Harmônicas Ímpares em Sistema de Distribuição de 120V até 69kV _____	46
Tabela 9 – Máximo Limite para Harmônicas Ímpares em Sistema de Distribuição de 69,001kV até 161kV _____	47
Tabela 10 – Máximo Limite para Harmônicas Ímpares em Sistema de Distribuição de alta tensão (maior do que 161kV) e Sistemas de Geração e Cogeração isolados _____	47
Tabela 11 – Limites Percentuais de Distorção da Tensão de Alimentação em Relação à Fundamental _____	47

CAPÍTULO I

I. Introdução

I.1. Contexto atual

Atualmente os dispositivos de eletrônica de potência (fontes chaveadas, diodos, transistores, tiristores, etc.) são utilizados com maior frequência pelos consumidores de energia elétrica. Para o sistema elétrico, esses equipamentos são vistos como cargas não lineares, devido à sua natureza, e em face de sua vasta utilização, são fontes de perda de qualidade de energia na rede.

Alguns exemplos dessas perdas de qualidade de energia são:

- Perturbações na amplitude de tensão
- Perturbações na frequência do sinal
- Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos
- Perturbações na forma de onda

Essa má qualidade de energia pode causar a perda da produção de uma indústria, a interrupção de energia em um grupo de residências, danos ou mau funcionamento de equipamentos, etc.

Com isso, é necessário que seja definida a responsabilidade pelos investimentos necessários para o correto funcionamento da rede de suprimento

Hoje existem normas internacionais como a IEC 61000-3-2 e a IEEE 519 que procuram definir limites para utilização desses equipamentos de forma a não prejudicar, tanto o funcionamento da instalação, quanto da rede que a cerca.

O objetivo desse trabalho é mostrar como a falta de qualidade de energia pode prejudicar os consumidores e comparar as normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519. Para isso, será necessário apresentar o que é qualidade de energia, como ela influencia no suprimento de energia elétrica dos diversos consumidores e os custos que a falta dessa qualidade gera para os consumidores. Após isso, será dada atenção especial para as perturbações na forma de onda e a análise será direcionada ao comportamento das harmônicas. Será apresentada uma descrição desse fenômeno, os seus principais

indicadores, como aparecem na rede de suprimento, como podem afetar os equipamentos elétricos e as medidas mitigadoras necessárias para um melhor convívio com essa perturbação. Feita essa análise, finalmente será abordado o tema desse trabalho, com a descrição das organizações internacionais IEC e IEEE, as normas objeto desse trabalho, as boas práticas recomendadas e onde elas são aplicadas.

I.2. Motivação

Os problemas gerados pelas perturbações elétricas ainda são pouco conhecidos pela maioria das pessoas. Com o aumento do número de equipamentos com dispositivos de eletrônica de potência como fontes chaveadas nas instalações elétricas, é muito importante que seja dada a devida atenção à qualidade de energia na instalação, para evitar danos ou mau funcionamento de equipamentos. Porém, este esforço deve ser feito tanto pelos consumidores quanto pelas concessionárias de energia elétrica, no sentido de evitar que problemas na qualidade de energia gerados em uma instalação sejam propagados pela rede e atinja os demais consumidores. Uma análise criteriosa de cada caso é necessária para garantir a eficácia das soluções.

Diante de uma regulamentação nacional ainda fraca no assunto, o estudo de normas internacionais como a IEC 61000-3-2 e IEEE 519 pode reduzir problemas como interrupção, danos a equipamentos e prejuízos para indústrias.

CAPÍTULO II

II. Qualidade de energia

II.1. Introdução

A energia elétrica pode ser considerada uma *commodity* com características bem peculiares. Ela é usada como um fluxo contínuo, não pode ser armazenada em grandes quantidades e não é possível fazer uma verificação na qualidade antes do uso. Assim, podemos dizer que a energia elétrica é um exemplo de aplicação da filosofia *Just in Time* onde o produto é entregue na linha de produção no ponto e também no momento em que é utilizado. Para que isso seja satisfatório, é necessário um efetivo controle da especificação do produto, uma alta confiabilidade de que o produto vai ser entregue pelo fornecedor no tempo e dentro das especificações e o conhecimento de todo o comportamento do produto com seus componentes dentro dos limites.

Apesar disso, o fato da energia elétrica ser gerada a quilômetros de distância do ponto de uso, e por isso, precisar atravessar longas linhas de transmissão, passar por inúmeros transformadores e também por equipamentos de propriedade dos clientes faz com que assegurar a qualidade da energia entregue aos consumidores não seja uma tarefa fácil. Além disso, não é possível que a energia fora do padrão seja retirada da cadeia de suprimento ou rejeitada pelo cliente.

A percepção de qualidade de energia do fornecedor pode ser muito diferente da percepção do cliente. O problema de fornecimento de energia mais conhecido é a interrupção, que pode durar de poucos segundos até horas. Longas interrupções afetam a todos os consumidores, porém interrupções de curta duração podem representar grandes perdas para alguns consumidores.

Alguns exemplos de operações sensíveis são:

- operações de processos contínuos, onde pequenas interrupções podem interromper o sincronismo das máquinas e resultar em grandes volumes de produtos semi-processados. Um exemplo típico é o da indústria de fabricação de papel, onde recomeçar o processo é longo e caro.

- operações de múltiplos-estágios, onde a interrupção durante um processo pode comprometer os processos anteriores. Um exemplo disso é a indústria de semicondutores, que durante a produção de *wafers* requer diversos processos durante vários dias e a falha de um processo compromete toda a produção.
- processamento de dados, onde o valor das transações é alto mas o custo do processo é baixo, como em transações financeiras. A incapacidade de uma transação ser realizada pode resultar em grandes perdas que superam em muito o custo do processo.

Com isso, é possível perceber a importância de um suprimento de energia de alta qualidade. Um suprimento que esteja sempre disponível, sempre dentro das tolerâncias de tensão e frequência e com uma onda puramente senoidal sem distorções. Mas quanto de desvio desse sistema pode ser tolerado depende da aplicação do usuário, do tipo de equipamento instalado e da percepção do cliente dos seus requisitos. Os defeitos na qualidade de energia (desvios da perfeição) podem ser segmentados em cinco categorias:

- Interrupções (*Blackouts*)
- Sub ou Sobretensão de longa duração
- Afundamentos de tensão e Surtos de curta duração
- Transitório
- Distorções Harmônicas

Cada um desses problemas de qualidade de energia possui diferentes causas. Alguns problemas que ocorrem na rede como defeitos, podem provocar problemas em muitos consumidores, assim como um problema em um cliente pode causar transitório que vão afetar todos os outros clientes do mesmo subsistema. Isto gera uma discussão sobre de quem é a responsabilidade por garantir a qualidade da energia.

As empresas fornecedoras de energia argumentam que os usuários críticos devem assumir o custo para assegurar a qualidade do suprimento deles mesmos ao invés de esperarem que a indústria de suprimento de energia forneça uma alta confiabilidade

no fornecimento para todos os clientes em toda a rede. Essa garantia de qualidade no fornecimento requer um investimento substancial em ativos adicionais para a rede, para o benefício de relativamente poucos clientes (em números, não em termos de consumo) e assim, seria inviável economicamente. Por outro lado, os clientes se defendem dizendo que a responsabilidade na qualidade da energia não pode ser atribuída a eles por que com isso a indústria de fornecimento de energia não faria mais investimentos para aumentar a confiabilidade do sistema.

II.2. Tipos de perturbações elétricas

II.2.1. Perturbações na amplitude de tensão

Este tipo de perturbação ocorre quando, sobre um sinal perfeitamente senoidal, são produzidas variações de tensão como, por exemplo: afundamento (*sag*), interrupção, sobretensão, sobretensão transitória, flutuação, cintilação (*flicker*) e subtensão.

O afundamento (*sag*) se caracteriza por uma diminuição brusca de tensão, seguida por um restabelecimento após um curto intervalo de tempo. Geralmente um *sag* ocorre num intervalo de 10ms até 1 minuto.

Já a interrupção ocorre quando a tensão é inferior a determinado limite, geralmente de 1% da tensão de serviço no local (fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Procobre, 2001).

Geralmente a causa principal para afundamento e interrupção é o aumento brusco da corrente (fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Procobre, 2001), seja por curto-circuito, partidas ou comutações de cargas com elevada potência. As quedas de tensão provocadas por essas correntes elevadas desaparecem com a atuação da proteção ou quando as cargas que partiram atingem seu regime permanente.

A sobretensão é uma tensão com valor eficaz superior a tensão de serviço do local (geralmente 10%) e pode ser de curta e longa duração (fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Procobre, 2001). As de curta duração, em geral, são de maior amplitude do que as de longa duração.

A sobretensão transitória é de curta duração e, normalmente, apresenta um forte amortecimento em sua forma de onda.

As causas das sobretensões são: entrada em serviço de grupo de geradores, conexões e desconexões de certos elementos da instalação, comutações em bancos de capacitores, operação de retificadores controlados, variadores de velocidade, lâmpadas de descarga, atuação de dispositivos de proteção, descargas atmosféricas, etc. A principal consequência desta sobretensão é o comprometimento da vida útil de equipamentos como motores e transformadores, perda de dados ou programas de equipamentos de eletrônica de potência.

A flutuação de tensão tem origem em cargas que apresentam variações na amplitude do sinal, periódicas ou aleatórias. Normalmente essas flutuações situam-se na faixa de mais ou menos 10% do valor nominal. A variação da luminosidade das lâmpadas é o efeito mais visível da flutuação.

A cintilação (*flicker*) pode ser notada pela sensação visual de que a luminosidade está variando no tempo.

A origem das flutuações e cintilações são as cargas que apresentam variações rápidas no seu funcionamento e com isso produzem quedas de tensão na rede ao longo do tempo. Entre os equipamentos que mais provocam esses tipos de perturbação estão as máquinas de soldar por resistência, os motores durante a partida, a conexão e desconexão de grandes cargas, as partidas de lâmpadas de descarga, os aparelhos eletrodomésticos com regulação automática (de tempo, temperatura, etc.) e outros.

Quando a flutuação ocorre com uma subtensão, os transformadores e máquinas girantes sofrem aquecimentos anormais devido ao aumento da corrente provocado pelas cargas de potência ou torque constantes. A Figura 1 apresenta um diagrama dos principais tipos de perturbação na amplitude de tensão.

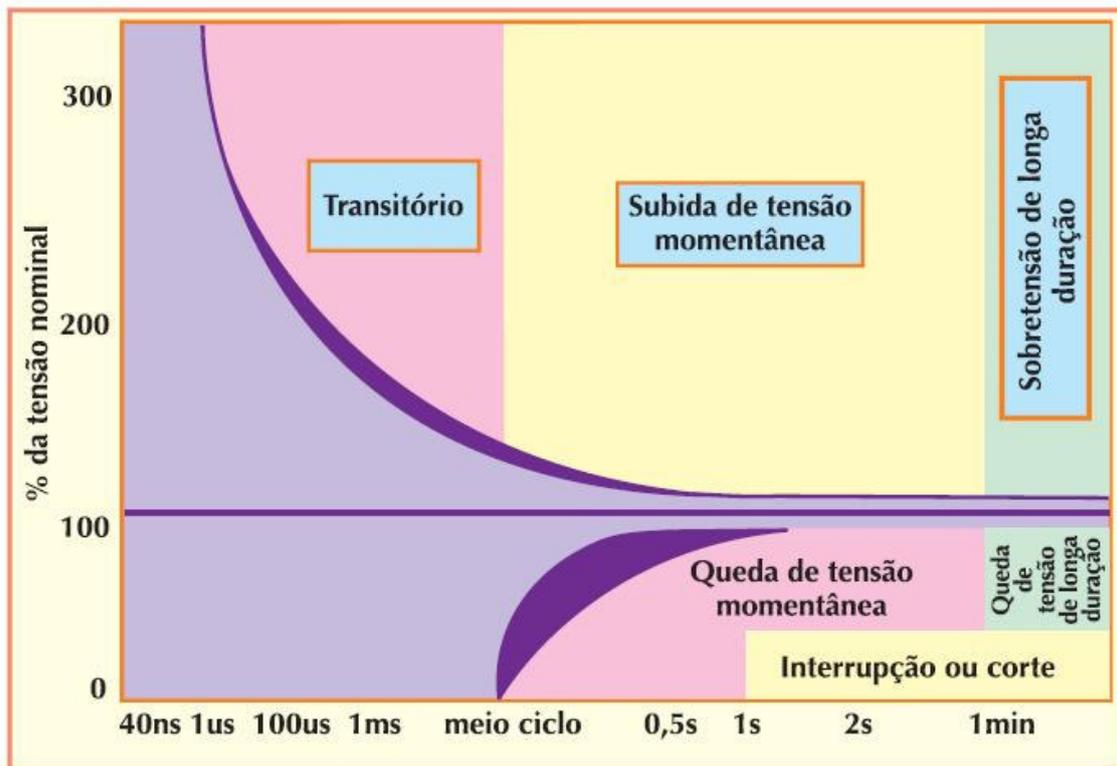


Figura 1 – Perturbações de Tensão - % da tensão nominal X tempo

II.2.2. Perturbações na frequência do sinal

Apesar de serem incomuns em instalações elétricas em geral, as perturbações de frequência são variações em torno do valor nominal e são causadas, geralmente, nos sistemas de geração e transmissão. Também ocorrem em sistemas que possuam grupo de geradores e sistemas de cogeração.

