

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

MÁRCIO MOURA DE MATTOS

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

ESTUDO DO FATOR K EM TRANSFORMADORES A SECO

Porto Alegre

2011

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

ESTUDO DO FATOR K EM TRANSFORMADORES A SECO

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

ORIENTADOR: Roberto Homrich

Porto Alegre

2011

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

MÁRCIO MOURA DE MATTOS

ESTUDO DO FATOR K EM TRANSFORMADORES A SECO

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

Orientador: _____

Prof. Roberto Homerich, UFRGS

Doutor pela UNICAMP - Campinas, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr Roberto Homrich, UFRGS
Doutor pela UNICAMP - Campinas, Brasil

Eng Felipe de Souza Patrício, SIEMENS
Engenheiro Eletricista pela PUCRS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS
Doutor pela Universidade de Cardiff – Cardiff, País de Gales

Porto Alegre, dezembro de 2011.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai “Marco Antônio Carvalho de Mattos” meu primeiro e grande professor.

A minha querida mãe “Gislaine Ivanise Moura de Mattos” pelo carinho e exemplo a ser seguido.

A minha querida namorada Lia K. Feller, pela enorme paciência, estímulo e imensurável compreensão, além do amor incondicional.

A toda minha família que me ajudou a suportar todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais “Marco e Gija” por me estimularem a estudar sempre, e que serão sempre meus maiores exemplos.

As minhas irmãs “Vavá e Vivi” por me suportarem mesmo quando eu não me suportava.

A minha namorada presente em todas as etapas da faculdade, me apoiando, suportando e amando sempre.

Ao “Chuleta e a Val” que me apoiaram e me receberam como um filho quando me mudei para a capital.

Ao meu sogro “Gordo” e a minha sogra “Tia Ju” que me receberam de braços abertos em sua família me deram muita força em todos os momentos.

Aos meus colegas de trabalho que sempre me apoiaram, ajudaram e foram compreensivos.

E é claro a todos os meus amigos que sempre estiveram lá quando eu precisei.

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade apresentar um estudo sobre harmônicas suas causas e suas conseqüências em instalações elétricas. Será realizado um estudo da decomposição dos sinais de energia elétrica através da decomposição da Série de Fourier, a partir da qual serão mostrada e calculada as diferente ordens das harmônicas. Será dada ênfase nas conseqüências dessas em transformadores a seco. Onde será calculado o Fator K em seus dois modos, o modo da UL e o modo que é assumido por muito autores como sendo o Fator K normalizado. Esse estudo está diretamente relacionado com a temperatura de funcionamento do transformador e sua vida útil. Para exemplificar o estudo será mostrada a constituição do transformador a seco fabricado pela empresa SIEMENS, que recebe o nome de GEAFOL.

Palavras-chaves: Harmônicas, Série de Fourier, transformadores a seco, SIEMENS, GEAFOL.

ABSTRACT

This paper aims at presenting a study on harmonics and its causes and consequences on electrical installations. It is a study about the decomposition of electric energy signals through the decomposition of Fourier series and based on this, the different orders of harmonics are shown and calculated. It is given an emphasis on the consequences of the harmonics in dry-type transformers where it is calculated the K Factor in its two modes, the UL one and the other considered as normalized by many authors from this area. This study is directly related to the working temperature of the transformer and its service life span. In order to exemplify this study, it is shown the constitution of the dry-type transformer developed by Siemens, which is named GEAFOLE.

Keywords: Harmonics, Fourier Series, dry type of transformer, SIEMENS, GEAFOLE

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	10
ÍNDICE DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. HARMÔNICAS	13
2.1 INTRODUÇÃO	13
2.2 SÉRIE DE FOURIER	15
2.2.1 Cálculo da série de Fourier	15
2.3 CÁLCULO DAS HARMÔNICAS	18
2.4 SEQUÊNCIA DAS HARMÔNICAS	18
2.4.1 Demonstração matemática das seqüências das harmônicas	20
3. TRANSFORMADORES.....	22
3.1 TRANSFORMADORES A SECO	24
3.1.1 Resina Epóxi como isolante	26
3.1.2 Transformadores a Seco SIEMENS GEAFOL®	28
4. EFEITOS DAS HARMÔNICAS EM TRANSFORMADORES A SECO.....	32
4.1 SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DEFORMAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO SECUNDÁRIA	33
4.2 RESSONÂNCIA ELÉTRICA	34
4.2.1 Ressonância em Paralelo.....	34
4.2.2 Ressonância em Série.....	38
4.3 – EFEITO DE HARMÔNICOS NO RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR ...	42
5. FATOR K	42
5.1 HISTÓRICO DA C57.110	43
5.2 PERDAS EM TRANSFORMADORES A SECO.....	44
5.3 PERDAS EM TRANSFORMADORES A SECO DEVIDO AOS EFEITOS DE CARGAS NÃO LINEARES	45
5.3.1 Perdas Devido as Harmônicas nas Perdas Ôhmicas	46
5.3.2 Perdas Devido as Harmônicas nas Perdas por Correntes Parasitas ou Correntes de Foucault	46
5.3.3 Perdas Devido as Harmônicas nas Perdas Adicionais	46
5.3.4 Componente CC da Corrente na Carga	47
5.4 PERDAS EM TRANSFORMADORES NA BASE PU	47
5.5 PERDAS EM TRANSFORMADORES NAS CORRENTES DA CARGA	49
5.6 FATOR DAS PERDAS HARMÔNICAS PARA CORRENTES PARASITAS	49
5.7 FATOR K NA UL.....	51
5.7.1 Histórico do Fator K.....	51
5.7.2 Definição do Fator K.....	51
5.8 RELAÇÃO ENTRE O FATOR K E A NORMA C57.110	54
6. ESTIMATIVA DE VIDA DE UM TRANSFORMADOR A SECO	55
6.1 REDUÇÃO DA VIDA ÚTIL EM FUNÇÃO DE UM AUMENTO DE TEMPERATURA	57

7. PRINCIPAIS FONTES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	59
7.1 FONTES DE ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICAS (FONTES CHAVEADAS).....	60
7.2 CONVERSORES TRIFÁSICOS	62
7.3 EQUIPAMENTOS A ARCO.....	63
7.4 FORNOS A ARCO	64
7.5 LÂMPADAS DE DESCARGAS	65
7.6 EQUIPAMENTOS DE SOLDA A ARCO	65
8 DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADORES ADEQUADOS A CARGAS NÃO LINEARES	66
8.1 ADAPTAÇÃO DO NÚCLEO	67
8.2 ADAPTAÇÃO DO NEUTRO	67
8.3 ADAPTAÇÃO DAS BLINDAGENS ELETROSTÁTICAS	67
8.4 ADAPTAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE	68
8.5 ADAPTAÇÃO NOS ENROLAMENTOS.....	68
8.6 MUDANÇAS ESTRUTURAIS	69
CONCLUSÃO.....	71
REFERÊNCIAS	732

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Espectro das harmônicas	14
Figura 2- Efeito das harmônicas em equipamentos elétricos	14
Figura 3 - Ordem, frequência e seqüência	19
Figura 4 - A corrente no neutro é de terceira ordem com amplitude três vezes maior do que a corrente de terceira ordem de cada uma das fases	20
Figura 5 - Corrente nas três fases, com suas deformações.....	20
Figura 6 - Elevações de temperatura máxima de acordo com a classe de isolamento.	28
Figura 7 - Transformador GEAFOL®	29
Figura 8 - Enrolamentos do GEAFOL em destaque.	30
Figura 9 - Comparação das tensões de saída para tipo de constituição	30
Figura 10 - Representação de uma descarga parcial.	31
Figura 11 - Evolução do nível de potência e tensão dos transformadores nos últimos anos.....	32
Figura 12 - Esquema de ligação do circuito com ressonância em paralelo	36
Figura 13 - Circuito com a inserção da resistência em série do indutor	36
Figura 14 - Diagrama fasorial das corrente em ressonância em paralelo.....	37
Figura 15 - Ressonante paralelo com carga conectada ao sistema	38
Figura 16 - Circuito ressonante série.....	39
Figura 17 - Circuito ressonante série.....	39
Figura 18 - Esquema de ligação ressonância em série exemplificada com um transformador.....	40
Figura 19 - Diagrama fasorial da ligação ressonância série	41
Figura 20 - Frequencia ressonante em circuitos com ressonância em série e em paralelo	41
Figura 21 - Diagrama de blocos mostrando o mecanismo de regulação de tensão de uma fonte chaveada	60
Figura 22 - Circuito típico de uma fonte de alimentação monofásica	61
Figura 23 - Esquemático de uma Ponte de Graetz.....	62
Figura 24 - Esquemático de um típico variador de velocidade	63
Figura 25 - Corrente absorvida e espectro harmônico para uma máquina de soldar típica.	66
Figura 26 - Transformador com Fator $K = 1$	70
Figura 27 - Transformador GEAFOL com Fator $K = 4$	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes harmônicas nas três correntes.....	21
Tabela 2 - Comparativo transformadores a seco e a óleo.....	25
Tabela 3 - Classes de Isolamento.	27

1. INTRODUÇÃO

A atual utilização de equipamentos baseados na eletrônica de potência como meio para a eficiência energética de uma instalação elétrica, pode incorrer no surgimento de distorções harmônicas que, quando ocorrem em níveis elevados, podem vir a provocar efeitos instantâneos e gerar, com o decorrer do tempo, problemas cumulativos e indesejados.

Efeitos instantâneos podem se manifestar através de algumas ocorrências em sistemas de telecomunicações, operação inadequada de equipamentos de comando e controle, falhas ou operações indevidas de relés e/ou equipamentos de proteção em função de alterações nos valores das correntes, erros em medições elétricas e outros vários tipos de problemas.

A presença de correntes com formas de ondas deformadas através do uso de cargas não lineares vem aumentando significativamente e de forma preocupante, principalmente sob o ponto de vista da concessionária de energia elétrica, pois em suas redes circulam correntes originadas dos mais diversos tipos de fontes harmônicas (tipos de cargas). O aumento do fluxo destas correntes advém da disseminação industrial, cada vez maior dos equipamentos estáticos, cargas comprovadamente geradoras de harmônicos, cujas influências na rede de distribuição se mostram danosas à concessionária e aos outros consumidores.

Da mesma forma, e como fato agravante, vem crescendo também o surgimento de cargas sensíveis a tais anomalias, as quais necessitam de elevada qualidade no fornecimento de energia elétrica, tais como sistemas eletrônicos de controles industriais, CPD's e microcomputadores, tornos de controle numérico, televisores, etc.

Estes dois pontos crescentes de demanda, de um lado as cargas geradoras de harmônicos, e de outro as cargas sensíveis aos harmônicos, são as peças fundamentais para a necessidade da criação de uma normalização técnica adequada.

Efeitos cumulativos manifestam-se, via de regra, sob a forma de sobre-elevações de temperatura, podendo gerar a redução de vida útil ou a queima prematura de equipamentos, entre as quais se pode incluir em casos extremos, transformadores de potência e motores elétricos. Além disso, podem ocorrer totalizações incorretas de grandezas elétricas monitoradas continuamente por sistemas de gerenciamento energético em tempo real.