II.2.3. Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos

Os desequilíbrios de tensão são produzidos nos sistemas trifásicos quando existem diferenças significativas entre os valores eficazes das tensões presentes na instalação. Já os desequilíbrios de corrente ocorrem quando correntes de fases não são iguais e assim, existe corrente diferente de zero no condutor neutro. A consequência dessa circulação de corrente é um sobreaquecimento geral nos componentes da instalação. Os desequilíbrios máximos admitidos são 10% para correntes e entre 2% e 3% para tensões (fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Procobre, 2001).

II.2.4. As perturbações nas formas de ondas

Com o aumento do uso de equipamentos de eletrônica de potência como diodos, tiristores, transistores, triacs, diacs, etc. a partir da década de noventa, as perturbações harmônicas ganharam muita importância. Isto porque estes equipamentos provocam deterioração da qualidade de energia e deformação nas formas de onda presente nas instalações elétricas, o que resulta nas chamadas tensões e correntes harmônicas. Este tipo de deformação será melhor apresentado no capítulo 3.

II.3. Os custos da má qualidade de energia

Os custos decorrentes de uma má qualidade de energia podem ser muito elevados em relação aos custos necessários para garantir uma boa qualidade de energia, porém estes custos não são proporcionais à quantidade de energia consumida e sim às características do negócio e os desvios aceitáveis por esses consumidores. A definição sobre quem é o responsável por assegurar a qualidade de energia e para isso garantir os investimentos necessários é muito complexa e polêmica, visto que determinada qualidade de energia pode ser suficiente para um grande número de clientes e insuficiente para poucos.

Podemos analisar os impactos da má qualidade de energia de acordo com os defeitos abaixo:

II.3.1. Distorção Harmônica

As distorções harmônicas são causadas pelas cargas não-lineares no sistema de energia elétrica e geram correntes no sistema com magnitude maior do que esperada com componentes de frequências harmônicas. Essas correntes não podem ser medidas com os instrumentos convencionais, por isso pode-se subestimar a sua amplitude em até 40%. Com isso, os condutores podem ser mal dimensionados, ficarem superaquecidos e causar perdas de energia de aproximadamente 2% a 3% da carga.

Outro problema relativo à distorção harmônica é que as componentes de frequência harmônica causam aumento das perdas por correntes parasitas nos transformadores, sendo que essas perdas são proporcionais ao quadrado da frequência.

Com o aumento das perdas, a temperatura também aumenta e com isso a vida útil do equipamento é reduzida consideravelmente.

Assim, os principais efeitos econômicos relacionados às distorções harmônicas são a diminuição na vida útil dos equipamentos, a redução da eficiência energética e a susceptibilidade a variações constantes na amplitude de tensão.

II.3.2. Interrupções

As interrupções são os problemas de qualidade de energia mais comuns com durações de alguns segundos até dias ou meses (em casos extremos). Estas interrupções não podem ser apenas atribuídas às concessionárias de energia. Na realidade são vários os fatores que podem causar as interrupções.

As proteções contra as falhas no suprimento de energia requerem dois tipos de ações: o projeto deve ser elaborado de modo a evitar pontos com grandes riscos de falhas e deve ser verificada a necessidade de *backup* de suprimento de energia no sistema. Estas técnicas não são complexas nem caras, além de que podem gerar benefícios consideráveis.

II.3.3. Afundamentos e surtos de curta duração

Afundamentos são diminuições na amplitude de onda da voltagem RMS em um tempo que pode durar de uma fração de segundo a muitos segundos. Os Surtos são descritos em termos da duração e da voltagem retida (percentual da voltagem remanescente). A Curva ITIC (*Information Technology Industry Council*) mostrada na figura 2, descreve a tolerância dos equipamentos aos diversos tipos de distúrbios na tensão que podem ser tolerados sem um mau funcionamento no tempo.

Esta curva foi originalmente produzida para ajudar os usuários de computadores a resolver problemas de qualidade de energia com as distribuidoras. Ao se padronizar os requerimentos do equipamento, ficou muito mais simples determinar quando a energia está sendo suprida de forma adequada através de medições no local.

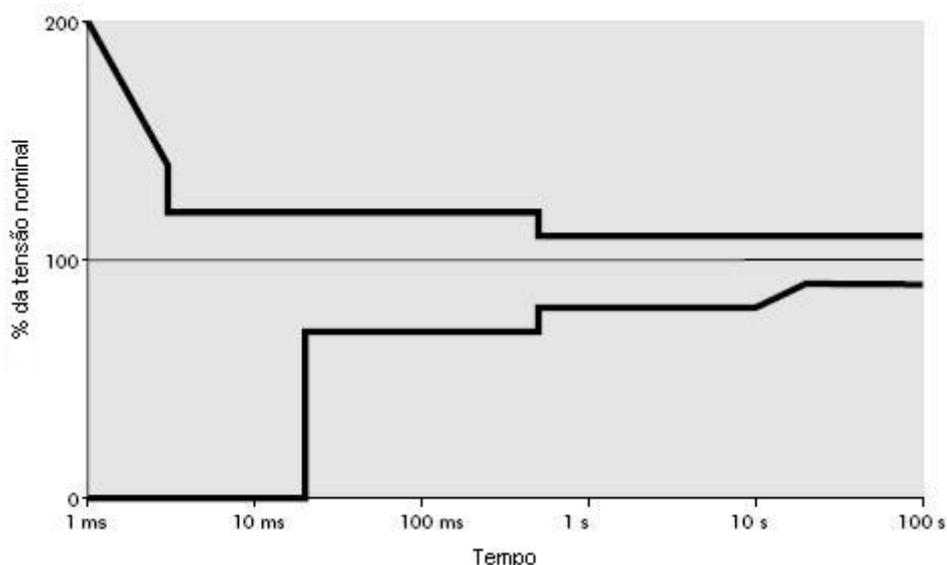


Figura 2 – Curva ITIC - % da tensão nominal X tempo

Muitos afundamentos são causados por defeitos na rede de suprimento de energia sendo que o grau de severidade do surto depende da posição relativa do gerador e do defeito. A tabela 1 mostra algumas perdas típicas, em euro, resultantes de distúrbios na rede. Note que indústrias que realizam processos de múltiplos estágios e transações financeiras são as áreas que possuem as maiores perdas por evento.

Tabela 1 – Indústria X Perdas financeiras por evento

Indústria	Perda Financeira por evento
Produção de Semicondutor	€ 3.800.000
Transações Financeiras	€ 6.000.000 por hora
Centros de Computadores	€ 750.000
Telecomunicações	€ 30.000 por minuto
Trabalhos com Aço	€ 350.000
Indústria do Vidro	€ 250.000

Fonte: Chapman, David. **Power Quality and Application Guide**. Cooper Development Association, 2001

Existem ainda custos volumosos decorrentes de eventos com durações menores do que um segundo. É o caso da indústria de papel, em que o efeito de um afundamento pode ser igual a uma interrupção total, com os mesmos custos para recomeçar o processo, perdas de matéria prima e produção. Outro exemplo é o da indústria de semicondutores que tem uma duração demorada do processo de fabricação dos *wafers* e qualquer distúrbio pode acarretar na perda de todas as etapas.

II.3.4. Transitórios

Transitórios são distúrbios de corrente ou voltagem de curta duração (até alguns milissegundos), porém de alta intensidade. A maioria desses distúrbios é proveniente de descargas atmosféricas ou manobras de linhas ou cargas reativas. Devido às altas frequências envolvidas, este fenômeno é atenuado consideravelmente durante a sua propagação na rede. Assim transitórios que ocorrem perto do ponto de interesse são muito maiores do que aqueles que ocorrem mais distantes. Dispositivos de proteção na rede geralmente asseguram que os transitórios se mantenham em níveis seguros de operação e quando ocorrem problemas, normalmente são devido a transitórios originados perto ou até dentro das instalações.

Os danos causados por transitórios podem ser instantâneos como um desligamento de uma usina de energia elétrica ou uma corrupção de dados em computadores e cabeamentos de redes, ou então podem ser progressivos com uma série de eventos gerando pequenos danos até a ocorrência de uma falha maior. Nestes casos, o custo de reposição de equipamentos assim como o tempo de interrupção deve ser considerado.

As principais premissas que devem ser seguidas são que a instalação do sistema de aterramento deve possuir baixa impedância dentro de uma larga faixa de frequências, com uma conexão também de baixa impedância para o eletrodo de aterramento. O sistema de proteção para descargas atmosféricas deve ser projetado de modo a levar em consideração fatores locais como, por exemplo, o nível cerâmico. Os dispositivos de proteção para transitórios devem estar presentes nas entradas de todos os condutores, incluindo linhas telefônicas e outras de comunicação.

CAPITULO III

III. Harmônicas

III.1. Introdução

As tensões e correntes harmônicas, como visto anteriormente, são perturbações nas formas de onda. Elas são provocadas principalmente pelo uso de equipamentos de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais.

As harmônicas são um fenômeno contínuo e não devem ser confundidas com outros fenômenos de curta duração como transitórios, picos de sobretensão e subtensão. Estas perturbações no sistema podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha (supressores de transitórios). Entretanto, estes filtros de linha não reduzem ou eliminam correntes e tensões harmônicas.

As tensões e correntes harmônicas podem ser definidas como um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação. A Figura 3 mostra uma onda deformada devido à presença de uma harmônica de corrente. Note que a onda T é a soma ponto a ponto das ondas 1 e 5 que correspondem à onda de frequência fundamental e à onda de quinto harmônico respectivamente.

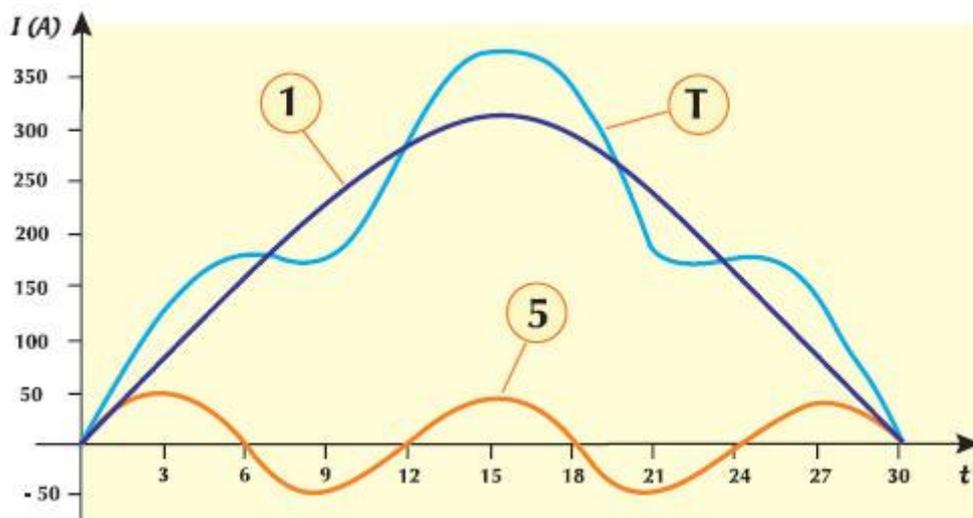


Figura 3 – Onda deformada e suas componentes harmônicas

Também é possível visualizar este efeito na Tabela 2 através da soma dos valores de corrente das ondas 1 e 5 durante o mesmo intervalo de tempo

Tabela 2 – Valores para os sinais 1, 5 e T da Figura III.1

tempo	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) Sinal 1 + Sinal 5
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

Fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções.** Procobre, 2001

As harmônicas podem ser classificadas quanto à sua ordem, frequência e seqüência, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Ordem, frequência e seqüência das harmônicas para equipamentos de eletrônica de potência

Ordem	Frequência (Hz)	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n * 60	(+,-,0)

Fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções.** Procobre, 2001

Pode-se observar da Tabela 3, que a ordem corresponde ao múltiplo da frequência fundamental e a seqüência pode ser positiva, negativa ou nula. Além disso, as harmônicas podem ser classificadas como ímpares ou pares, onde as ímpares são de origem de corrente alternada e as pares de corrente contínua. Geralmente as harmônicas ímpares são encontradas nas instalações elétricas e as pares nos casos em que há assimetrias devido à presença de componente contínua.

O efeito das seqüências das harmônicas em instalações alimentadas por quatro condutores (3F + N) pode ser entendido da seguinte forma: as harmônicas de seqüência positiva e negativa provocam aquecimento nos condutores de fase, enquanto as de seqüência zero somam-se algebricamente no condutor neutro, o que pode causar até mesmo a destruição de bancos de capacitores.

III.2. Espectro Harmônico

O espectro harmônico pode ser representado por um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com a sua frequência, valor eficaz e defasagem. Um espectro poderia mostrar todas as componentes de uma onda, porém na prática, a ordem é limitada de modo a considerar apenas as harmônicas que podem perturbar o funcionamento de uma instalação. A figura 4 mostra um exemplo de espectro harmônico, onde a onda de tensão é praticamente senoidal, e por isso, a única componente visível é a fundamental.