Para evitar esse tipo de acontecimento é preciso dimensionar os transformadores para assim, suportar as correntes harmônicas. Esse tipo de análise é feita através do cálculo do Fator K e das perdas devidas a harmônicas. Antes de avaliar o Fator K que nomeia essa dissertação, é válido realizar uma análise acerca do que são e o que representam as harmônicas. Esse tópico será abordado no próximo capítulo.

2. HARMÔNICAS

2.1 INTRODUÇÃO

O termo “harmônicas” origina-se da física, mais especificamente do estudo dos movimentos ondulatórios, podendo ser definido como um componente senoidal do período da onda, ou ainda uma quantidade de frequência, derivadas da multiplicação de frequência fundamental. Referências citam como sendo fontes de energia limpa ou pura, aquelas fontes que não possuem nenhuma harmônica, contudo, tais fontes só podem ser reproduzidas em laboratórios.¹

Quando uma partícula ou uma onda se propaga oscilando periodicamente em torno de uma posição de equilíbrio, pode ser traduzido matematicamente por funções senoidais ou cossenoidais, denominando-se “movimento harmônico”.³

Tecnicamente uma harmônica é uma componente de onda periódica, na qual a frequência é definida como uma multiplicação da dita frequência fundamental. A rede elétrica brasileira apresenta frequência de 60 Hz, logo, a 3^a harmônica tem por frequência 180 Hz (3x60 Hz), a 5^a harmônica (5x60 Hz) e a 7^a harmônica (7x60 Hz). Isso pode ser visualizado com mais facilidade através da Figura 1.²

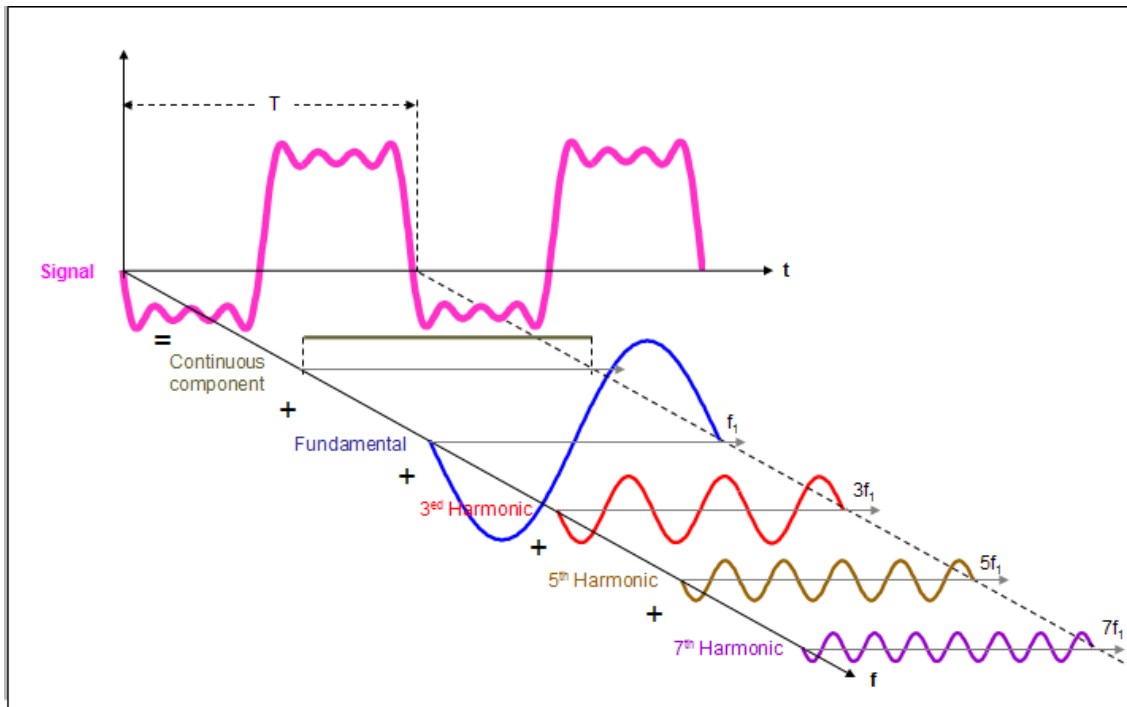


Figura 1 - Espectro das harmônicas

Fonte: *Harmonics in Power Systems, 2009*²²

Através da Figura 2, pode-se entender os efeitos das harmônicas em instalações elétricas, onde é ilustrado com exemplos o que pode ocorrer com equipamentos em prazos curtos e longos.

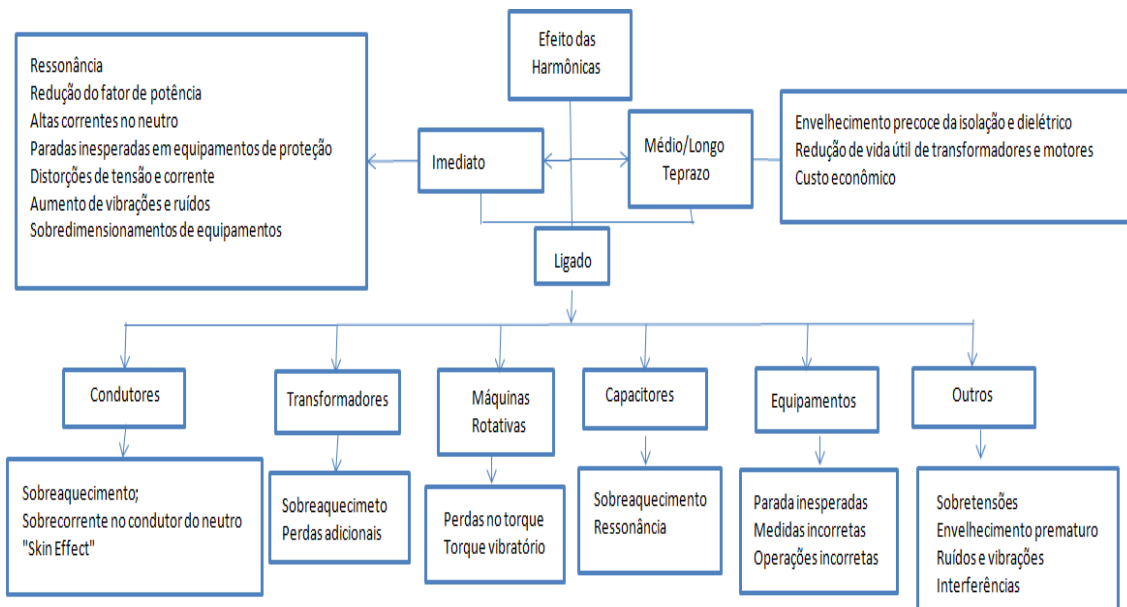


Figura 2- Efeito das harmônicas em equipamentos elétricos

Fonte: *Harmonics in Power Systems, 2009*²²

Nos próximos tópicos, os conceitos sobre harmônicos serão descritos mais claramente, embasados em fórmulas e definições matemáticas por meio da Série de Fourier.

2.2 SÉRIE DE FOURIER

Antes de aprofundar-se na discussão sobre o efeito das harmônicas em instalações elétricas, é preciso primeiramente, levar em consideração alguns conceitos teóricos acerca da “Série de Fourier”. Por meio desta teoria, permite-se analisar formas ondas periódicas distorcidas através de um somatório de ondas mais comumente usadas, de fácil compreensão.

Em 1822 o matemático francês Jean Babtiste Joseph Fourier (1768 -1830), em seu trabalho “Teoria Analítica do Calor”, descreveu que qualquer função que se repetisse em um determinado intervalo de tempo, poderia ser representada por um somatório de uma senóide fundamental. Nesse somatório, podem ser encontradas as harmônicas, sendo múltiplas da frequência fundamental. ⁴

As ondas harmônicas distorcem as formas de onda de tensão e da corrente, provocando assim, perdas não previstas no sistema, sobreaquecimento do equipamento e em casos mais graves, pode levar a perda total do mesmo. O resultado disso pode ser demonstrado através do cálculo da Série de Fourier, que estabelece uma relação entre o domínio tempo e o domínio da frequência. ²

2.2.1 Cálculo da Série de Fourier

Com intuito de analisar os sinais complexos que há em diferentes frequências presentes nas fontes de energia, um número de métodos matemáticos foi desenvolvido. O mais popular é o chamado Transformada de Fourier.

A Série de Fourier permite que uma função não senoidal periódica, possa ser representada pela soma de uma componente contínua e uma série de funções alternadas senoidais. Então se podem analisar ondas distorcidas de uma forma mais simples, decompondo essas ondas em várias formas já conhecidas. ^{2,5}

Na série de Fourier de uma função tem-se que:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (1)$$

Nessa expressão tem-se que a_0 é o valor médio da função $x(t)$, enquanto que a_n e b_n os coeficientes da série, são as componentes retangulares da enésima harmônica. Expandindo a série sabe-se que:

$$\begin{aligned} = a_0 + a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi 1t}{T}\right) + b_1 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi 1t}{T}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi 2t}{T}\right) + b_2 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi 2t}{T}\right) + \\ a_3 \cdot \cos\left(\frac{2\pi 3t}{T}\right) + b_3 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi 3t}{T}\right) + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Dessa expressão tem-se que o valor a_0 , como comentado anteriormente, é o valor médio da função. Os termos a_1 e b_1 referem-se à componente com frequência fundamental, por conseqüência os coeficientes a_2 e b_2 referem-se à componente que se desenvolve com o dobro da frequência da componente fundamental.

Para determinar o valor de a_0 , a_n e b_n é necessário integrar os dois lados da equação (1), dos limites de $-\frac{T}{2}$ até $\frac{T}{2}$, sobre o período de T, assim tem-se que:

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \right] dt, \quad (3)$$

Dessa expressão, pode-se então, isolar a_0 , a_n e b_n e assim calculá-los separadamente, através das expressões:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \quad (4)$$

Para se calcular o outro coeficiente a_n é necessário multiplicar a equação (4) por $\cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)$, onde “n” é fixado como um valor positivo, e a expressão será integrada de -

$\frac{T}{2}$ até $\frac{T}{2}$. Com algumas simplificações matemáticas se é capaz de chegar à expressão descrita abaixo:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \text{ para } n=1 \text{ até } \infty \quad (5)$$

Para obter a expressão que representa o termo b_n multiplica-se a expressão por $\text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)$, usando um argumento semelhante ao usado anteriormente. Mais uma vez é descrita, com simplificações matemáticas, a expressão:

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt, \text{ para } n=1 \text{ até } \infty \quad (6)$$

Essas expressões são mais comumente expressadas na forma de frequência angular, podendo analisar essas expressões na forma:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t) \quad (7)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (8)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \text{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (9)$$

Essas fórmulas foram demonstradas e descritas por ARRIGALA *et al*, 1985 e MORENO, 2001.