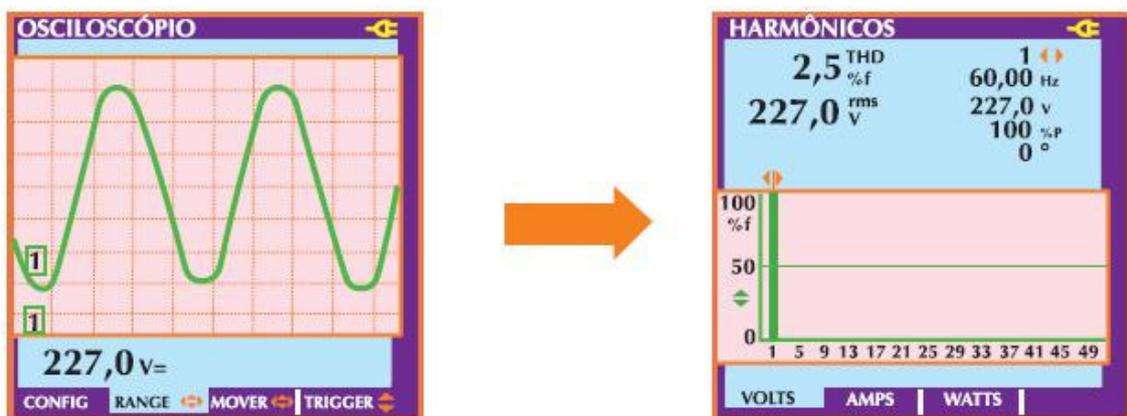


Figura 4 – Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal

Já na figura 5, o espectro mostra uma onda de corrente distorcida com componentes de ordem 3, 5, 7, 9 e várias outras.

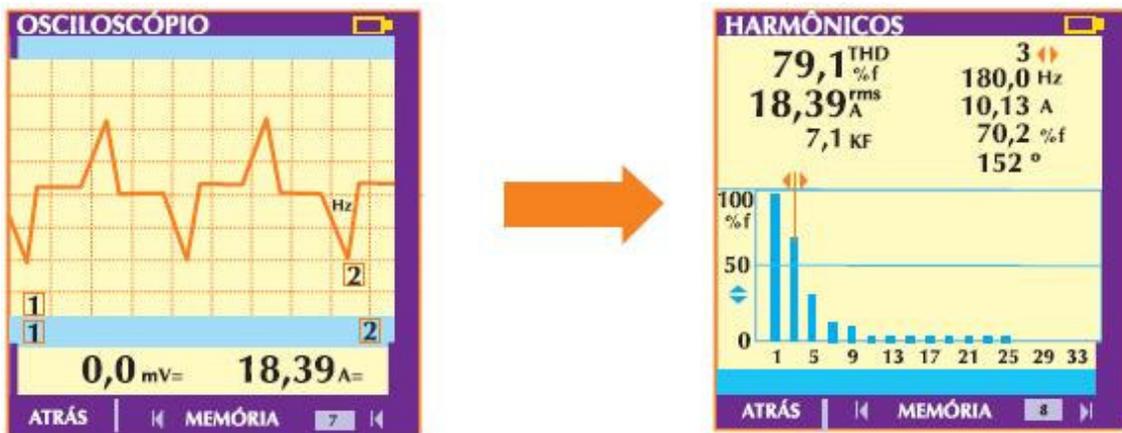


Figura 5 – Forma de onda e espectro de um sinal distorcido

III.3. Taxa de Distorção Harmônica Total (THD)

A taxa de distorção harmônica (THD) é definida de forma a medir o quanto a corrente ou tensão é afetada pelas componentes harmônicas em um determinado ponto da instalação.

A THD pode ser quantificada de duas formas, conforme as equações.

$$THD_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$THD_r = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots + (h_n)^2}} \times 100\% \quad (2)$$

A primeira equação indica a distorção harmônica total em relação à componente fundamental e a segunda à distorção harmônica em relação ao sinal total.

Porém, é possível verificar que em ambas as equações, na ausência de componentes harmônicas o THD será igual a zero, o que indica que quanto menor o valor da THD, menos distorcido é o sinal em relação à fundamental.

São definidos dois valores de THD, sendo um para tensão (THDV) e outro para corrente (THDI), os quais indicam, respectivamente, o grau de distorção das ondas de tensão e corrente, em relação à onda puramente senoidal.

A THDI é provocada pela carga, enquanto que a THDV pode ser produzida pela fonte geradora como consequência da circulação de correntes distorcidas pela instalação ou pela carga, o que provoca o efeito “bola de neve”.

Um exemplo de THD_f para um sinal de corrente pode ser visto de acordo com as seguintes características medidas em um ponto do circuito, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Exemplo de correntes harmônicas em um dado sinal

Ordem	Valor em A
1	3,63
3	2,33
5	0,94
7	0,69
9	0,50
11	0,41
13	0,33
Total	4,53

Fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Procobre, 2001

Desses valores pode-se obter:

$$THD_f = \frac{\sqrt{(2,33)^2 + (0,94)^2 + (0,69)^2 + (0,50)^2 + (0,41)^2 + (0,33)^2}}{3,63} \times 100\% = 74,5\% \quad (3)$$

A Figura 6 mostra o sinal de corrente e o seu respectivo espectro harmônico relativo ao exemplo.

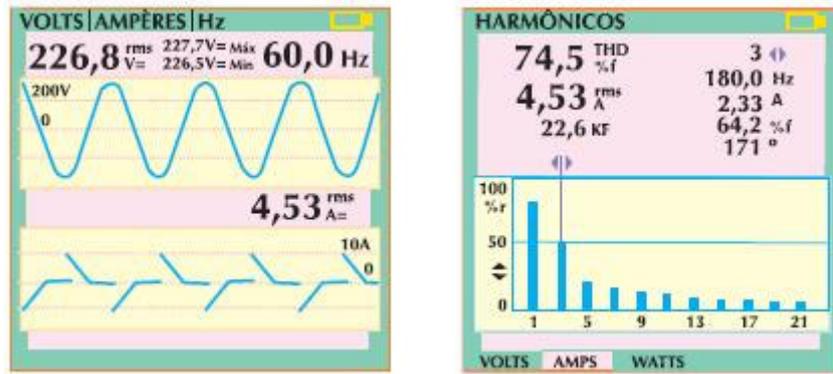


Figura 6 – Forma de onda de corrente e seu espectro harmônico

Como pode ser notado, a onda de corrente é bastante deformada em relação à fundamental, o que pode ser verificado através do valor do THD_f (74,5%).

A Figura 7 mostra dois outros exemplos de ondas e respectivos espectros harmônicos associados a THD_f bem distintos. O primeiro mostra uma onda quase senoidal com $THD_f = 2,5\%$ enquanto que o segundo mostra uma onda bem distorcida com $THD_f = 79,1\%$.

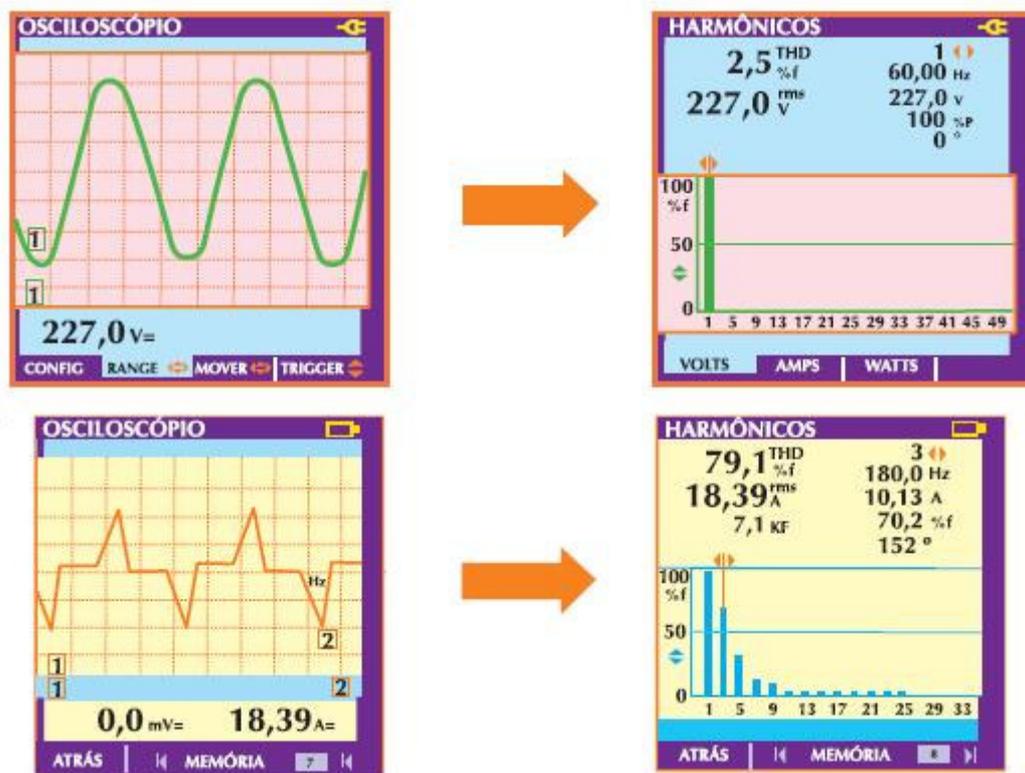


Figura 7 – Forma de ondas de corrente e seus espectros harmônicos

III.4. Fator de Potência e $\cos\phi$

Fator de potência e $\cos\phi$ usualmente são considerados sinônimos, o que só é apropriado para o caso em que não existam componentes harmônicas no circuito.

A definição de fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente definida para um sinal periódico não senoidal. Já a definição de $\cos\phi$ é a relação entre a potência ativa e a potência aparente definida para cada uma das componentes harmônicas (senoidais).

$$fp = \frac{P(W)}{S(VA)} \quad (4)$$

$$\cos\phi_n = \frac{P_{hn}(W)}{S_{hn}(VA)} \quad (5)$$

O que pode ser feito para avaliar a quantidade de componentes harmônicas em um circuito é medir o $\cos\phi$ da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado e após isso comparar o resultado. Se os valores estiverem diferentes, significa que o circuito possui componentes harmônicas.

A Figura 8 mostra um exemplo onde é possível ver que $fp = 0,70$ e $\cos\phi = 0,87$, o que demonstra uma quantidade razoável de componentes harmônicas no sinal.



Figura 8 – Forma de onda com diferença entre fator de potência e $\cos\phi$

III.5. Fator de Redução de capacidade nominal

Os transformadores são dimensionados considerando-se a potência nominal e o calor dissipado em regime de plena carga, e são calculados com base na hipótese de que o sistema é composto de cargas lineares e que não produzem harmônicas. No entanto, não é isto o que ocorre. As cargas não lineares geram harmônicas que circulam nos transformadores e produzem um sobreaquecimento. Para evitar que estes equipamentos sejam danificados é necessário estabelecer um fator que indique o quanto deve ser reduzida a potência máxima de saída para quando existirem harmônicas.

As expressões mais usuais para o fator K e a máxima potência fornecida por um transformador são:

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms} \sqrt{2}} \quad (6)$$

$$S_{máx} = \frac{S_{nom}}{K} \quad (7)$$

Para isso é necessário determinar o valor de pico e a corrente eficaz em cada fase do secundário do transformador, para então tirar a média desses valores e inserir na expressão acima.

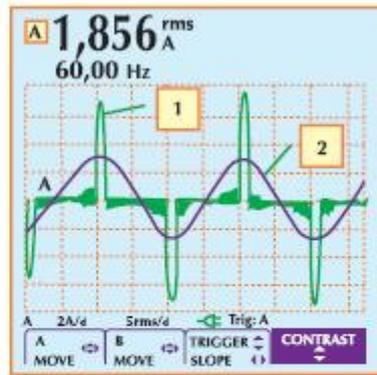
Assim, supondo um fator de redução da capacidade nominal $K = 1,2$ determinado para um transformador de 1000 kVA, então para evitar o sobreaquecimento do equipamento, a máxima potência permitida seria de $1000 / 1,2 = 833$ kVA.

III.6. Fator de Crista

A definição de fator de crista (FC) é a relação entre o valor de pico e o valor eficaz de um sinal.

$$FC = \frac{I_{pico}}{I_{rms}} \quad (8)$$

Um exemplo pode ser visto na Figura 9, onde existem dois sinais de corrente, sendo que as duas ondas possuem o mesmo valor eficaz enquanto que o valor de pico da onda 1 é maior do que o valor de pico da onda 2. Com isso é possível perceber que em circuitos onde há a presença de harmônicas, o valor eficaz é uma informação pouco significativa, e que para analisar o tipo de sinal a ser medido é necessário conhecer também o seu valor de pico e a sua distorção harmônica total (THD).