Depois de descrito como calcular as harmônicas, é possível analisar alguns pontos importantes sobre elas, como por exemplo, o cálculo de harmônicas pares, que freqüentemente não são levadas em consideração. Como citado anteriormente, pela Série de Fourier é possível demonstrar matematicamente que, para todo o sinal que possua uma simetria de meio período, suas componentes pares irão por conseqüência se anular, ou seja, os termos a_n e b_n da Série de Fourier se anularão. Caso isso não se comprove na prática, pode-se ter um desajuste em alguma parte do sistema de geração ou retificação^{2,5}

2.3 CÁLCULO DAS HARMÔNICAS

As harmônicas sobrepõem-se a si mesmas e na onda fundamental, distorcendo e alterando a magnitude da onda de frequência principal. Por vezes quando uma fonte de tensão senoidal é aplicada em uma carga não linear, seja conectada por uma ligação com 3 fios ou seja com uma ligação em um circuito com 4 fios, a carga por si mesma irá drenar a corrente da frequência fundamental e também as outras frequências, desde a 3ª até as mais altas, as quais são geradas por cargas não-lineares.^{6,7}

Não é incomum que sistemas industriais de potência tenham de 15% a 25% de DHT (Distorção Harmônica Total). Nas especificações publicadas pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), a distorção harmônica total da tensão ou da corrente pode ser compreendida como uma porcentagem dos componentes fundamentais, tanto da tensão como da corrente. Essas relações são expressas pelas fórmulas, representando a distorção da tensão e da corrente respectivamente.

$$DHT_v(\%) = \frac{V_H}{V_1} \times 100\% = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h=\infty} (V_h^2)}{V_1^2}} \times 100\% \quad (10)$$

$$DHT_I(\%) = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h=\infty} I_h^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (11)$$

Para garantir efeitos mais verossímeis desse resultado, é interessante restringir o limite superior do somatório em 25, a não ser que seja necessário levar em consideração as frequências maiores, por exemplo, quando são utilizados tiristores nos circuitos.⁸

2.4 SEQÜÊNCIA DAS HARMÔNICAS

A seqüência das harmônicas pode ser classificada de três maneiras: positiva, negativa e nula. Para melhor exemplificar essa situação, será usado o exemplo de um motor representando suas conseqüências. As ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral e as pares quando há assimetrias do sinal, devido à presença de componente contínua.⁹ Isto pode ser melhor compreendido na Figura 3.

Ordem	Frequência (Hz)	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n \cdot 60$	—

Figura 3 - Ordem, frequência e seqüência

Fonte: *Harmônicas nas instalações elétricas*³

Nas harmônicas de seqüência positiva, o motor tenderia a girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos. Isso poderia levar a um aumento de temperatura, que por sua vez acabaria propiciando danos no equipamento, reduzindo sua vida útil. Essas harmônicas de seqüência positiva provocam, geralmente, aquecimento indesejado em condutores, motores e em transformadores tanto a seco como a óleo.^{1,2}

As harmônicas de seqüência negativa, por outro lado, fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela frequência fundamental, freando assim, o motor e, também, causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de seqüência nula, zero ou até mesmo homopolares, não provocariam efeitos no sentido de rotação do motor, contudo pode haver frenagem em alguns casos. Elas no entanto somar-se-iam algebricamente no condutor do neutro. Isso seria capaz de levar a situações em que, pelo condutor neutro circularia uma corrente de terceira ordem, a qual é três vezes maior do que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase.^{1,9}

Com esses tipos de situações podem ocorrer aquecimentos excessivos do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores, entre outros sérios problemas, como demonstrado na Figura 4.

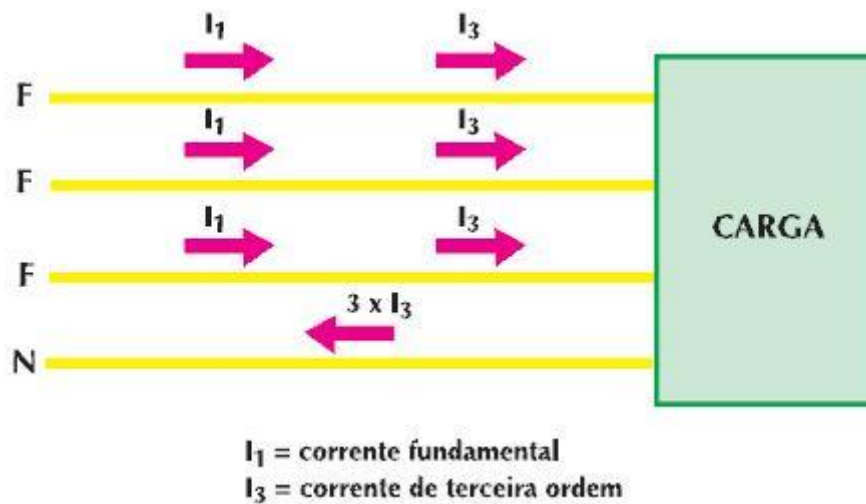


Figura 4 - A corrente no neutro é de terceira ordem com amplitude três vezes maior do que a corrente de terceira ordem de cada uma das fases

Fonte: *Harmônicas nas instalações elétricas*³

2.4.1 Demonstração matemática das seqüências das harmônicas

Será retratado no momento, o sentido das componentes harmônicas para suas diversas ordens. Para isso, será considerado um sistema elétrico trifásico simétrico e balanceado, ou seja, tensões e correntes com módulos idênticos, no sentido positivo, com defasamento de 120° entre fases e forma de onda de corrente com certo grau de deformação. Esta configuração é ilustrada na Figura 5.

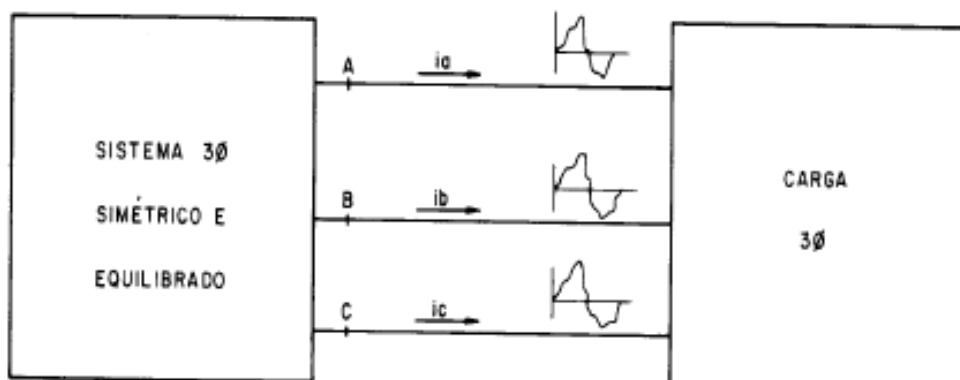


Figura 5 - Corrente nas três fases, com suas deformações

Fonte: *Harmônicas nas instalações elétricas*⁹

As correntes i_a , i_b e i_c são hipoteticamente deformadas e não perfeitamente senoidais. Nestas condições, resultarão genericamente para as três fases, as seguintes expressões de corrente:

$$I_a(t) = I_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + I_4 \cdot \text{sen}(4\omega t + \varphi_4) + I_5 \cdot \text{sen}(5\omega t + \varphi_5) + I_6 \cdot \text{sen}(6\omega t + \varphi_6) + I_7 \cdot \text{sen}(7\omega t + \varphi_7) + \dots$$

$$I_b(t) = I_1 \cdot \text{sen}(\omega t - 120 + \varphi_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t + 120 + \varphi_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + I_4 \cdot \text{sen}(4\omega t - 120 + \varphi_4) + I_5 \cdot \text{sen}(5\omega t + 120 + \varphi_5) + I_6 \cdot \text{sen}(6\omega t + \varphi_6) + I_7 \cdot \text{sen}(7\omega t - 120 + \varphi_7) + \dots$$

$$I_c(t) = I_1 \cdot \text{sen}(\omega t + 120 + \varphi_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t - 120 + \varphi_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) + I_4 \cdot \text{sen}(4\omega t + 120 + \varphi_4) + I_5 \cdot \text{sen}(5\omega t - 120 + \varphi_5) + I_6 \cdot \text{sen}(6\omega t + \varphi_6) + I_7 \cdot \text{sen}(7\omega t + 120 + \varphi_7) + \dots \quad (12)$$

É possível ter uma melhor interpretação das componentes harmônicas nas três correntes, por meio de valores realocados na Tabela 1.

Tabela 1 - Componentes harmônicas nas três correntes

Ordem	Correntes		
	Fase A	Fase B	Fase C
1 ^a	$I_1 \text{ sen } (\omega t + \varphi_1)$	$I_1 = \text{sen } (\omega t - 120 + \varphi_1)$	$I_1 = \text{sen } (\omega t + 120 + \varphi_1)$
2 ^a -	$I_2 \text{ sen } (2\omega t + \varphi_2)$	$I_2 = \text{sen } (2\omega t + 120 + \varphi_2)$	$I_2 = \text{sen } (2\omega t - 120 + \varphi_2)$
3 ^a 0	$I_3 \text{ sen } (3\omega t + \varphi_3)$	$I_3 = \text{sen } (3\omega t + \varphi_3)$	$I_3 = \text{sen } (3\omega t + \varphi_3)$
4 ^a +	$I_4 \text{ sen } (4\omega t + \varphi_4)$	$I_4 = \text{sen } (4\omega t - 120 + \varphi_4)$	$I_4 = \text{sen } (4\omega t + 120 + \varphi_4)$
5 ^a -	$I_5 \text{ sen } (5\omega t + \varphi_5)$	$I_5 = \text{sen } (5\omega t + 120 + \varphi_5)$	$I_5 = \text{sen } (5\omega t - 120 + \varphi_5)$
6 ^a 0	$I_6 \text{ sen } (6\omega t + \varphi_6)$	$I_6 = \text{sen } (6\omega t + \varphi_6)$	$I_6 = \text{sen } (6\omega t + \varphi_6)$
7 ^a +	$I_7 \text{ sen } (7\omega t + \varphi_7)$	$I_7 = \text{sen } (7\omega t - 120 + \varphi_7)$	$I_7 = \text{sen } (7\omega t + 120 + \varphi_7)$

Desta forma, como foi definido nas expressões anteriores, os componentes fundamentais são de seqüência positiva, observando claramente que as harmônicas de

ordem 4,7,10,... subtraem 120 graus de seus argumentos, caracterizando-as como harmônicas de seqüência positiva. As componentes de ordem 2,5,8... somam 120 graus a seus argumentos, caracterizando-as como harmônicas de seqüência negativa. Já as harmônicas de ordem 3,6,9,..., múltiplas de três, estão totalmente em fase com a freqüência fundamental, caracterizando-as como harmônicas de seqüência zero. Pode-se resumir da seguinte maneira. ⁹

Seqüência positiva: $3k + 1$

Seqüência negativa: $3k - 1$

Seqüência zero: $3k$

Resumidamente, tem-se que toda forma de onda que apresente simetria em relação ao eixo x (abscissa), terá em sua composição, componentes harmônicos pares, ou seja, matematicamente, uma dada função periódica no domínio do tempo $g(t)$, se $g(t) = g(-t)$ haverá então, componentes pares. Atrelado às formas de onda com conteúdo de harmônicas pares, está à existência da componente contínua da onda. ^{1,9}

Esse conceito da componente de seqüência simétrica em correntes e tensões harmônicas é fundamental para a quantificação dos seus efeitos, em toda e qualquer carga girante ou ainda naquelas que tem como princípio de funcionamento de campos magnéticos induzidos. ⁹

3. TRANSFORMADORES

O transformador é um equipamento de operação estática que, por meio de indução eletromagnética transfere energia de um circuito, chamado primário, para um ou mais circuitos denominados, respectivamente, secundário e terciário, sendo, no entanto mantida a mesma freqüência, porém com tensões e correntes diferentes. ^{11,16}

A ANSI / IEEE define um transformador como um dispositivo de eletricidade estática, utilizado em sistemas de energia elétrica para transferência de energia entre circuitos através do uso de indução eletromagnética. Transformador de potência é o termo empregado para referir-se aos transformadores utilizados entre o gerador e os circuitos de distribuição, estes são geralmente avaliados em 500 kVA ou mais.

Sistemas de energia consistem, tipicamente, de um grande número de locais de geração, pontos de distribuição e interligações dentro do sistema ou com sistemas nas proximidades. A complexidade do sistema leva a uma variedade de tensões de transmissão e distribuição. Transformadores de potência devem ser utilizados em cada um desses pontos, onde há uma transição entre níveis de tensão.¹⁰

O conhecimento da teoria, os fundamentos do projeto e o desempenho dos transformadores são essenciais para a compreensão da operação dos sistemas de potência, de controle e de muitos sistemas eletrônicos. Entretanto, todos os transformadores envolvidos nesses sistemas operam, fundamentalmente, da mesma forma, servindo como veículo para a compreensão dos princípios eletromagnéticos básicos. Como importante componente dos sistemas elétricos, o transformador exige atenção e sério estudo.¹¹

Podendo servir para uma diversidade de propósitos, é possível dividir seu estudo de muitas maneiras distintas, principalmente se forem observadas suas variadas funções básicas. Pode-se resumir, sucintamente, em três importantes funções:¹¹

1. Mudança de níveis de tensão e de corrente em um sistema elétrico, sem alterar a frequência da onda fundamental;
2. Casamento de impedâncias em estágio de sistema de sonorização, de áudiofrequência ou de radiofrequência;
3. Isolação elétrica de dois ou mais estágios em planta elétrica de centro de avaliação médica, equipamentos de laboratório de pesquisa, transmissão e geração de sinais, centro de processamento de dados, computação, eletrônica etc.¹¹

A primeira das três funções é, provavelmente, a mais evidenciada em face da presença constante das redes de distribuição de energia, dos ramais de fornecimento, das redes de transmissão e das usinas geradoras de energia elétrica. Já a segunda função, é encontrada em muitos circuitos de radiocomunicações e a terceira, em circuitos cuja primacial finalidade é eliminar interferências eletromagnéticas.^{10, 11}

Qualquer que seja a finalidade do transformador, os princípios básicos de funcionamento não se alteram, ainda que a ênfase de suas características funcionais possa diferenciar-se. Resumidamente, o transformador é um equipamento auxiliar de ação indireta, cujo funcionamento depende da existência de circuitos magnéticos mutuamente acoplados.¹¹

Por atuação magnética mútua, comumente chamada de indução mútua, o transformador transfere energia elétrica de um sistema em corrente alternada a uma determinada tensão e determinada corrente, sem alterar a frequência da onda fundamental. Em princípio um transformador elementar pode consistir em um núcleo magnético, o qual porta dois enrolamentos isolados eletricamente entre si e isolados eletricamente do núcleo. O enrolamento conectado à fonte de energia elétrica denomina-se primário e o enrolamento eletricamente conectado à carga, secundário. ¹¹

No Brasil, as tensões nominais, aplicadas aos sistemas de distribuição secundária das concessionárias de energia elétrica, variam em função da região. No nordeste, por exemplo, a tensão padronizada é de 380V entre fases e 220V entre fase neutro. ¹⁶

Com o avanço da tecnologia em transformadores de potência, conseguiu-se excluir a necessidade do óleo isolante, criando-se assim os transformadores a seco, os quais serão melhores explicados a seguir.

3.1 TRANSFORMADORES A SECO

Os primeiros transformadores tipo a seco surgiram por volta de 1880. O transformador a seco com classe de isolamento B foi introduzido em 1930, satisfazendo a exigência para transformadores em recinto fechado e resistente ao fogo. Durante a segunda guerra mundial materiais siliconados, foram desenvolvidos para satisfazer operações com as mesmas temperaturas, mais altas que aquelas permitidas para a classe de isolamento B. ¹⁰

Por volta de 1950 isolantes com isolamento H, a qual consiste de materiais inorgânicos, como porcelana, mica e amianto unido ou saturado através de resinas de silicone, foram usados pelas primeiras vezes. Como se pode perceber, o conceito de transformadores a seco já estava difundido há muito tempo atrás. Contudo, foi na década de 90 que esse tipo de transformador ganhou espaço no mercado. ¹⁰

Transformador a seco é aquele em que seus enrolamentos são montados em um sistema com gás ou em componentes a seco. Basicamente, qualquer transformador pode ser construído a seco desde que em suas medidas, mais especificamente a tensão e a potência, possam ser designadas sem a acomodação de um óleo isolante ou algum outro meio líquido. ¹¹

Os transformadores a seco são constituídos por núcleo de ferro silício laminado a frio e isolado com material inorgânico, e enrolamento primário e secundário, ou seja, sua estrutura é igual ao de todos os transformadores de distribuição.

Várias percepções de transformadores a seco estão associadas com sua classe e seu design, por virtude do range de medidas e aplicações, comumente associadas com sua forma de construção. Supostamente os seus princípios fundamentais não são diferentes daqueles transformadores mergulhados no óleo. Considerações envolvendo harmônicas são tratadas com mais atenção nesses tipos de transformadores.¹⁰

Transformadores a seco, quando comparados com aqueles imergidos em óleo, são mais leves e não inflamáveis. Com o maior conhecimento acerca dos materiais, de seu comportamento em relação à temperatura e do contínuo desenvolvimento de tecnologias sobre sua capacidade térmica, está sendo possível propiciar maior qualidade e confiabilidade destes equipamentos.^{10,11}

Da mesma forma que os transformadores em líquido isolante, os transformadores a seco tem uma vida útil calculada em função da porcentagem de sobrecarga em que operam durante um determinado período. Se o transformador atua em condições de temperatura menores que sua especificação, a vida útil do transformador deve aumentar. Caso contrário, quando o transformador opera em regime de carga nominal em ambiente de temperatura superior a especificada, sua vida útil tende a diminuir. Para que isso não aconteça deve-se utilizar o transformador com carga inferior a sua carga nominal.

Devido a estas peculiaridades são empregados mais especificamente em instalações onde os perigos de incêndio são iminentes, tais como refinarias de petróleo, indústrias petroquímicas, grandes centros comerciais, em que a norma da concessionária local proíbe o uso de transformadores a óleo mineral, além de outras instalações que requeiram um nível de segurança elevado contra explosões de inflamáveis.¹⁶

Através da Tabela 2, é possível analisar alguns comparativos entre os transformadores a seco, no caso específico do GEAFOL e os transformadores a óleo.

Tabela 2 - Comparativo transformadores a seco e a óleo.

Item	Líquidos isolantes	GEAFOL
1) Área ocupada	100%	50%
2) Economia de cabos BT (instalações próximas ao centro de carga)	Não possível	Sem restrições

3) Obras Civis (portas e paredes corta-fogo, poço de drenagem, etc...)	Conforme normas e requisitos técnicos oficiais	Desnecessário
4) Mobilidade para rearranjo físico do layout das instalações	Restrita devido às obras civis	Sem restrições
5) Instalações em mezanino, lajes, porões	Restrita devido às obras civis	Sem restrições
6) Custos de manutenção	análise de óleo; filtro/termovácuo; vazamentos	Isento de manutenção (apenas limpeza)
7) Armazenagem por longos períodos	Demanda ensaios periódicos no óleo	Sem restrições (inerte a umidade)
8) Segurança	Sujeito a explosões e incêndios	Não explodem, não alimentam incêndios, não emanam gases tóxicos
9) Incremento de potência com VF	25% a 33%	40% a 50%
10) Suportabilidade a sobrecargas e esforços eletromecânicos de curto circuito	Enrolamentos com fios são menos resistentes	Alta resistência, fabricação dos enrolamentos em chapa/fita
11) Posicionamento de terminais AT/BT/N	Restrito à tampa e laterais do tanque	Qualquer posição sem custos
12) Facilidade para reparo em obra	Restrito à parte externa (troca de buchas, gaxetas, etc...)	Permite montagem e/ou desmontagem na obra
13) Aplicação	Basicamente instalações externas e fixas	Sem restrições (pontes rolantes, guinchos, navios, etc...)

3.1.1 Resina Epóxi como isolante

Nesse capítulo será realizada uma análise a respeito dos materiais isolantes utilizados na fabricação de transformadores a seco, em específico a resina Epóxi. Será dado enfoque na relação desse isolante com a temperatura. Os materiais empregados são classificados quanto à temperatura máxima suportada. Esse limite garante o perfeito funcionamento do sistema isolante, mantendo suas características físicas, químicas e elétricas. ^{18,19}

Esse tipo de resina é utilizada em diversos setores, como: ¹⁸

- **Resinas Industriais:** as resinas Epóxi básicas e seus endurecimentos são amplamente utilizados pelo setor de tintas e vernizes.
- **Eletrônica:** apresenta excelentes características de isolamento e encapsulamento, propriedades termoelétricas e termomecânicas, retardantes de chamas e seu forte poder de adesão caracterizam o uso no segmento eletrônico.

- **Elétrica:** possui características de isolação e encapsulamentos excepcionais, além de ser extremamente resistentes a intempéries e a formação de trincas e fissuras.

Por todas essas definições as resinas Epóxi são cada vez mais empregadas na indústria elétrica.

As classes de isolamento utilizadas em transformadores e máquinas elétricas em geral e suas devidas limitações térmicas são estabelecidos pela NBR – 7094, os quais podem ser observados na Tabela 3, apresentando os meios isolantes e seus valores máximos admissíveis. A resina Epóxi se enquadra na classe F da Tabela 3.

Tabela 3 - Classes de Isolamento.

Classe de Isolamento	Tipo de isolante	Temperatura Final [°C] característica
Y*	Materiais fibrosos a base de celulose ou seda não imersos em líquidos isolantes;	90
A*	Materiais fibrosos a base de celulose ou seda não imersos em líquidos isolantes;	105
E*	Fibras orgânicas sintéticas e outros;	120
B	Materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes;	130
F	Materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro aglutinado com materiais sintéticos, usualmente silicones, poliéster ou Epóxi;	155
H	Materiais à base de mica, arbesto ou fibra de vidro aglutinada tipicamente com silicones de alta estabilidade térmica	180
C	Mica, vidro, cerâmica e quartzo sem aglutinante	>180

*Materiais com uso pouco difundido.

Para melhor compreensão da Tabela 3, é possível analisar a Figura 6, a qual apresenta as classes de isolamento com suas respectivas elevações médias de temperatura, além dos acréscimos necessários para avaliação da temperatura no ponto mais quente.