	Sinal 1	Sinal 2
Corrente de pico (A)	7,45	2,63
Corrente rms (A)	1,86	1,86
Fator de crista (FC)	4,000	1,414

Figura 9 – Exemplo de fator de crista

III.7 Cargas que produzem Harmônicas

As harmônicas estão diretamente associadas às cargas não lineares. Essas cargas possuem dispositivos de eletrônica de potência como, por exemplo: diodos, transistores, tiristores, sendo que praticamente todos eles operam em modo de interrupção. Isto significa que funcionam em estado de condução e bloqueio, onde o primeiro corresponde a um interruptor fechado, em que a corrente pode alcançar valores elevados enquanto a tensão é praticamente nula e o segundo estado corresponde a um interruptor aberto, em que a corrente é muito pequena enquanto a tensão é elevada. Assim, o usuário pode alternar os instantes de condução e bloqueio, e conseqüentemente a tensão e corrente desses dispositivos de controle. A Figura 10 mostra um exemplo das distorções harmônicas causadas por dispositivos não lineares:

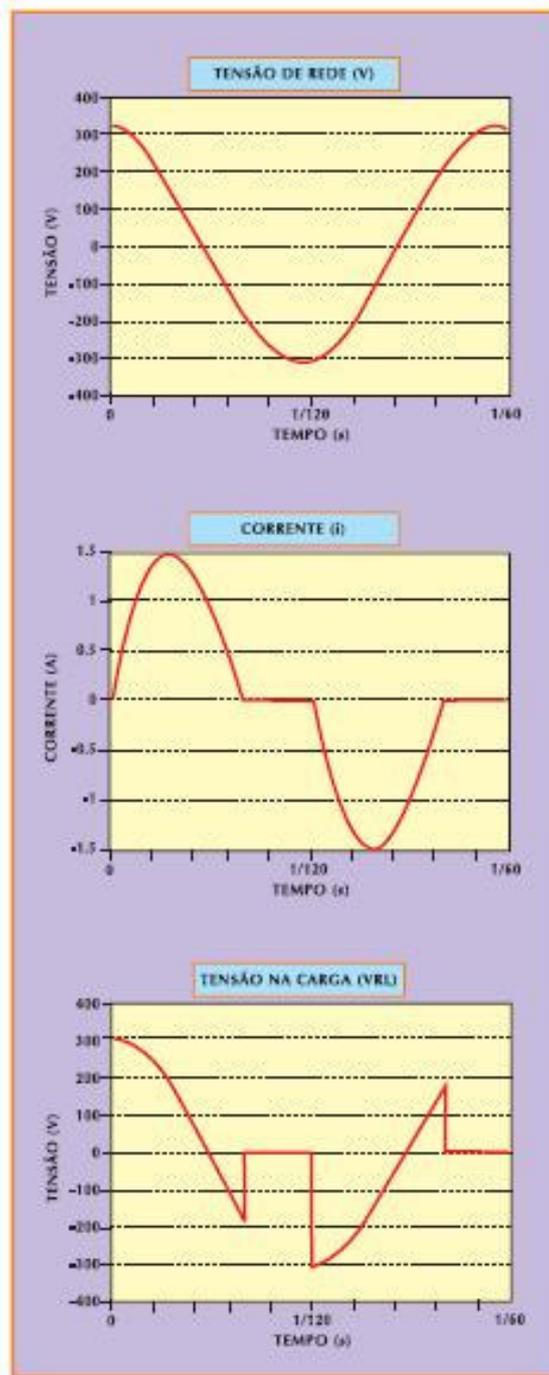


Figura 10 – Formas de onda no circuito com dispositivo não linear

III.8. Causas e Efeitos

Assim como qualquer perturbação na forma de onda puramente senoidal afeta a qualidade de energia da instalação e pode causar danos a equipamentos, com as harmônicas não é diferente.

As harmônicas podem causar aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações, aumento da queda de tensão e redução do fator de potência da instalação, tensão elevada entre neutro e terra, etc.

III.8.1 Causas

As correntes harmônicas das cargas são produzidas por todas as cargas não lineares que incluem cargas monofásicas e trifásicas.

III.8.1.1. Cargas monofásicas:

- Fontes chaveadas (SMPS – *Switched Mode Power Supplies*)
- Lâmpadas fluorescentes
- Pequenas fontes de potência ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supplies*)

III.8.1.1.1. Fontes chaveadas

Atualmente a maioria dos equipamentos utiliza fonte chaveada em detrimento aos transformadores. A vantagem do uso de fontes chaveadas é que o tamanho, o custo e o peso são reduzidos significativamente. Em compensação, a principal desvantagem é que ao invés de utilizar corrente contínua do suprimento, utiliza pulsos de corrente com grande quantidade de 3ª harmônica e harmônicas maiores, além de significantes componentes de alta frequência (ver Figura 11 abaixo).

Essas componentes de alta frequência podem até ser neutralizadas por um simples filtro, porém, este mesmo filtro não tem nenhum efeito sobre as harmônicas de ordem mais baixas.

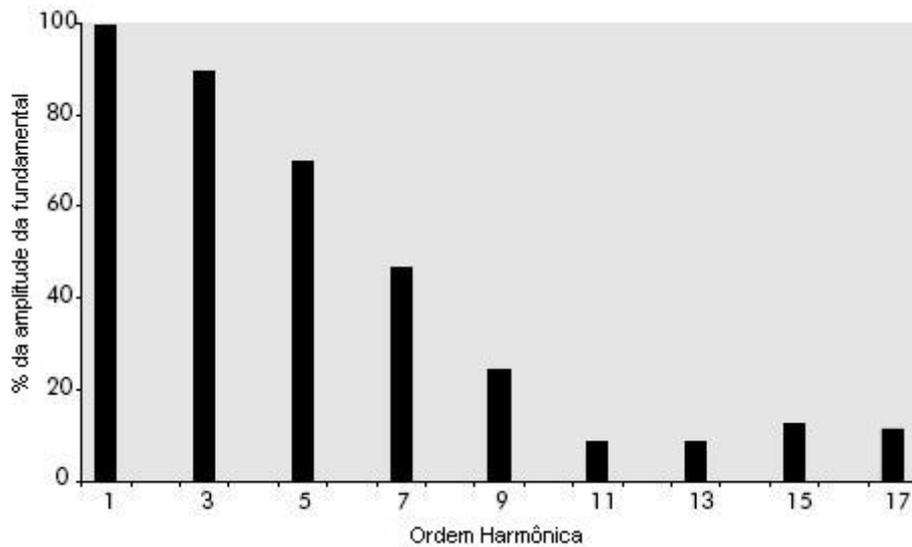


Figura 11 – Espectro Harmônico de um computador com fonte chaveada

III.8.1.1.2. Lâmpadas Fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes ficaram populares recentemente devido a demanda por uma melhoria na eficiência. A vantagem principal é que o nível de iluminação é mantido praticamente constante durante um longo tempo de vida. E a maior desvantagem é que este equipamento produz harmônicas na corrente de suprimento.

Algumas lâmpadas chamadas de corretoras de fator de potência são disponíveis em níveis de tensão maiores e reduzem os problemas com as perturbações harmônicas, porém com um custo significativamente maior. As lâmpadas fluorescentes compactas estão sendo amplamente utilizadas na substituição das tradicionais lâmpadas com filamento de tungstênio. Algumas dessas lâmpadas de 11W podem substituir lâmpadas tradicionais de 60W, o que corresponde a uma economia energética de aproximadamente 80% do consumo de energia elétrica para iluminação, e possuem um tempo de vida maior (aproximadamente 8000 horas).

Um espectro de harmônicas da corrente da lâmpada fluorescente compacta é mostrado na Figura 12:

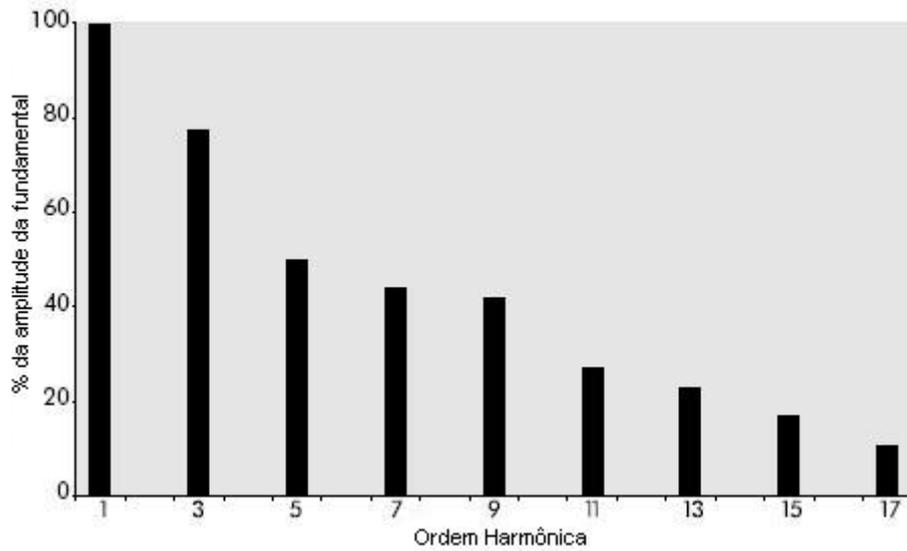


Figura 12 – Espectro Harmônico de uma lâmpada fluorescente compacta

III.8.1.2. Cargas trifásicas:

- Variadores de velocidade (*Variable Speed Drives*)
- Grandes fontes de potência ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supplies*)

Os variadores de velocidade (*Variable Speed Drives*), as fontes de potência ininterrupta (UPS – *Uninterruptible Power Supplies*) e os conversores CC são geralmente baseados em pontes trifásicas como a da Figura 13.

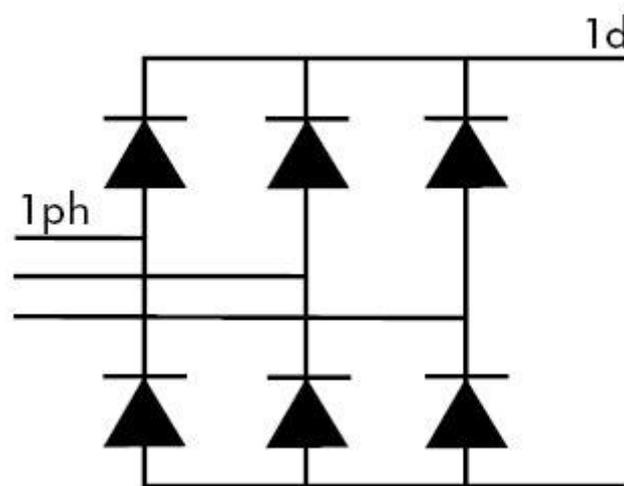


Figura 13 – Ponte Trifásica ou de seis pulsos

Essas pontes também são conhecidas como ponte de seis pulsos porque cada ciclo de onda possui seis pulsos. A ponte de seis pulsos produz harmônicas de ordem $6n \pm 1$, e a amplitude de cada harmônica é o recíproco do número, ou seja, 20% para quinta harmônica, 9% para décima primeira harmônica e assim por diante.

Um espectro harmônico típico dessa ponte é mostrado na figura 14:

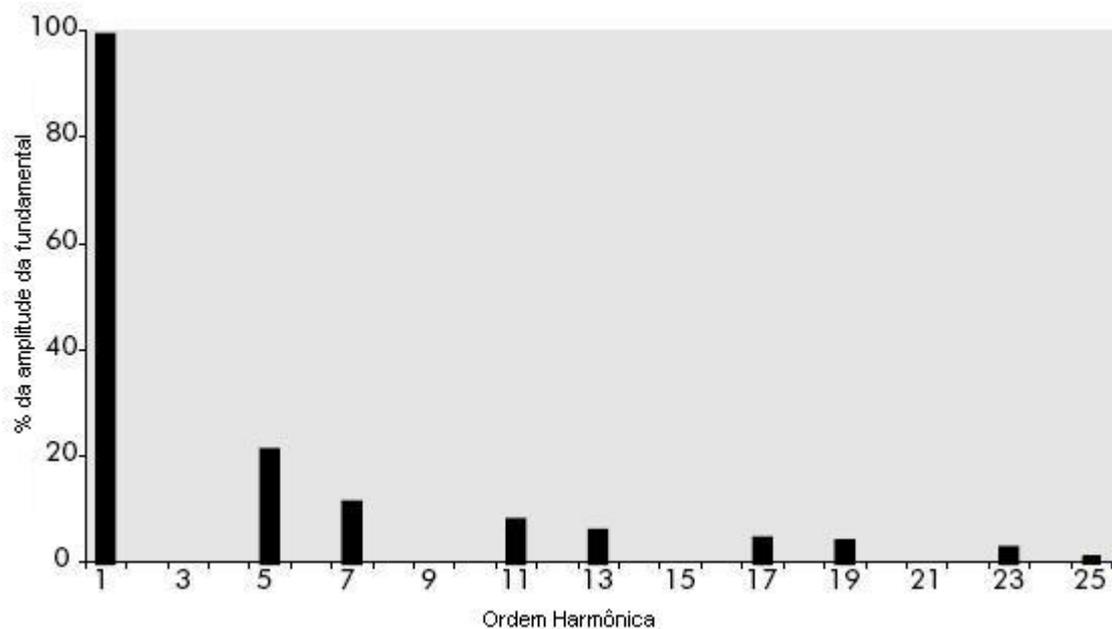


Figura 14 – Espectro Harmônico de uma típica ponte de seis pulsos

A amplitude das harmônicas pode ser reduzida através do uso de uma ponte de doze pulsos, que é efetivamente duas pontes de seis pulsos alimentadas por um transformador delta-estrela com 30 graus de defasagem entre elas. Neste caso as harmônicas de ordem $12n \pm 1$ são as únicas que permanecem.

A Figura 15 mostra uma ponte de doze pulsos.