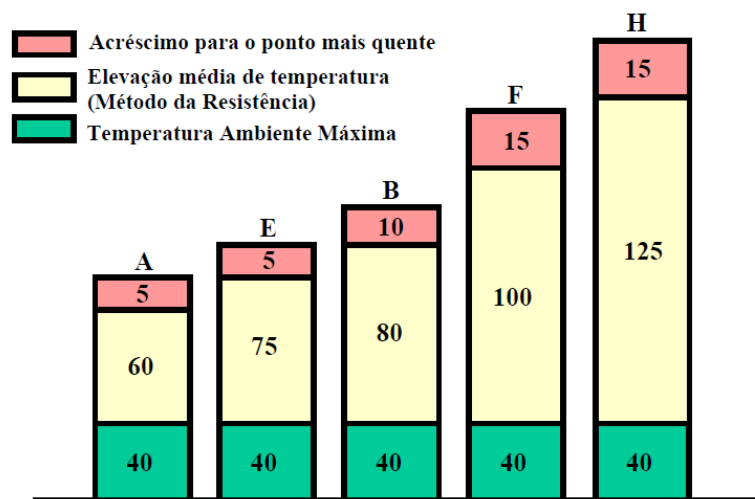


Figura 6 - Elevações de temperatura máxima de acordo com a classe de isolamento.

Fonte: *Thermal considerations in Specifying Dry-Type* ¹⁸

Os valores apresentados na Figura 6 são valores médios e não retratam as temperaturas nos pontos mais quentes presentes no enrolamento. Para estimar o ponto mais quente, as normas sugerem um acréscimo na temperatura de aproximadamente 5° C a 15 °C.¹⁸

Um aumento da temperatura acima do admissível pela isolação pode ocasionar fissuras, amolecimento, carbonização e outras modificações na matéria-prima do material isolante que, por representarem mudanças estruturais, têm como consequência a perda de certas propriedades, entre outras, do poder de isolação.

A experiência mostra que a isolação tem uma longa durabilidade, quando sua temperatura de operação for mantida abaixo do valor limite, que é menor que aquele prejudicial ao isolante, dependendo do tipo de material empregado.

3.1.2 Transformadores a Seco SIEMENS GEAFFOL®

Uma das razões para realização dessa pesquisa é o contato direto do autor com os transformadores produzidos pela empresa SIEMENS. Estes, chamados de GEAFFOL®, podem ser melhor analisados através da Figura 7, onde é destacada cada parte constituinte do transformador. Os transformadores GEAFFOL® são constituídos da mesma maneira que aqueles com líquido isolante, com núcleo de aço silício orientado, o qual recebe uma pintura antioxidante, permitindo que o transformador seja exposto a

qualquer tipo de ambiente (maresia, umidade, etc.) sem sofrer qualquer tipo de avaria. Além de enrolamentos primário e secundário.²¹

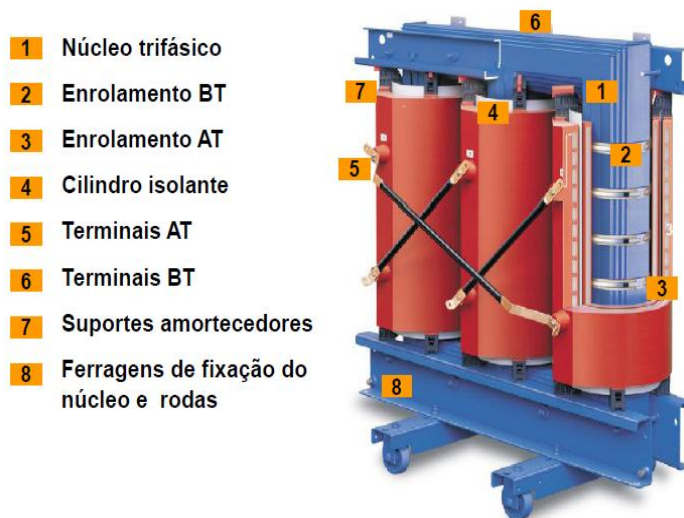


Figura 7 - Transformador GEA FOL®

Fonte: Manual GEA FOL²¹

Os enrolamentos do primário são construídos em fitas de alumínio, formando assim bobinas, que são colocadas no interior de moldes de ferro e, em seguida, encapsuladas em epóxi em ambiente de vácuo e sob temperatura elevada por um tempo determinado, durante o qual são resfriados sob temperatura controlada. A utilização de fitas de alumínio propicia uma construção de enrolamentos mecanicamente resistentes e isentos de absorção de umidade.²¹

Os enrolamentos secundários são constituídos por folhas de alumínio, com altura da chapa igual à altura da bobina. A isolação da chapa é feita com produto inorgânico à base de resina. O conjunto sofre um tratamento térmico específico para ser obtida a polimerização da isolação, que resulta na união das diversas camadas, formando um bloco sólido e mecanicamente robusto. Com essa formatação obtém-se elevada resistência mecânica, necessária às altas solicitações por causa de correntes de curto-circuito.²¹

Com auxílio da Figura 8 é possível analisar a disposição dos dois enrolamentos e da resina em epóxi entre os filamentos de alumínio. O alumínio é utilizado nesses transformadores por ser mais barato que o cobre e por reagir melhor a elevações de temperaturas. Com esse uso também há uma grande redução no peso do equipamento.

Além disso, com o uso da técnica de fitas é possível alcançar tensões mais constantes, como pode ser mostrado na Figura 9, que compara a tensão de saída de fios com a saída usada pelo método das fitas.

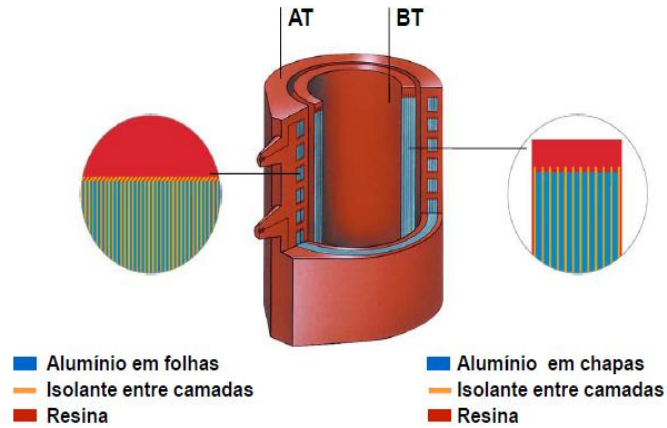


Figura 8 - Enrolamentos do GEAFOL em destaque.

Fonte: Manual GEAFOL²¹

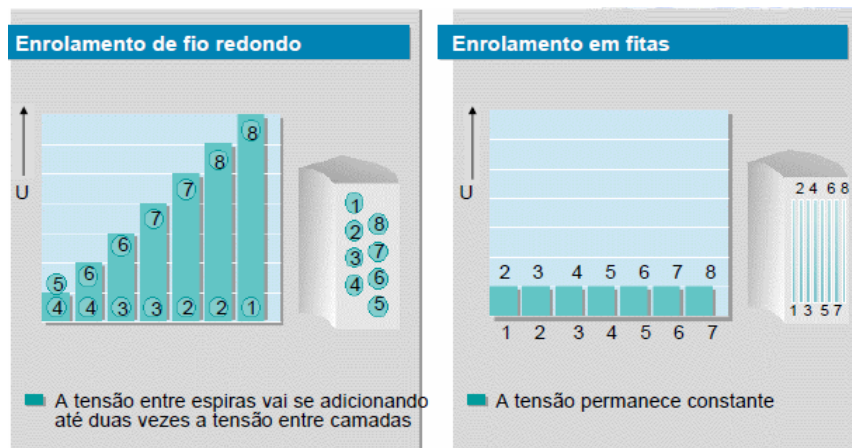


Figura 9 - Comparação das tensões de saída para tipo de constituição

Fonte: Manual GEAFOL²¹

O encapsulamento dos transformadores GEAFOL® são feitos sob vácuo, que consiste em colocar os transformadores no interior de moldes aplicando, em seguida, certa quantidade de epóxi, dosada de sílica e talco, sob vácuo, que tem função de eliminar bolhas e evitar descargas parciais.²¹

Essas bolhas quando presentes podem reduzir drasticamente o tempo de vida do equipamento. Pode-se ter uma melhor compreensão através da Figura 10, que apresenta uma caracterização de uma bolha de resina.²¹

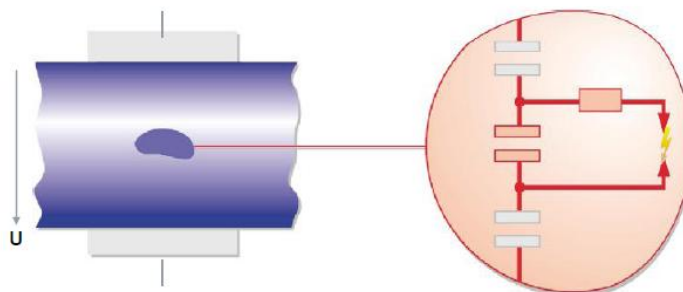


Figura 10 - Representação de uma descarga parcial.

Fonte: *Manual GEAFOL*²¹

Um dos graus de dificuldade na construção dos transformadores a seco é a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do alumínio e da resina epóxi, pois quando o transformador aquecer aparecerão tensões mecânicas fortes em consequência das diferentes dilatações que esses materiais sofrem, estando rigidamente unidos. No entanto, como estes coeficientes não são tão diferentes, dentro dos limites de temperatura adotados na operação do equipamento, os esforços são compatíveis com os métodos de construção empregados. Esforços mecânicos ou stress da resina são menores com uso de alumínio em comparação com o cobre. A razão para este fenômeno é a pequena diferença na dilatação térmica entre a resina e o alumínio (36:24) em comparação com a observada no cobre (36:17).²¹

O material isolante utilizado nos enrolamentos primários do transformador é de classe F, assim como nos enrolamentos secundários. Essas definições são para transformadores padrões, $K = 1$ (norma que será discutida nesse trabalho). Essa elevação é admitida, em média, 100° C, tanto nos enrolamentos primários como nos secundários. Essa temperatura é válida para situações onde a temperatura ambiente máxima seja de 40°C e temperatura média seja de 30°C. Essas definições foram analisadas na Tabela 3.²¹

As recentes pesquisas de materiais e métodos de fabricação possibilitaram o aumento da potência desses tipos de transformadores, assim como a ampliação da proteção das resinas dos enrolamentos, que estão ficando mais resistentes a diferentes

tipos de desgastes, como por exemplo, a maresia.¹⁰ É possível analisar esse avanço através da Figura 11, onde é apresentada em forma gráfica a evolução das tensões e potências possíveis para transformadores GEAFOL.²¹

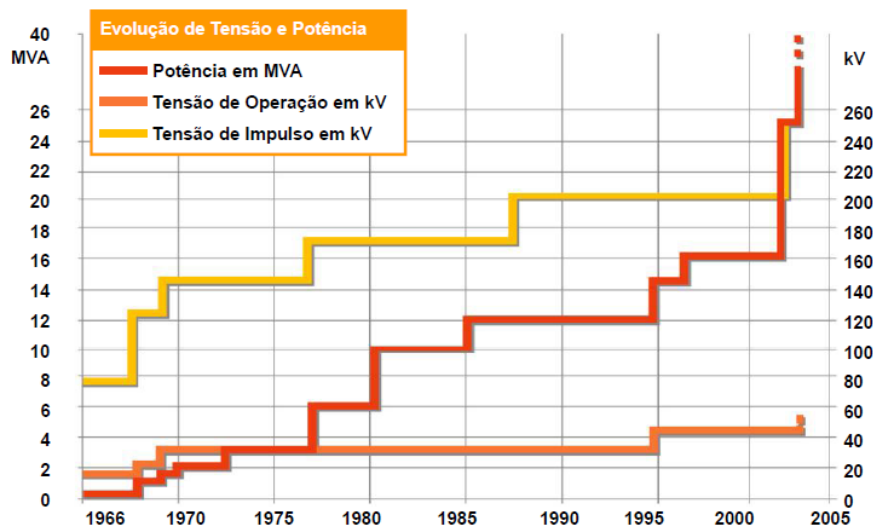


Figura 11 - Evolução do nível de potência e tensão dos transformadores nos últimos anos.