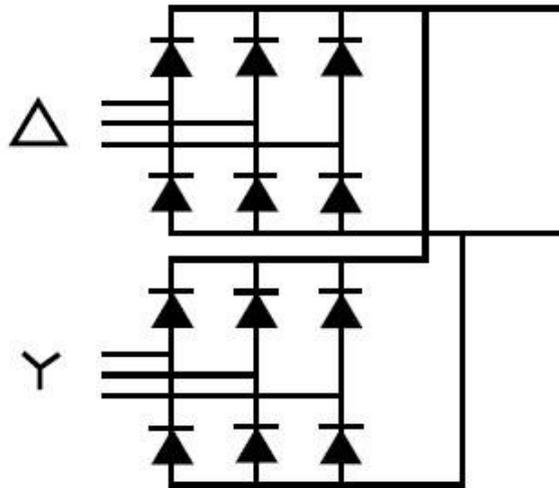


Figura 15 – Ponte de doze pulsos

Os efeitos das harmônicas podem ocorrer tanto na instalação quanto no sistema de suprimento e as soluções são bem diferentes e precisam ser consideradas separadamente. As medidas necessárias para redução de correntes ou tensões harmônicas em uma instalação podem não necessariamente reduzir as distorções harmônicas em um sistema de suprimento de energia elétrica, e vice versa.

III.8.2. Efeitos

Os principais problemas causados por harmônicas em uma instalação são apresentados a seguir:

III.8.2.1. Problemas causados por correntes harmônicas

- Aquecimento do condutor neutro
- Perdas nos transformadores
- Disparo de dispositivos de proteção
- Sobre estresse de capacitores de correção de fator de potência
- Efeito pelicular

III.8.2.1.1. Aquecimento do condutor neutro

Em sistemas trifásicos balanceados, as tensões fase-neutro estão defasadas em 120° umas das outras, e quando cada fase é carregada igualmente, a corrente que flui pelo condutor neutro é igual a zero. Quando existe um desbalanço entre as tensões, as correntes são somadas ao neutro e a resultante é diferente de zero. Isso no passado fez com que o condutor neutro fosse usualmente dimensionado com a metade da bitola dos condutores de fase. Entretanto, apesar das correntes fundamentais se cancelarem, o mesmo não ocorre com as correntes harmônicas, principalmente as harmônicas múltiplas de três (as chamadas 3N). Essas correntes harmônicas somam-se no condutor neutro atingindo de 150% a 210% da amplitude da corrente fundamental (fonte: Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções**. Procobre, 2001). A Figura 16 mostra como as correntes harmônicas de ordem 3N se comportam no condutor neutro.

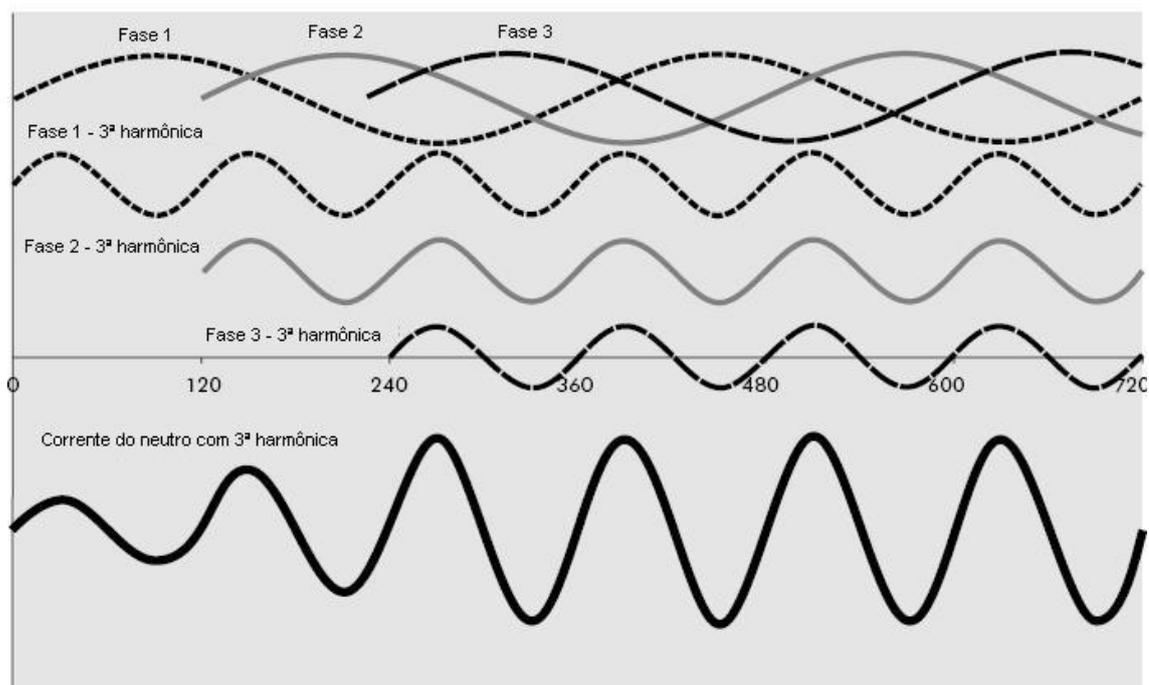


Figura 16 – Correntes harmônicas de ordem 3N somadas ao neutro

III.8.2.1.2. Efeito nos transformadores

Os transformadores são afetados de duas maneiras pelas harmônicas. A primeira pelas perdas por correntes parasitas, cerca de 10% da perda em carga total, acrescida do quadrado da ordem da harmônica. Isto significa que para um transformador alimentando um equipamento com dispositivos de eletrônica de potência não-lineares, as perdas do

transformador seriam o dobro de um transformador que estivesse alimentando uma carga linear. Isto resultaria em uma temperatura de operação mais elevada e conseqüentemente, em um menor tempo de vida do equipamento. A segunda maneira pela qual os transformadores são afetados pelas harmônicas são as harmônicas de ordem 3N. Estas harmônicas ficam presas no delta dos transformadores como correntes circulantes, assim, essas correntes devem ser levadas em consideração no dimensionamento dos transformadores.

III.8.2.1.3. Disparo de dispositivos de proteção

Dispositivos de proteção operados por corrente residual, funcionam somando as correntes de neutro e fase, e se o resultado ficar fora de um limite estabelecido, é disparado o dispositivo. O disparo indesejável pode ocorrer de duas maneiras na presença de harmônicas. A primeira é que sendo um equipamento eletromecânico, não é possível medir corretamente a soma das componentes de alta frequência e assim, pode disparar incorretamente. E a segunda é que os equipamentos que usualmente geram harmônicas também geram ruídos de manobra que devem ser filtrados nas conexões do equipamento. Os filtros geralmente utilizados para este propósito possuem um capacitor da linha e do neutro para a terra, e assim drenam uma pequena quantidade de corrente para terra. Essa corrente é limitada por norma em menos de 3,5 mA, mas pode ser suficiente para disparar o dispositivo de proteção.

III.8.2.1.4. Sobre estresse de capacitores de correção de fator de potência

Esses capacitores foram desenvolvidos para compensar as correntes com o ângulo de fase atrasado que circulam nas cargas, como os amplamente utilizados motores de indução, e assim aumentar o fator de potência. A Figura 17 mostra um capacitor de correção de fator de potência com uma carga não linear.

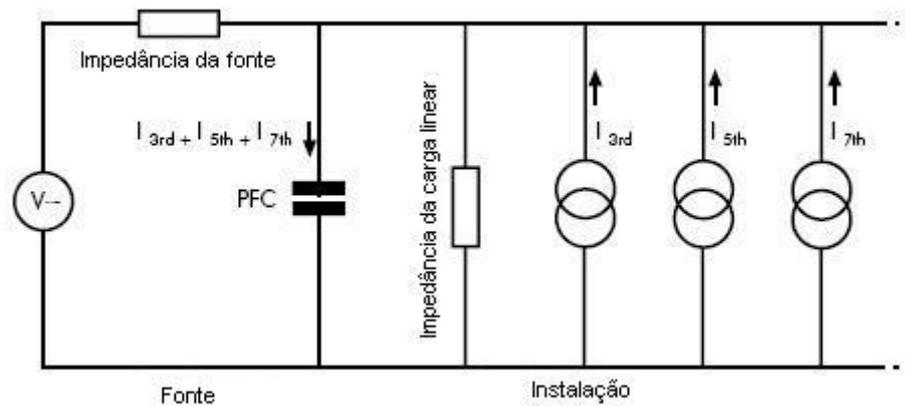


Figura 17 – Circuito equivalente de uma carga não linear com um capacitor

A impedância do capacitor de correção de fator de potência diminui quando a frequência aumenta, enquanto que a impedância da fonte geralmente é indutiva e aumenta com a frequência. Dessa forma o capacitor carrega correntes harmônicas de ordens elevadas e caso não seja projetado para isso, pode sofrer algum tipo de dano.

Outro problema é quando o capacitor e a indutância do sistema de suprimento entram em ressonância. Quando isso ocorre, grandes tensões e correntes podem ser geradas, e com isso, falhas no sistema do capacitor. Para resolver esse problema de ressonância, uma impedância pode ser instalada em série com o capacitor para que o conjunto seja indutivo somente na componente harmônica de menor ordem. Essa solução também limita a corrente harmônica que circula pelo capacitor.

III.8.2.1.5. Efeito Pelicular

A corrente alternada tende a fluir na superfície externa do condutor. Esse fenômeno é conhecido como efeito pelicular e é mais perceptível em frequências elevadas. Geralmente este efeito é ignorado por pouco influenciar nas frequências de suprimento, porém em frequências superiores a 350Hz o efeito pelicular torna-se significativo, causando perdas adicionais e aquecimento. Por este motivo, este fenômeno deve ser considerado sempre que correntes harmônicas estiverem presentes na rede.

III.8.2.2. Problemas causados por tensões harmônicas

- Distorções na tensão
- Perdas nos motores de indução

- Ruídos em detectores de zero

III.8.2.2.1. Distorções na tensão

Por causa da impedância da fonte, as correntes harmônicas das cargas dão origem a distorções harmônicas de tensão. Existem dois elementos para a impedância: o do cabeamento interno a partir do ponto de acoplamento comum (PAC), e o inerente ao suprimento do PAC (o transformador de suprimento local). A Figura 18 mostra esta característica:

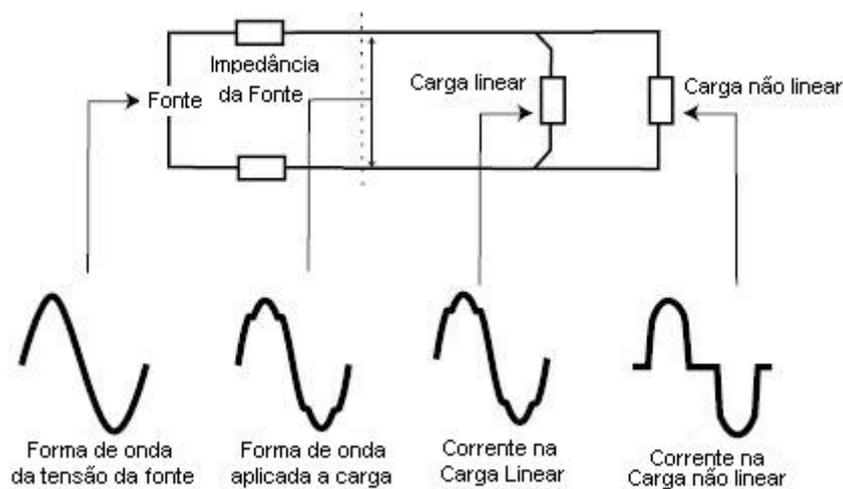


Figura 18 – Distorções de tensão causadas por cargas não lineares

A corrente distorcida que circula pelas cargas não lineares causam uma tensão distorcida na impedância do cabo. A onda de tensão distorcida resultante é aplicada a todas as outras cargas conectadas ao mesmo circuito, causando um fluxo de correntes harmônicas, mesmo em cargas lineares.

A solução é separar os circuitos que geram correntes harmônicas daqueles que possuem cargas sensíveis a estas harmônicas, conforme mostrado na Figura 19.

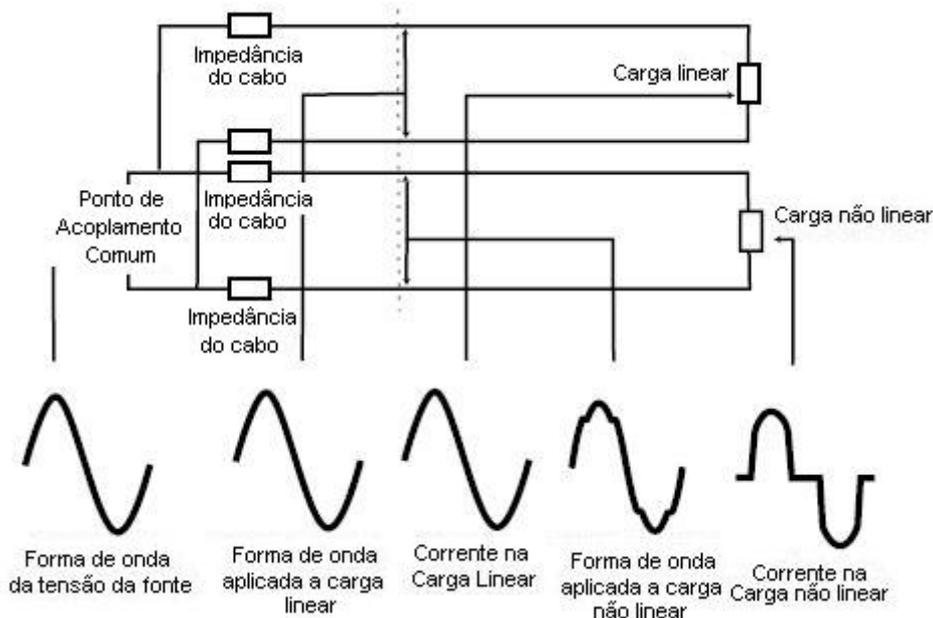


Figura 19 – Separação de cargas lineares e não lineares

Na Figura 19, circuitos separados alimentam as cargas lineares e não lineares a partir do ponto de acoplamento comum (PAC), assim a tensão harmônica causada pela carga não linear não afeta a carga linear.