Fonte: Manual GEAFOL²¹

4. EFEITOS DAS HARMÔNICAS EM TRANSFORMADORES A SECO

As potências nominais dos transformadores de força baseiam-se em parâmetros de projeto que levam em consideração os limites permissíveis de aquecimento provocados por correntes alternadas senoidais à frequência fundamental, o qual no Brasil é de 60 Hz. Entretanto, perante o surgimento de ondas distorcidas possuidoras de conteúdos harmônicos consideráveis, nota-se que a sobre-elevação térmica nesses equipamentos é mais pronunciada que o esperado para correntes senoidais puras de mesmo valor. A razão desse sobreaquecimento se deve ao aumento das perdas no ferro e no alumínio (esse específico para o GEAFOL®) quando há a circulação de correntes harmônicas.^{1,5}

Quando um material ferromagnético, como o aço-silício usado nos transformadores, é submetido a um campo magnético gerado por correntes alternadas, as partículas elementares de sua estrutura molecular, dipolos magnéticos que se assemelham a minúsculos imãs contendo um pólo norte e um pólo sul magnéticos, invertem seu sentido a cada inversão de polaridade de corrente elétrica. Esse processo de magnetização e alternância na orientação dos dipolos provoca o surgimento de

perdas causadas pelo atrito entre eles, gerando calor nas lâminas do núcleo dos transformadores. Tais perdas são conhecidas como perdas por histerese, e elevam-se proporcionalmente com o aumento da frequência das correntes magnetizantes, devido à maior velocidade com que ocorrem as alternâncias na orientação dos dipolos.¹

Além do aumento das perdas por histerese, a presença de harmônicas provoca também, uma elevação das perdas por correntes parasitas de Foucault, que são perdas térmicas decorrentes do efeito de variação do fluxo magnético. O que por sua vez, gera circulação de correntes elétricas nas lâminas do núcleo, em partes metálicas estruturais dos transformadores e em suas carcaças. Tais perdas são proporcionais ao quadrado da frequência das correntes circulantes.

Também é possível afirmar que a presença de harmônicas consiste em um aquecimento extra no alumínio devido ao agravamento do efeito pelicular (skin-effect).^{1,3}. Este fenômeno é o resultado da não uniformidade da indutância própria através da seção reta do condutor, fazendo com que a distribuição de corrente seja maior na superfície do que no centro do condutor, estabelecendo-se uma maior resistência elétrica efetiva, sob excitação em corrente alternada.

Outros aspectos importantes a considerar, tratando-se da presença de distorções harmônicas, referem-se à deformação da onda de tensão fornecida no secundário dos transformadores, à ressonância elétrica e ao fator K, esse último será tratado em um capítulo único nesse trabalho.

4.1 SATURAÇÃO MAGNÉTICA E DEFORMAÇÃO DA ONDA DE TENSÃO SECUNDÁRIA

Na prática, estando um transformador sob tensão nominal (ou próximo a ela), com o enrolamento primário submetido às condições de carga próximas ao valor nominal, o mesmo opera com um nível de indução magnética relativamente elevado, porém abaixo do ponto de saturação do núcleo (região na qual uma elevação da intensidade do campo magnético não mais incorre em uma elevação significativa da indução ou da densidade de fluxo magnético no núcleo, e tal fluxo permanece praticamente constante).¹

A circulação de correntes harmônicas provoca o aparecimento de um fluxo adicional no circuito magnético, conduzindo-o à operação acima do ponto de saturação. Nessa situação, levando-se em conta que a tensão induzida no secundário de um

transformador é uma função da variação do fluxo e do número de espiras, o qual pode ser demonstrado na equação:

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (13)$$

4.2 RESSONÂNCIA ELÉTRICA

O efeito ressonância se caracteriza pela variação não linear da impedância equivalente em certo ponto do circuito, em função da frequência produzida por uma determinada carga especial.⁹ Uma ressonância sempre ocorre sintonizada numa frequência chamada de “frequência de ressonância”. Tal fato ocorre quando em um circuito L-C, onde a reatância capacitiva se iguala a reatância indutiva.³

No que se refere à ressonância elétrica, as correntes harmônicas podem desenvolver sobretensões na rede, sacrificando os transformadores e também os capacitores, visto que a corrente é limitada apenas pela resistência ôhmica dos circuitos envolvidos que, nesse caso podem assumir valores da ordem de miliohms, podendo resultar na presença de elevadas correntes. Por esse motivo, normas e estudos específicos costumam indicar regras práticas para a limitação da potência de bancos capacitivos no secundário dos Transformadores como precaução, na tentativa de se minimizar a possibilidade da ocorrência de ressonância entre transformadores e capacitores principalmente para frequências harmônicas mais baixas, cujas ondas são de amplitude mais elevadas.^{5,9}

Será demonstrado no próximo subcapítulo os diferentes tipos de ressonância, a ressonância em série e em paralelo.

4.2.1 Ressonância em Paralelo

A ressonância em paralelo ocorre quando em um circuito L-C, na presença de uma carga geradora de harmônicas, a impedância equivalente desta carga, se torna muito elevada, teoricamente tendendo ao infinito, mesmo que sejam utilizados valores finitos de L e C.⁹

Desde que a maioria das fontes harmônicas possam ser consideradas como fonte de correntes, esse resultado irá aumentar as tensões harmônicas e as correntes das harmônicas mais altas em cada segmento da barra da impedância paralela.⁹

Ressonâncias paralelas podem ocorrer por inúmeros fatores, como por exemplo, pelo simples fato de conectar-se a uma carga capacitiva na mesma barra na qual se encontra a fonte das harmônicas, ou quando uma das cargas no barramento possui uma impedância harmônica grande, agregando assim essa impedância ao barramento inteiro. Isto pode ser devido à ressonância entre a indutância e a capacitância do sistema ou até mesmo com a carga do mesmo.⁹

Uma ressonância em paralelo pode ocorrer entre a fonte e o capacitor assumindo que a fonte seja totalmente indutiva, a frequência ressonante pode ser calculada através da expressão.

$$f_p = f \sqrt{\frac{S_s}{S_c}} \quad (14)$$

Onde f é a frequência fundamental dada em Hz, f_p é a frequência ressonante paralela em Hz, S_s é a medida de curto circuito da fonte em VAr e finalmente S_c é a medida do capacitor também em VAr.²

Para se determinar qual condição existe para a criação dessa ressonância, é preciso medir as cargas do barramento individual, juntamente com a tensão de alimentação do barramento. Geralmente se a corrente que está fluindo para o sistema de potência é pequena, a tensão harmônica é alta, o que indica que há ressonância no sistema de potência. Contudo, se ao contrário disso houver uma grande corrente fluindo em uma das cargas, essa carga irá elevar a tensão em todo o barramento, o que indicará uma indutância entre a carga capacitiva e o barramento.^{2,9}

4.2.1.1 Cálculo da Ressonância em Paralelo.

Em um circuito inicial na qual não será incluída a resistência do indutor, como mostrado na figura abaixo pode-se calcular a impedância do circuito como será mostrado na Figura 12.

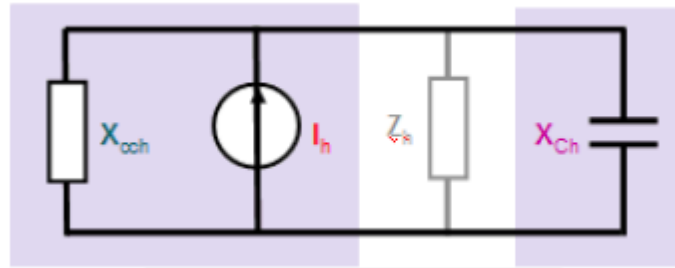


Figura 12 - Esquema de ligação do circuito com ressonância em paralelo

Fonte: *Harmonics in Power Systems, 2009* ²²

A impedância equivalente na carga P(n) é calculada como sendo:

$$Z = j \cdot \frac{\frac{\omega L}{\omega C}}{\omega L - \frac{1}{\omega C}} \quad (15)$$

Na condição de ressonância, as reatâncias indutiva e capacitiva se igualam, resultando com a impedância do circuito tender ao infinito.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (16)$$

Onde a frequência se f_0 é a frequência ressonante.

Considerando agora a inserção de uma resistência “R” no circuito, bem como a resistência própria do indutor é possível realizar os demais cálculos. No esquema a seguir pode-se ter entendimento na Figura 13.

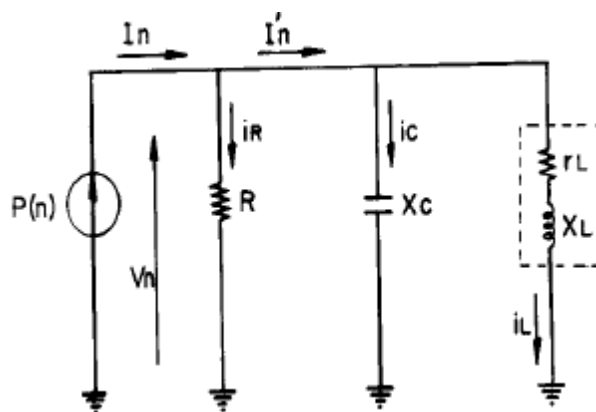


Figura 13 - Circuito com a inserção da resistência em série do indutor

Fonte: Atendimento a cargas geradoras de harmônicas em sistemas primários de distribuição ⁹

Como discutido anteriormente tem-se na condição de ressonância $X_C = X_L$, com essa informação pode-se calcular as correntes do circuito. Com isso e desprezando a resistência do indutor tem-se,

$$I_L = \frac{V_n}{j\omega_0 L} = -\frac{jV_n}{\omega_0 L} \quad (17)$$

$$I_C = \frac{V_n}{-\frac{j}{\omega_0 C}} = jV_n\omega_0 C \quad (18)$$

Assim tem-se a corrente como sendo a soma das duas correntes, indutor e capacitor.

$$I_n' = I_L + I_C = V_n \left[j \left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} \right) \right] \quad (19)$$

Resultando assim como esperado uma corrente igual a zero, $I_n' = 0$, logo, a corrente resultante I_n , quando da ressonância paralelo é:

$$I_n = I_R \quad (20)$$

Analisando o sistema de uma maneira fasorial tem-se a demonstração como na Figura 14.

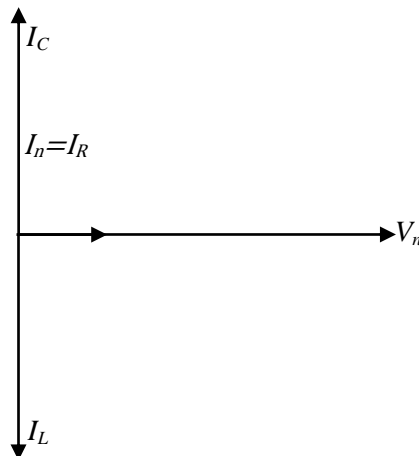


Figura 14 - Diagrama fasorial das corrente em ressonância em paralelo

Pode-se observar que no diagrama fasorial acima a corrente total I_n é muito pequena, mas as correntes em componentes paralelos (indutor e capacitor) podem ser de

valores elevados, se a resistência própria do indutor for desprezível. Assim as ressonâncias paralelas podem causar sobrecorrentes nos componentes do sistema elétrico, como se pode analisar através da Figura 15. ^{2,9}

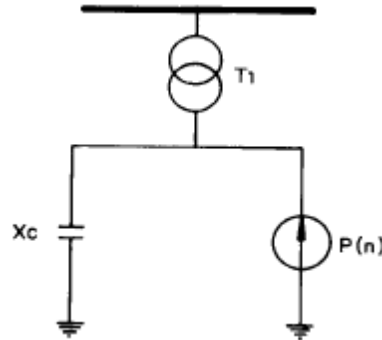


Figura 15 - Ressonante paralelo com carga conectada ao sistema

Fonte: Atendimento a cargas geradoras de harmônicas em sistemas primários de distribuição⁹

No exemplo de ligação ressonante tem-se que o esquema elétrico onde a indutância do transformador T1 juntamente com o banco de capacitores, representado por C, formam um circuito ressonante, na presença de uma carga P(n). ⁹

4.2.2 Ressonância em Série

Em circuitos com impedâncias em série, em altas frequências a carga pode ser ignorada assim como a impedância capacitiva é reduzida. Sobre essas condições a ressonância em série vai existir quando. ⁹

$$f_s = f \sqrt{\frac{S_t}{S_c Z_t} - \frac{S_t^2}{S_c^2}} \quad (21)$$

Onde tem-se que f_s é a frequência da série ressonante (Hz), S_t é medida do transformador, dada em VA, Z_t é a impedância do transformador em p.u., S_t é a medida da carga resistiva. ^{1,9}

A preocupação com as ressonâncias em série é que as correntes do capacitor podem fluir por tensões de harmônicas relativamente pequenas. A atual corrente que irá fluir dependerá do fator de qualidade do circuito. ²

4.2.2.1 - Cálculo da Ressonância em Série

Considere-se o circuito apresentado na Figura 16.

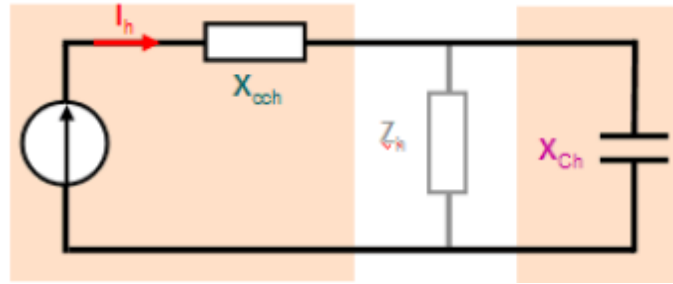


Figura 16 - Circuito ressonante série

Fonte: *Harmonics in Power Systems, 2009* ²²

Nesse circuito tem-se “i” como sendo a barra onde está conectada a carga P(n), P(n) como sendo a carga geradora de harmônicas, X_L reatância indutiva do circuito expressado em ohms, X_C como sendo a reatância capacitiva do circuito, L como sendo a indutância do circuito, C como sendo a capacitância e f_n como sendo a frequência harmônica expressa em Hz. Assim com todos os itens nomeados pode-se calcular a impedância da barra, que é dada pela expressão.⁹

$$Z_i = j \left(2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C} \right) \quad (22)$$

Como a carga harmônica gera infinitas frequências, deve atentar-se a uma em especial, cujo efeito iguala as reatâncias indutiva e capacitiva. Tal frequência chama-se f_0 , podendo ser representada através da equação.²

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad (23)$$

O que é um jeito mais visual de se calcular a frequência de ressonância. Redesenhando o circuito para facilitar a compreensão, como mostrado na Figura 17.

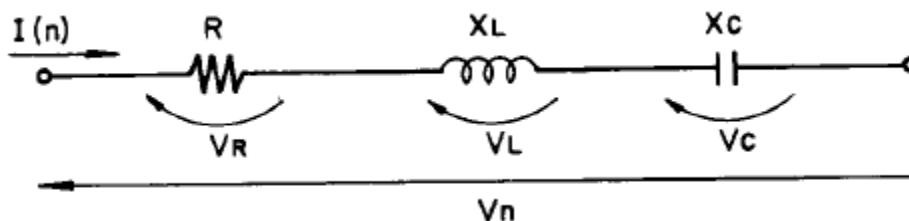


Figura 17 - Circuito ressonante série

Fonte: *Atendimento a cargas geradoras de harmonicas em sistemas primários de distribuição* ⁹

Com ajuda da representação gráfica da barra pode-se calcular a impedância do sistema, através da fórmula.

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (24)$$

Na frequência ressonante tem-se:

$$Q = \frac{V_1}{V_n} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (25)$$

Onde tem-se que Q representa o ganho de tensão.

Em um estudo de caso mais realístico ter-se-ia, na condição de ressonância, a reatância indutiva do transformador T_1 igual à reatância capacitiva do capacitor C (caracterizando uma ressonância série), o que pode ser mais facilmente visualizado na Figura 18.⁹

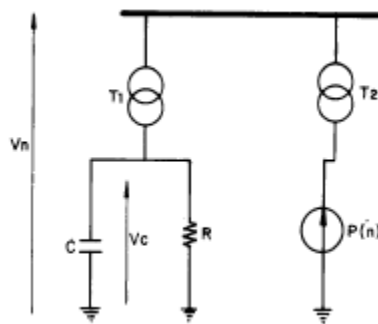


Figura 18 - Esquema de ligação ressonância em série exemplificada com um transformador

Fonte: Atendimento a cargas geradoras de harmônicas em sistemas primários de distribuição⁹

Esse tipo de circuito gera um diagrama fasorial como o demonstrado na Figura 19.

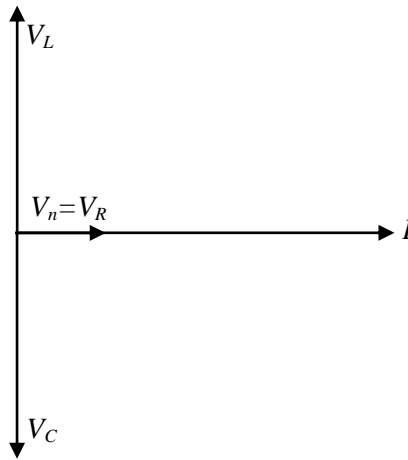


Figura 19 - Diagrama fasorial da ligação ressonância série

Observando o diagrama percebe-se que a tensão V_n do barramento tem um valor reduzido, tendo em vista que a o sistema está de fato em ressonância, mas as tensões individuais V_L e V_C no transformador T_1 e no banco de capacitores respectivamente possuem valores elevados. Assim será demonstrado que as ressonâncias em série podem trazer sobretensões nos equipamentos do sistema elétrico.^{1,9}

Podem ser resumido o valor da frequência ressonante com o aumento de capacitância e da indutância como mostrado na Figura 21, que resume o que foi dito nesse capítulo.

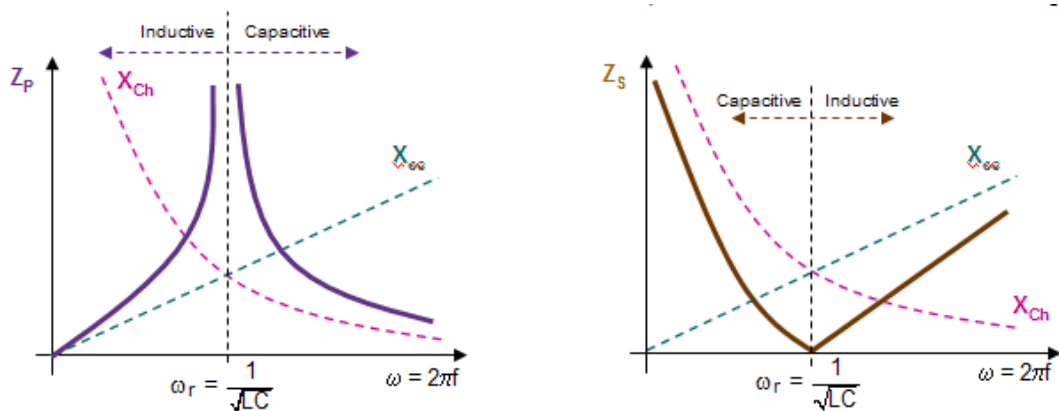


Figura 20 - Frequencia ressonante em circuitos com ressonância em série e em paralelo

Fonte: *Harmonics in Power Systems*, 2009²²

Antes de aprofundar o estudo sobre o fator K vale ressaltar o efeito das harmônicas no rendimento dos transformadores a seco.

4.3 – EFEITO DE HARMÔNICOS NO RENDIMENTO DO TRANSFORMADOR

Sabe-se, a priori, que a relação entre as potências ativas nos enrolamentos secundários $P(s)$ e o primário $P(p)$, expressa o rendimento de um transformador. Logo tem-se que:

$$\eta = \frac{P(s)}{P(p)} \quad (26)$$

Essa expressão também pode ser representada através de porcentagem, multiplicando-se por 100.

No entanto, em transformadores, é preciso levar em consideração todas as potências dissipadas e as distorções. Serão demonstradas as expressões com e sem harmônicas. Primeiramente tem-se a expressão para potências sem harmônicas.

$$P_{LL} = RI^2 + P_{EC} + P_{SL} \quad (27)$$

Logo tem-se a expressão de rendimento como:

$$\eta = \frac{\sum \sqrt{3} V_h I_h \cos \varphi_h}{\sum \sqrt{3} V_h I_h \cos \varphi_h + R \cdot \sum_{h=1}^{h=\infty} I_h^2 + P_{EC} \sum_{h=1}^{h=\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2 + P_{SL} \cdot \sum_{h=1}^{h=\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0,8}} \quad (28)$$

Assim tem-se a expressão para o rendimento, levando em consideração as perdas causadas pelas perdas harmônicas.

5. FATOR K

É possível quantificar o efeito térmico causado por cada ordem harmônica da corrente, cujo efeito é acumulativo. Assim, o fator K representa, de forma simplificada, o efeito térmico total, em pu, produzido no transformador pela corrente distorcida acima do efeito produzido pela corrente senoidal nominal. ¹⁴

Esse valor de K pode ser atribuído também a uma determinada carga e, se um transformador alimenta apenas essa carga à potência total, o fator K da carga será o mesmo do transformador. Numa composição de várias cargas distorcidas, cada uma com seu fator K, o efeito térmico da corrente total secundária do transformador não pode ser avaliado por simples soma, uma vez que deve-se considerar o fator de diversidade, pelo qual há cancelamento parcial de correntes harmônicas devido à dispersão dos ângulos de fase, e o fator de atenuação, pelo qual a tensão distorcida produzida por uma carga interage com as outras correntes e diminui a amplitude das componentes harmônicas. Dessa forma, é necessário avaliar a corrente total secundária por medição em sistemas já implantados, ou por processos estatísticos em sistemas em fase de projeto.²⁰

Os transformadores com a designação K possuem alguns itens diferenciados de projeto e construção, como blindagem eletrostática entre os enrolamentos, isolação classe 220°C, secundário com dois condutores paralelos para redução do efeito pelicular, fiação de neutro de seção duplicada, fluxo reduzido, maior eficiência térmica etc.¹⁴

Esses estudos surgiram da necessidade de quantificar os efeitos das harmônicas em transformadores. Esses serão analisados na sessão seguinte deste trabalho, na qual se descreve o início da criação da norma C57.110¹³. A referida norma descreve a análise das perdas sofridas pelos transformadores devido aos efeitos harmônicos. Em seguida será analisado o Fator K e as perdas em transformadores devido ao efeito do conteúdo harmônico da carga.