Quando for considerada a amplitude da tensão harmônica, deve ser levado em conta que quando a carga é transferida para um UPS ou para um gerador de emergência durante uma interrupção do fornecimento de energia elétrica, a impedância da fonte e a distorção resultante de tensão podem ser maiores.

Onde os transformadores locais forem instalados, estes devem ser selecionados para terem baixa impedância de saída e capacidade suficiente para suportar o aquecimento adicional, ou em outras palavras, devem ser superdimensionados.

III.8.2.2.2. Perdas nos motores de indução

As tensões harmônicas causam o aumento das perdas por correntes parasitas nos motores, da mesma maneira que causam nos transformadores. Contudo, perdas adicionais são geradas pela formação de campos harmônicos no estator, sendo que estes campos tendem a fazer o motor girar em diferentes velocidades e sentidos. Correntes de alta frequência induzidas no rotor também aumentam as perdas.

Por estas razões, sempre que correntes harmônicas estiverem presentes, os motores devem ser dimensionados para conviverem com estas perdas adicionais.

III.8.2.2.3. Ruídos em detectores de zero

Muitos controladores eletrônicos detectam o ponto onde a tensão cruza o ponto zero para, por exemplo, determinar quando as cargas devem ser ligadas. Isso acontece porque ao manobrar cargas reativas no ponto zero de tensão, estas não geram transitórios, e dessa forma reduz-se a interferência eletromagnética (EMI) e o estresse dos dispositivos semicondutores de manobra. Quando harmônicas e transitórios estão presentes no suprimento, o número de vezes que a tensão cruza o ponto zero dentro de um mesmo ciclo aumenta e dificulta a identificação por esses dispositivos, levando a uma operação incorreta.

III.9. Medidas para mitigação de harmônicas

Os métodos de mitigação de harmônicas podem ser divididos em três grupos:

- Filtros Passivos
- Transformadores de separação e redução de harmônicas
- Filtros Ativos

Cada grupo possui vantagens e desvantagens, sendo que não existe uma solução melhor para todos os casos. É importante que seja realizado uma análise criteriosa de cada caso para não escolher uma solução que não seja adequada.

III.9.1. Filtros Passivos

Filtros passivos são usados para prover um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, assim elas fluem no filtro e não no suprimento, como mostrado na Figura 20.

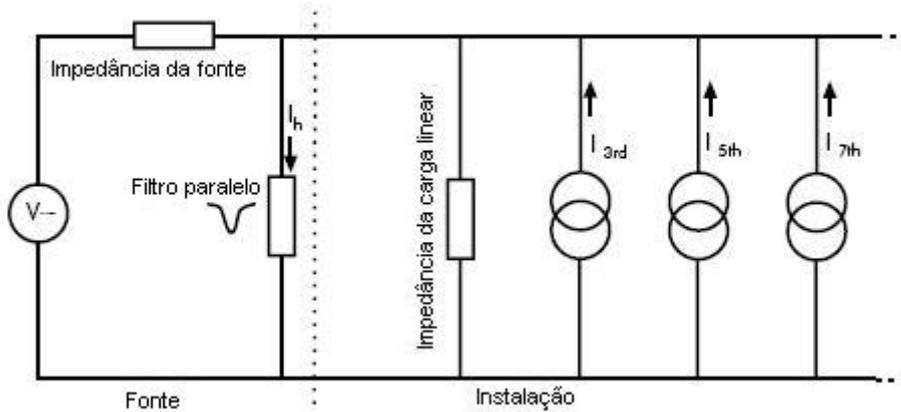


Figura 20 – Filtro Passivo de Harmônicas em paralelo com a carga

O filtro pode ser projetado para uma simples harmônica ou para uma faixa de frequência dependendo dos requisitos.

Às vezes é necessário projetar filtros mais complexos para aumentar a impedância série nas frequências harmônicas e assim reduzir a proporção da corrente que flui de volta para o suprimento, como mostrado na Figura 21.

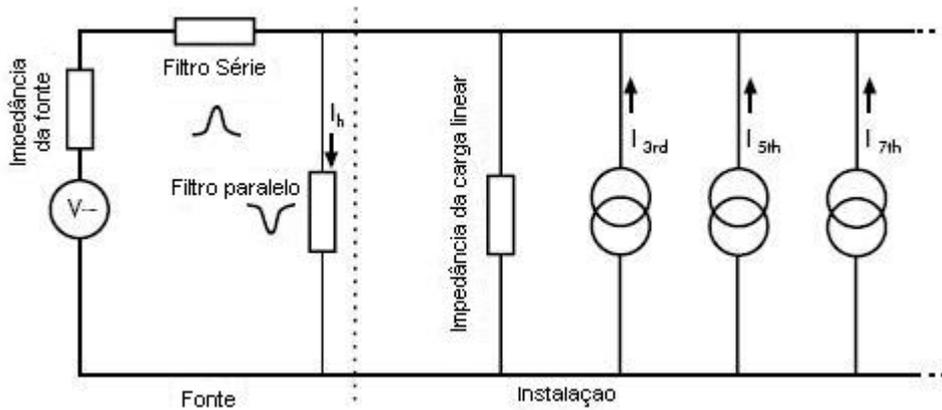


Figura 21 – Filtro Passivo em paralelo e série com a carga

O filtro LC é geralmente usado em paralelo com a fonte poluidora. A figura 22 mostra uma ligação típica desse filtro, onde também pode ser visto o emprego adicional de uma indutância para amortecimento das harmônicas.

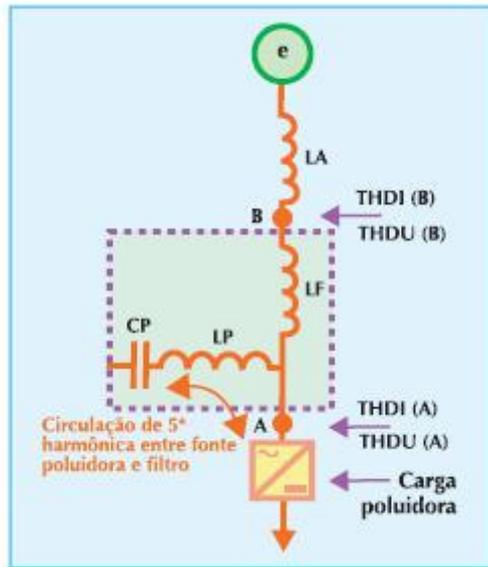


Figura 22 – Emprego de filtro de harmônicas não compensado para atenuação de uma harmônica específica

Nesse caso a indutância (LP) e a capacitância (CP) são escolhidas de modo que a impedância do filtro seja zero para a frequência que se deseja eliminar e seja muito pequena para as outras frequências próximas dessas, ou seja:

$$LP \times CP \times \omega^2 = 1 \quad (9)$$

Por exemplo, se é necessário eliminar a 5ª harmônica, temos:

$$LP \times CP \times (2 \times \pi \times 5 \times 60)^2 = 1 \quad (10)$$

$$LP \times CP = 0,281 \times 10^{-6} \quad (11)$$

O filtro de harmônicas passivo LC descrito é chamado de filtro não compensado, porém há outro tipo chamado de filtro de harmônicas compensado, mostrado na Figura 23, que é particularmente recomendado para instalações onde seja utilizada uma fonte de substituição de energia, como por exemplo, grupos geradores. A indutância adicional (LA) instalada em paralelo com o filtro LC reduz a energia capacitiva introduzida pelo filtro, tanto na partida quanto em regime permanente.

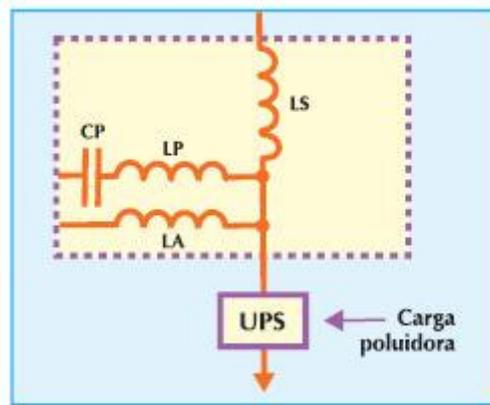


Figura 23 – Emprego de filtro de harmônicas compensado para atenuação de uma harmônica específica

As principais vantagens dos filtros de harmônicas passivos LC são:

- Simples e confiáveis
- A indutância de compensação pode ser instalada a qualquer momento
- Aumento do fator de potência da instalação, uma vez que a introdução do capacitor compensa parte da energia indutiva dos componentes existentes

E as principais desvantagens são:

- Limite de espectro de atuação, ou seja, o filtro elimina apenas o sinal harmônico sintonizado e atenua outras harmônicas próximas, mas não é eficaz para uma banda mais larga de sinais
- Depende da fonte de alimentação, pois o uso de filtro compensado é obrigatório no caso da presença de grupos geradores
- Funciona adequadamente apenas se não houver alteração nas cargas durante a vida da instalação, uma vez que, a mudança das cargas pode provocar alteração no espectro harmônico da instalação, fazendo com que a frequência de sintonia previamente estabelecida para o filtro seja diferente do novo valor existente

III.9.2. Transformadores de separação e redução de harmônicas

Os transformadores de separação são utilizados para mitigar problemas com harmônicas, principalmente por sua propriedade de poder isolar as cargas da fonte.

Assim, é possível confinar equipamentos que geram harmônicas dos outros equipamentos que são sensíveis a este distúrbio. Entretanto, estes transformadores utilizados não devem ser tratados como equipamentos convencionais, já que são submetidos a um aquecimento excessivo. Além disso, estes transformadores de separação, dependendo da forma como os enrolamentos primário e secundário são ligados, podem ser mais adequados para o confinamento de certas ordens de harmônicas.

Os transformadores com ligação delta estrela são recomendados para a eliminação de harmônicas de ordem 3N.

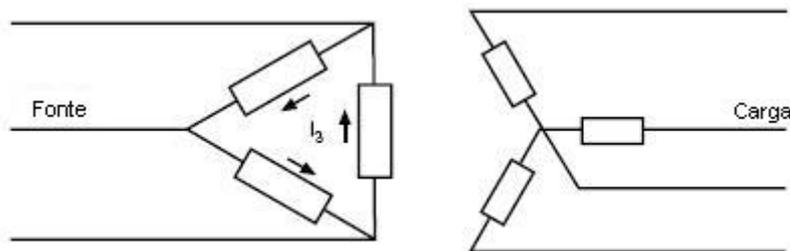


Figura 24 – Ligação delta estrela

Porém, devem ser especificados levando em consideração a carga extra que estes transformadores deverão suportar. Com isso, a terceira harmônica e suas múltiplas inteiras não irão poluir a instalação a montante do ponto onde foi instalado o transformador. Dessa forma, todos os equipamentos a montante do transformador podem ser dimensionados sem nenhuma preocupação adicional em relação às harmônicas 3N.

Conforme pode ser visto na Figura 25, a aplicação desses transformadores é recomendada para atender principalmente equipamentos que possuem fontes monofásicas, tais como computadores pessoais, máquinas de fax, copiadoras, eletrodomésticos em geral, etc.

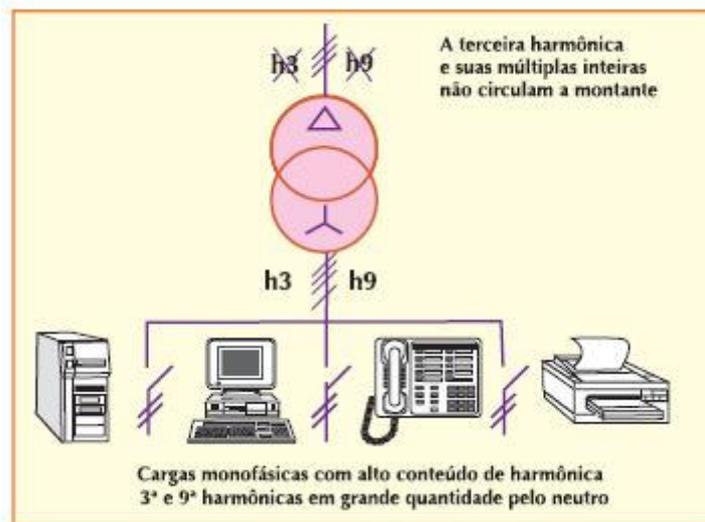


Figura 25 – Transformador para confinamento de harmônicas de ordem 3N

Para as cargas trifásicas que produzem harmônicas, algumas das harmônicas que predominam são as de quinta e sétima ordem. Nestes casos uma possível técnica é o uso de transformador com duplo secundário, onde se realiza um defasamento angular de 30° entre os enrolamentos. Outra solução é o uso de dois transformadores com diferentes ligações de forma a também se obter um defasamento de 30° entre as tensões. A Figura 26 mostra esses esquemas.

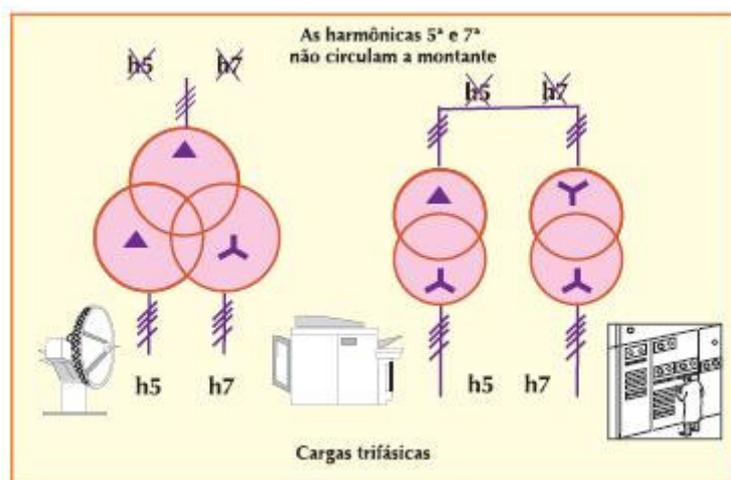


Figura 26 – Transformador para confinamento de harmônicas de 5ª e 7ª ordem

O resultado destas soluções é a obtenção de uma redução da taxa de distorção harmônica da corrente (THDI) e, em particular, das harmônicas de 5ª e 7ª ordem. Isto ocorre porque, com a defasagem angular, as harmônicas de 5ª e 7ª ordem de um enrolamento estão em oposição de fase em relação às mesmas ordens de harmônicas do outro enrolamento.

É muito importante que as cargas sejam trifásicas em ambos os secundários para que esta solução ofereça resultado satisfatório. Também é necessário que as cargas apresentem características similares nas duas distribuições e os carregamentos dos dois transformadores sejam praticamente iguais para que a soma das correntes no primário seja muito próxima de zero.

A aplicação desta solução é recomendada principalmente a equipamentos do tipo retificadores trifásicos e variadores de velocidade.

III.9.3. Filtros Ativos

Ao contrário das soluções anteriores, onde o objetivo era eliminar algumas harmônicas particulares, como no caso do transformador de separação, em que foi mostrado a possibilidade de eliminação das harmônicas 3N ou das de 5ª e 7ª ordem, e o caso do filtro passivo, onde o filtro é projetado para uma componente harmônica específica, o filtro ativo é recomendado para os casos onde não é possível identificar quais harmônicas estão presentes na rede, como por exemplo, instalações de Tecnologia da Informação (TI) em que a mistura de equipamentos e a localização é constantemente alterada e conseqüentemente as características das harmônicas.

O filtro ativo é um dispositivo instalado em paralelo entre a fonte e a carga poluidora, conforme a Figura 27.

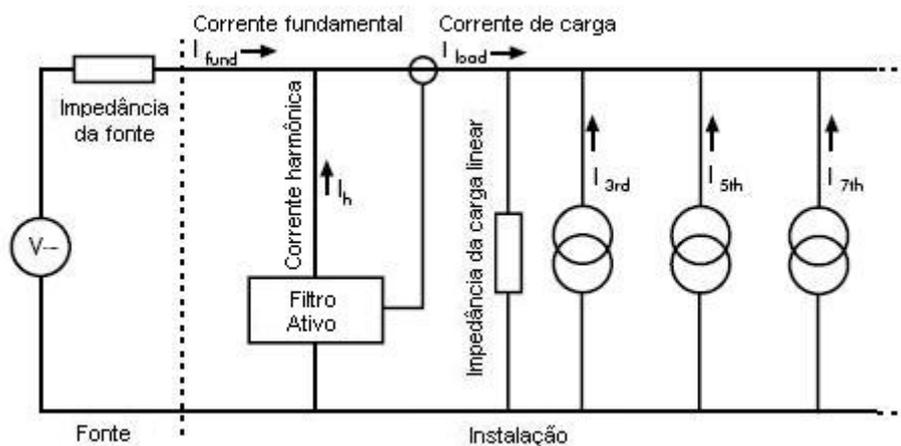


Figura 27 – Filtro ou Condicionador Ativo

O filtro analisa cada uma das fases continuamente, em tempo real, monitorando a corrente de carga. Dessa análise obtém-se o espectro harmônico com a indicação da

fundamental e de todas as outras componentes harmônicas do sinal. O filtro (condicionador) então gera um sinal de corrente que é igual a diferença entre a corrente total da carga e a fundamental defasado de 180° , que é injetado na carga de forma que a resultante seja uma corrente semelhante a fundamental da fonte. Assim é possível afirmar que não existe circulação de correntes harmônicas no trecho entre a fonte e o nó A da figura abaixo, e que todos os equipamentos ligados nesse trecho da instalação não serão afetados pela presença da carga harmônica.

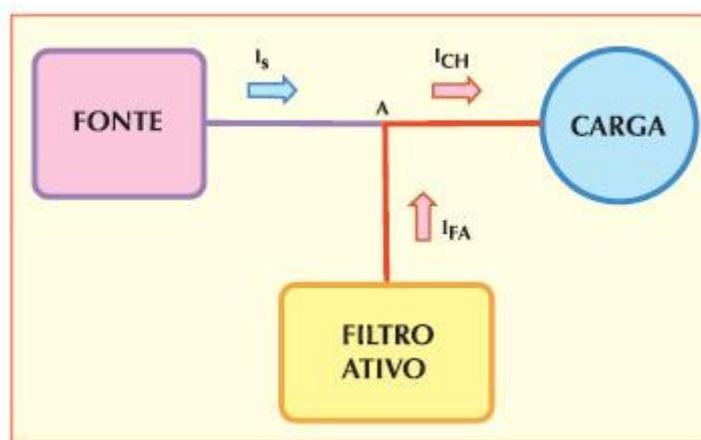


Figura 28 – Ligação em paralelo do Filtro Ativo

Uma das grandes vantagens desse filtro é o fato de sua instalação ser relativamente simples e pode ser conectada em qualquer ponto da instalação.

Geralmente esses condicionadores empregam transistores IGBT no módulo de potência e podem cobrir uma faixa de harmônicas de ordem 2^a a 25^a , por exemplo.

A utilização de um filtro ativo em uma instalação pode ser junto às cargas que geram grandes quantidade de harmônicas, assegurando que a filtragem seja realizada localmente; pode ser também junto aos quadros de distribuição, realizando uma compensação parcial das harmônicas ou ainda junto ao quadro geral da instalação, para prover uma compensação geral das correntes harmônicas.

A vantagem de se instalar no ponto de origem da geração de harmônicas é a não circulação de correntes harmônicas pela instalação elétrica, a redução das perdas por efeito Joule nos cabos e a redução da seção dos condutores.

A Figura 29 mostra um bom exemplo da atuação de um filtro ativo de harmônicas.

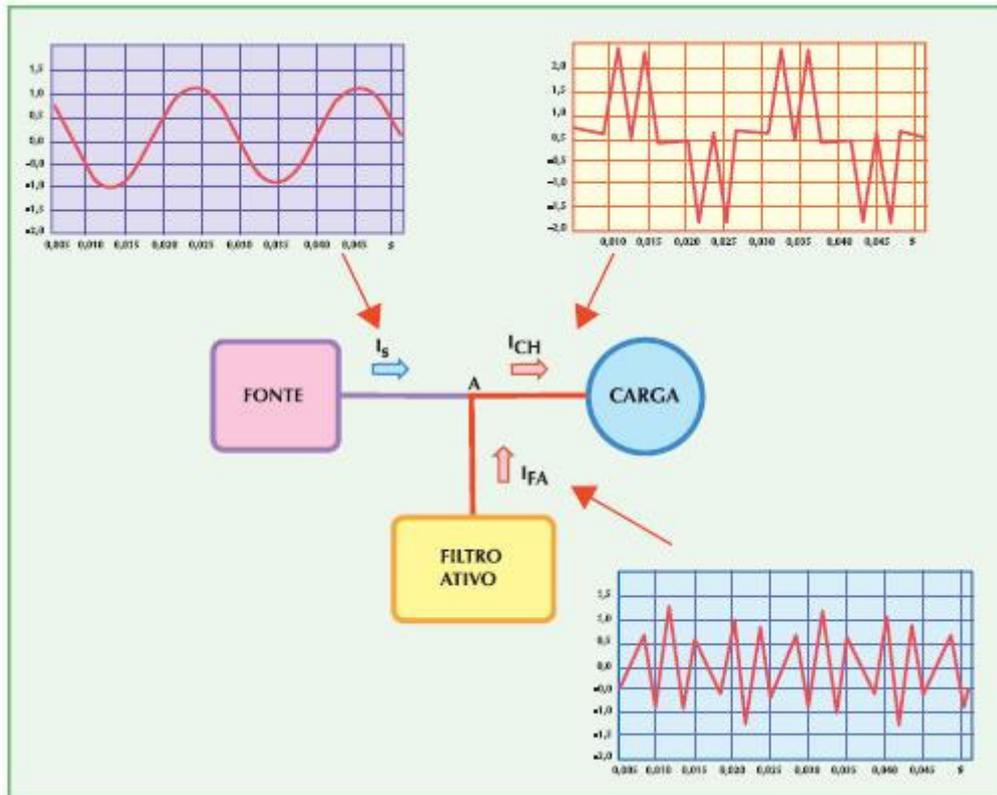


Figura 29 – Exemplo de atuação de filtro ativo

CAPITULO IV

IV. Comparação das normas IEEE 519 e IEC 61000-3-2

IV.1. IEC

O IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização não governamental de normatização internacional, sem fins lucrativos, que elabora e publica normas internacionais para tecnologias elétricas, eletrônicas e assuntos relacionados. As normas IEC abrangem uma vasta gama de assuntos como geração de energia elétrica, transmissão, distribuição, etc. O IEC também publica normas técnicas com o IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) e desenvolve normas em conjunto com o ISO (*International Organization for Standardization*) assim como o ITU (*International Telecommunication Union*).

O IEC foi fundado em 26 de junho de 1906, após discussões entre o IEE (*Institution of Electrical Engineers*) britânico, o IEEE americano e outros, que começaram em 1900 no congresso internacional elétrico de Paris, e continuou com o Coronel Rookes Evelyn Bell Crompton assumindo um papel de destaque.

Atualmente conta com mais de 130 países, sendo 67 destes membros e 69 afiliados (que participam de um programa para incentivo a países em industrialização a se envolverem com o IEC).

Inicialmente localizado em Londres, mudou-se para Genebra em 1948 e na atualidade possui centros regionais em Singapura, São Paulo e Boston.

Atualmente o IEC é líder mundial neste campo de atuação, e suas normas são adotadas como normatização nacional pelos países membros. Um trabalho realizado por cerca de 10000 especialistas das áreas de elétrica e eletrônica de diversas indústrias, governos, laboratórios e outros.

Em 1938, o IEC publicou um vocabulário internacional para unificar a terminologia elétrica. Esse trabalho ainda hoje continua e o Vocabulário Eletrotécnico Internacional continua sendo um trabalho importante nas indústrias elétricas e eletrônicas.

As normas IEC são usualmente mais utilizadas na Europa.

IV.2. IEEE

O IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) é uma organização internacional sem fins lucrativos voltada para o aperfeiçoamento da tecnologia relativa a eletricidade. Atualmente possui mais de 360000 membros em 175 países.

O IEEE foi fundado em 1963 pela fusão da AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*, fundada em 1884) e a IRE (*Institute of Radio Engineers*, fundada em 1912). O maior interesse da AIEE era a comunicação através de cabos e sistemas de potência. Já a IRE voltava seus interesses para a área de engenharia de radio.

Em 1961, as lideranças de ambas as instituições decidiram consolidar as duas organizações no que hoje é conhecido como IEEE. Isto ocorreu em 01/01/1963.

A constituição da IEEE define os objetivos da organização como “uma organização científica e educacional, direcionada para o avanço da teoria e prática das engenharias elétrica, eletrônica, de comunicações e de computação, assim como ciência da computação, outras engenharias e ciências relacionadas.”

Com isso o IEEE tornou-se o maior divulgador de jornais científicos e organizador de conferencias. Além disso, é um grande desenvolvedor de normas técnicas em várias áreas.

O IEEE consiste em 39 sociedades, organizadas em diferentes campos técnicos especializados, com mais de 300 organizações locais que se reúnem regularmente.

Apesar disso tudo, o IEEE tem sido acusado de abusar do seu quase monopólio em certos domínios científicos. Por exemplo, quando algum autor publica um artigo no IEEE, ele é forçado a transferir os seus direitos autorais para o IEEE que comercializa o artigo tanto em jornais quanto *online* sem pagar nada para o autor, nem para os revisores. Outras críticas são as taxas de atendimento em conferências que estão notoriamente altas. Com isso, novos meios de comunicação de artigos científicos têm surgido, porém publicar artigos no jornal da IEEE é praticamente mandatório para alcançar algum reconhecimento em certas comunidades científicas.

O IEEE é um dos líderes em produção de normas técnicas, e em 2005, o IEEE atingiu a marca de 900 normas em atividade e outras 500 em processo de desenvolvimento.

As normas IEEE são usualmente mais utilizadas nos EUA.

IV.3. IEC 61000-3-2 (2005)

A norma IEC 61000-3-2 de 2005 aborda o assunto de limites para introdução de correntes harmônicas (corrente de entrada em equipamentos menores ou igual a 16A por fase).

O objetivo dessa norma é tratar da limitação de introdução de corrente harmônica em sistemas de suprimento de energia elétrica. Ela especifica os limites máximos de componentes harmônicas da corrente de entrada que podem ser produzidas pelo equipamento testado sob condições específicas.

Esta norma é aplicável a equipamentos elétricos e eletrônicos com correntes de entrada até 16A por fase, e com o intuito de ser conectado ao sistema de distribuição em baixa tensão. Equipamentos de arco de solda para uso não profissionais com corrente de entrada até 16A por fase, estão incluídos nesta norma. Já sistemas com tensão nominal inferior a 220 V (fase-neutro), ainda não possuem os limites definidos.

A norma define quatro classificações de equipamentos (A, B, C e D) para propósito de limitação de corrente harmônica.

Para a classe A, estão incluídos os equipamentos com alimentação trifásica equilibrada, equipamentos de uso residencial (excluídos os equipamentos identificados como classe D), ferramentas (excluídas ferramentas portáteis), “dimmers” para lâmpadas incandescentes e equipamentos de áudio. Nesta categoria também estão incluídos todos os demais equipamentos que não se enquadram nas outras categorias. A Tabela 5 mostra os limites de corrente harmônica para os equipamentos classe A.

Tabela 5 – Limites para equipamentos Classe A

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida A
Harmônicas ímpares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$
Harmônicas pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$

Fonte: IEC 61000-3-2, 2005

Na classe B, estão incluídos as ferramentas portáteis e os equipamentos de arco de solda que não são equipamentos profissionais. Os limites máximos permitidos para a corrente harmônica são iguais ao da tabela da classe A multiplicados por 1,5.

Na classe C, estão incluídos os equipamentos para iluminação dos tipos: incandescente, a descarga, LEDs, incluindo “dimmers” (exceto para incandescentes). Para equipamentos com potência ativa de entrada acima de 25W, os limites podem ser vistos na Tabela 6 (expressos em % da fundamental da corrente de entrada). Para potência ativa menor do que 25W, a tabela para classe D se aplica com valores da coluna 2.

Tabela 6 – Limites para equipamentos Classe C

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida expressa em percentagem da frequência fundamental %
2	2
3	30 x λ^*
5	10
7	7
9	5
11 <= n <= 39 (somente harmônicas ímpares)	3
* λ é o fator de potência do circuito	

Fonte: IEC 61000-3-2, 2005

Já na classe D, estão incluídos os equipamentos com potência especificada de acordo com o item 6.2.2 da norma IEC 61000-3-2 e com potência menor ou igual a 600W. Nessa classe estão os computadores pessoais, monitores e equipamentos de televisão. A Tabela 7 mostra os limites de corrente harmônica para os equipamentos classe D.

Tabela 7 – Limites para equipamentos Classe D

Ordem harmônica n	Máxima corrente harmônica permitida por watt mA/W	Máxima corrente harmônica permitida A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 <= n <= 39 (somente harmônicas ímpares)	3,85/n	Ver tabela para classe A

Fonte: IEC 61000-3-2, 2005

IV.4. IEEE 519 (1992)

A norma IEEE 519 de 1992 aborda o assunto requisitos e práticas recomendadas para controle de harmônicas em sistemas de potência elétrica. A norma tem a intenção de estabelecer metas para os projetos de sistemas elétricos com cargas lineares e não lineares. A interface entre as fontes e as cargas é descrita como ponto de acoplamento comum (*point of common coupling* - PCC) e o documento define a qualidade de energia que deve ser fornecida no ponto de acoplamento comum.

Os limites estabelecidos nesta norma são para operação em regime permanente e são recomendados para condições de “pior caso”. Condições em regimes transitórios podem exceder os limites estabelecidos pela norma.

A filosofia desta norma fundamenta-se em que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim, o que é refletido para o exterior, ou seja, para os demais consumidores conectados à mesma rede de alimentação.

Os limites de harmônicas na norma são baseados na relação entre a fundamental da corrente de carga e a corrente de curto circuito no ponto de acoplamento comum. Esses limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de corrente de curto circuito, sendo que, quanto maior a corrente de curto circuito em relação à corrente de carga, maiores serão os limites.

A Tabela 8 apresenta os limites de correntes para sistemas de distribuição com tensão entre 120V e 69kV

Tabela 8 – Máximo Limite para Harmônicas Ímpares em Sistema de Distribuição de 120V até 69kV

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	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%

Fonte: IEEE 519, 1992

A Tabela 9 apresenta os limites de correntes para sistemas de distribuição com tensão entre 69,001kV e 161kV

Tabela 9 – Máximo Limite para Harmônicas Ímpares em Sistema de Distribuição de 69,001kV até 161kV

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TDD
<20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50-100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100-1000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
>1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%

Fonte: IEEE 519, 1992

A Tabela 10 apresenta os limites de correntes para sistemas de distribuição de alta tensão (maiores do que 161kV) e sistemas de geração e cogeração isolados

Tabela 10 – Máximo Limite para Harmônicas Ímpares em Sistema de Distribuição de alta tensão (maior do que 161kV) e Sistemas de Geração e Cogeração isolados

I_{CC} / I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	THD
<50	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
>50	3,0%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%	3,75%

Fonte: IEEE 519, 1992

As componentes de harmônicas pares são limitadas em 25% dos valores das tabelas 8, 9 e 10.

Os limites de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental são apresentados na Tabela 11. Esses limites são de responsabilidade da concessionária de energia elétrica.

Tabela 11 – Limites Percentuais de Distorção da Tensão de Alimentação em Relação à Fundamental

Tensão no ponto de acoplamento comum	Harmônicas individuais	TDHV
69kV e abaixo	3,0%	5,0%
69,001kV-161kV	1,5%	2,5%
acima de 161kV	1,0%	1,5%

Fonte: IEEE 519, 1992

Um dos pontos mais controversos da norma é o chamado Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que segundo a norma é definido como a interface entre a fonte e as cargas. Embora de conceito simples, a identificação desse ponto às vezes pode ser confusa. A Figura 30 mostra um exemplo de um típico sistema de distribuição.

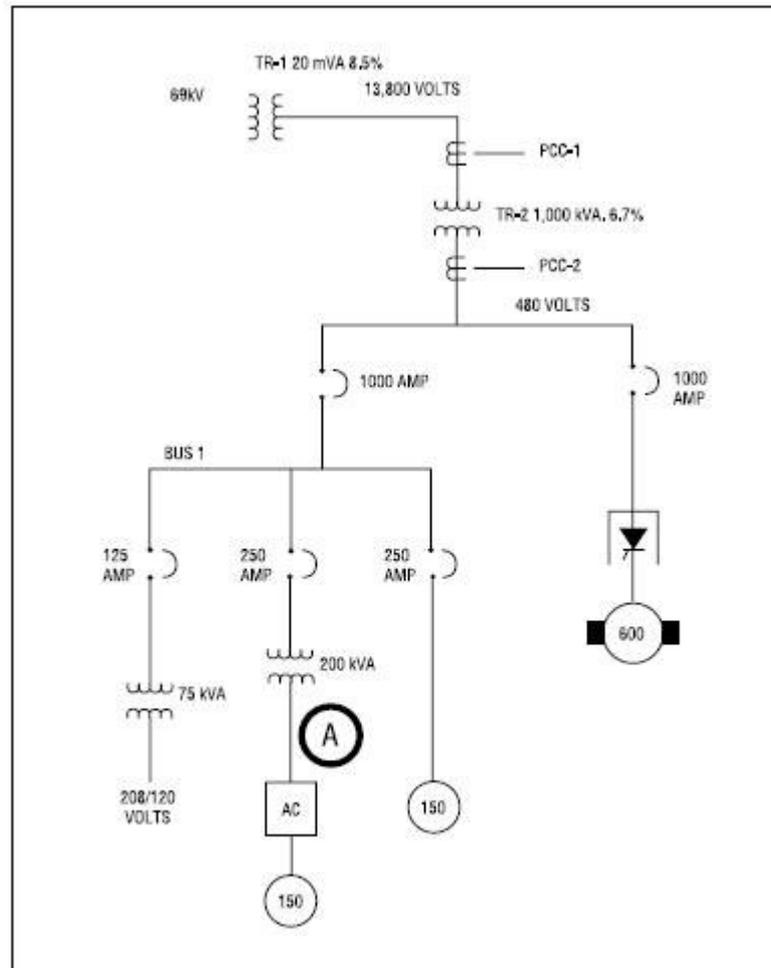


Figura 30 – Exemplo de sistema de distribuição

Na Figura 30, a concessionária distribui energia a uma tensão de 69kV, que é reduzida para uma tensão de 13,8 kV por um transformador de 20MVA com 8,5% de impedância interna, quando então é entregue ao cliente. Dessa linha o cliente utiliza um transformador de 1MVA com impedância interna de 6,7%, para reduzir a tensão para 480V que alimenta todos os equipamentos. Em alguns casos, esse transformador é de propriedade do cliente.

De acordo com os níveis de tensão deste exemplo, a tabela a ser utilizada é a Tabela 8, porém os valores de limites de harmônicas dependem de onde é considerado o ponto de acoplamento comum (se a concessionária de distribuição medir o consumo na

linha de 13,8kV o ponto será o PCC1, enquanto que se a medição for após o transformador, na linha de 480V, o ponto será o PCC2). Esta diferença pode ser percebida nos cálculos abaixo, onde a relação I_{CC} / I_L para o PCC1 (283) é muito maior do que para o PCC2 (16,9).

PCC1:

$$I_L = 1000 \times \frac{480}{13800} = 34,8A \quad (12)$$

$$I_b = \frac{20}{\sqrt{3} \times 13800} \times 10^6 = 838A \quad (13)$$

$$I_{Lpu} = 0,0415 pu \quad (14)$$

$$I_{CC} = \frac{1}{0,085} = 11,76 pu \quad (15)$$

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = 283 \quad (16)$$

PCC2:

$$I_L = 1000A \quad (17)$$

$$I_b = \frac{20}{\sqrt{3} \times 480} \times 10^6 = 1204A \quad (18)$$

$$I_{Lpu} = 0,83 pu \quad (19)$$

$$I_{CC} = \frac{1}{0,00425 + 0,067} = 14,0 pu \quad (20)$$

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = 16,9 \quad (21)$$

Assim, caso a medição da concessionária fosse no PCC1, a instalação atenderia aos requisitos da norma sem maiores problemas, enquanto que caso fosse no PCC2, seria necessário utilizar técnicas para mitigação de harmônicas, como as apresentadas no capítulo anterior.

Geralmente a concessionária é quem determina o ponto de acoplamento comum, porém os engenheiros dos clientes devem estar atentos para o efeito desta decisão para atender a norma sem a necessidade de despesas excessivas para a indústria.

CAPITULO V

V. Conclusões

O objetivo deste trabalho é explicitar os conceitos de qualidade de energia, mostrando a sua importância para os consumidores. Foi possível perceber que os prejuízos causados por uma má qualidade de energia, em muitos casos podem ser muito maiores do que o custo das respectivas soluções.

Também foi apresentado o comportamento dos distúrbios harmônicos, identificando as causas e consequências, assim como os métodos para mitigação.

Através da análise das normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519, foi possível perceber as diferentes formas de abordagem entre as respectivas normas. Enquanto que na norma IEC 61000-3-2 os limites são estabelecidos para cada equipamento de forma a limitar a introdução de corrente harmônica, na norma IEEE 519 o interesse é na quantidade de harmônicas fornecidas à rede no ponto de acoplamento comum, isto é, não importa a quantidade de componentes harmônicas que circulam dentro da instalação. Do ponto de vista do sistema de distribuição de energia, a norma da IEEE é mais completa e poderia servir como modelo para uma norma nacional a respeito desse assunto.

Desse modo, um estudo dirigido sobre uma elaboração de norma nacional para tratamento de distúrbios harmônicos poderia ser uma ótima proposta para trabalhos futuros nesta área de pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Moreno, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, efeitos e soluções.** Procobre, 2001
- [2] Chapman, David. **Power Quality and Application Guide.** Cooper Development Association, 2001
- [3] IEC 61000-3-2, 2005
- [4] IEEE 519, 1992
- [5] www.trifolio.com.br/img/downloads/novos/Nocoesbasicassobredistorcoesharmonicas.pdf
30/08/2007 17:00
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/International_Electrotechnical_Commission
25/09/2007 15:00
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ieee>
25/09/2007 16:00
- [8] <http://www.dee.feis.unesp.br/qualienergi/dados/bican.pdf>
25/09/2007 22:00
- [9] <http://www.transcoil.com/meetieee.pdf>
25/09/2007 22:30