5.1 HISTÓRICO DA C57.110

Em março de 1980 aconteceu o encontro do Comitê de Transformadores do IEEE, no qual foi discutido o efeito de correntes não senoidais no aumento da temperatura em transformadores. Para sistemas industriais a corrente não senoidal é uma porcentagem crescente em todas as indústrias. Foi sugerida então, a criação de um guia para auxiliar a capacidade de carga baseado na quantidade de distorção. Em Maio de 1980 um comitê de estudos foi formado, tendo sua primeira reunião em Outubro de 1980.¹²

Um artigo escrito por Alexander D. Kline, que trabalhava em uma empresa de transformadores, foi apresentado no encontro anual da IAS em 1981 e distribuído para o Grupo de trabalho do IEEE citado anteriormente. Esse artigo apresentou a metodologia usada hoje na norma C57.110 considerando as perdas por correntes parasitas ou correntes de Foucault variando com o quadrado da ordem da corrente da harmônica. Depois de vários ajustes a versão da norma foi completada em 29 de outubro de 1982, mas essa norma foi completada e aceita pelo IEEE somente em 1986. Em 1989 o Grupo de trabalho recebeu um prêmio de mérito em reconhecimento pelo grande trabalho desenvolvido. Reconhecendo assim uma grande contribuição para a indústria, originalidade do trabalho e publicações e oportunidade de publicações. Em 1990 Kennedy & Ivey em seu trabalho descreveram aplicações e considerações quanto a design para transformadores contendo correntes harmônicas. Esse trabalho foi baseado na então atual versão da norma C57.110 – 1986.

A intenção do IEEE era fornecer através da norma C57.110-1986 procedimentos para determinar a capacidade de um transformador já existente de suportar cargas com conteúdo harmônico. A metodologia usada nessa norma conseguiu iniciar o que hoje é a norma C57.110¹³ a qual fornece especificações para desenvolvimento de transformadores para suportar cargas harmônicas.

5.2 PERDAS EM TRANSFORMADORES A SECO

Para melhor compreensão acerca do estudo do fator K em transformadores a seco, é preciso analisar suas perdas. Tais perdas serão avaliadas com e sem o efeito das harmônicas.

Perdas em transformadores consistem em perdas a vazio e no núcleo. Essas perdas podem ser demonstradas pela equação abaixo.

$$P_T = P_C + P_{LL} \quad (29)$$

Onde tem-se:

P_C – perdas no núcleo e a vazio (Watt);

P_{LL} – perdas sob carga (Watt);

P_T – perda total (Watt).

Perdas no núcleo ou a vazio advém da excitação magnética no núcleo. Para correntes em cargas não senoidais é esperado que a forma de onda seja senoidal. Segundo a norma C57.110 não há nenhuma restrição quanto ao aumento da perda no núcleo devido a correntes não senoidais na carga. As perdas de um transformador correspondem a soma de todas as perdas na instalação e no transformador:

$$P_{LL} = \frac{1}{2} RI^2 + P_{EC} + P_{SL} \quad (30)$$

Onde tem-se que:

RI^2 - perdas ôhmicas nos enrolamentos;

P_{EC} - perdas por corrente parasitas nos enrolamentos;

P_{SL} – perdas adicionais (diretas nos contatos, barras e etc...)

A perda gerada por RI^2 é devido às correntes e a resistência dos enrolamentos. Esse grupo de perdas possui outra nomenclatura denominada perdas ôhmicas. Essas perdas são devidas as correntes harmônicas, mas não estão diretamente relacionadas com as frequências.^{12, 13, 14} As perdas Ôhmicas são determinadas pela medição das resistências DC usando-se correntes e tensões DC para assim ter o cálculo das perdas ôhmicas.

Não há método para determinar as perdas por correntes parasitas em cada um dos enrolamentos. As perdas totais e as correntes parasitas (correntes de pico) são determinadas pela medição da perda total na carga durante o teste de impedância.¹³ As perdas adicionais e as perdas por correntes parasitas são determinadas pela diminuição das perdas ôhmicas pelas perdas nas cargas.

$$P_{LL} - \frac{1}{2} RI^2 = P_{EC} + P_{SL} \quad (31)$$

5.3 PERDAS EM TRANSFORMADORES A SECO DEVIDO AOS EFEITOS DE CARGAS NÃO LINEARES

No cômputo das perdas totais do transformador sob cargas não lineares, as perdas a vazio são consideradas fixas, em função das distorções harmônicas serem baixas. Assim, a parcela variável pode ser devida às perdas sob carga (P_{LL})¹⁴, que são

fortemente influenciadas pelo espectro e pela ordem harmônica da corrente secundária, segundo a seguinte relação:

$$P_{LL} = \frac{1}{2}R \cdot \sum_{h=1}^{h=\infty} I_h^2 + P_{EC} \sum_{h=1}^{h=\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^2 + P_{SL} \cdot \sum_{h=1}^{h=\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 h^{0,8} \quad (32)$$

Para melhor entendimento, cada fração dessa expressão será analisada separadamente, facilitando assim, a compreensão das perdas devido às harmônicas.

5.3.1 Perdas Devido as Harmônicas nas Perdas Ôhmicas

Se o valor das perdas na carga é aumentado devido às componentes harmônicas, as perdas ôhmicas (RI^2) serão aumentadas proporcionalmente.^{13, 14}

5.3.2 Perdas Devido as Harmônicas nas Perdas por Correntes Parasitas ou Correntes de Foucault

A perda resultante das correntes parasitas (P_{EC}), também conhecidas como correntes de Foucault, é compreendida como proporcional a corrente eficaz e a raiz quadrada da ordem da frequência harmônica, e está demonstrada como o segundo elemento da equação das perdas P_{LL} . Essa é uma característica que pode causar perdas excessivas nos enrolamentos e também elevar a temperatura dos mesmos, criando-se assim, pontos de temperatura exagerados.^{13, 14}

5.3.3 Perdas Devidas as Harmônicas nas Perdas Adicionais

É reconhecido que as perdas adicionais (P_{SL}) no núcleo, acoplamentos e partes da estrutura do transformador também serão aumentadas ao quadrado da corrente na carga. No entanto, essas perdas não serão aumentadas na taxa proporcional do quadrado da frequência, como demonstrado no cálculo das perdas, devido a correntes parasitas. Estudos realizados por fábricas e outras fontes mostraram que as perdas em “busways”, conectores e nas partes estruturais são aumentados devido as harmônicas pelo expoente

de 0.8 ou menos. Contudo, conforme a norma C57.110, será empregado nesse trabalho o fator 0.8.¹³ Esses efeitos são dependentes do tipo do transformador. Por exemplo, o aumento da temperatura nas partes componentes do transformador, exceto enrolamentos, é menos crítico em transformadores a seco, mas o mesmo não vale para transformadores imersos em líquido isolante.¹⁴

5.3.4 Componente CC da Corrente na Carga

As correntes harmônicas nas cargas são freqüentemente acompanhadas por componentes de correntes contínuas (CC), o qual vai aumentar as perdas no núcleo suavemente, aumentando a corrente de magnetização e o nível de ruído sonoro substancialmente. Componentes CC são relativamente pequenas e é esperado que não tenham efeito na capacidade de carga de um transformador, determinada pela recomendação prática. Componentes CC mais altas podem alterar a capacidade de carga do transformador, devendo ser evitadas ao máximo.¹³

5.4 PERDAS EM TRANSFORMADORES NA BASE PU

Desde o início das preocupações sobre os transformadores serem atribuídos a cargas não lineares, há a preocupação sobre o sobreaquecimento dos enrolamentos, sendo considerado para se estipular a densidade de perdas em pu. Onde se sabe tem que a base para o cálculo será a perda a vazio RI^2 . Assim pode-se reescrever a equação das perdas no transformador.¹⁴

$$P_{LL-R}(pu) = 1 + P_{EC-R}(pu) + P_{SL-R}(pu) pu \quad (33)$$

Onde tem-se que:

$P_{LL-R}(pu)$ – são as perdas sob carga em pu

$P_{EC-R}(pu)$ – são as perdas por correntes parasitas ou de Foucalt em pu

$P_{SL-R}(pu)$ – são as perdas adicionais em pu

Essa definição se faz necessária para se compreender a base que foi usada em todas as expressões que aparecerão no restante do trabalho.^{12, 13}

As perdas por correntes parasitas ou de Foucault (P_{EC-R}) irão causar o sobreaquecimento dos enrolamentos do transformador, essas perdas podem ser definidas na equação.

$$P_{EC} = P_{EC-R} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (34)$$

Onde tem-se que:

P_{EC} – são as perdas por correntes parasitas;

P_{EC-R} – são as perdas por correntes parasitas nas condições já pré-determinadas na unidade pu;

h - é a ordem harmônica em questão;

h_{max} – é a ordem da maior harmônica considerada;

I_h - é a corrente em rms da harmônica;

I_R – é a corrente fundamental, em rms, determinada na 48 frequência e cargas determinadas.

As perdas ôhmicas nos enrolamentos (RI^2), pela definição do sistema pu possui valor unitário. Para cargas com correntes não senoidais tem-se que a corrente na forma pu é determinada por:

$$I(pu) = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h (pu)^2} \quad (35)$$

Onde tem-se que:

$I(pu)$ – é a corrente na carga em pu;

h - é a ordem da harmônica;

h_{max} – é a ordem de maior harmônica considerada;

$I_h (pu)$ – é a corrente rms na harmônica “h”.

A equação P_{EC} pode ser reescrita como sendo:

$$P_{EC}(pu) = P_{EC-R}(pu) \cdot \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2 pu \quad (36)$$

Assim tem-se a equação das perdas devido a correntes parasitas em pu ^{12, 13}.

5.5 PERDAS EM TRANSFORMADORES NAS CORRENTES DA CARGA

Com a relação mostrada para definir $P_{EC}(pu)$ assume-se que as correntes são medidas nas cargas. Como essas medidas são raramente encontradas em campo, um novo termo é necessário para descrever as perdas nos enrolamentos com as correntes e frequências medidas.¹³ São usadas três premissas básicas para esclarecer o uso desse novo termo:

- a. As perdas nos enrolamentos por correntes parasitas são proporcionais ao quadrado da frequência. Essa afirmação irá gerar várias outras expressões subseqüentes, para assegurar sua funcionalidade para pequenos e grandes condutores em pequenas e grandes harmônicas.
- b. As perdas por correntes parasitas são função das correntes nos condutores.
- c. Superposição de perdas são aplicadas, o que permite a adição direta das perdas por correntes parasitas.

Com algumas mudanças dentro da equação inicial normalizando o valor da corrente eficaz. Assim tem – se a expressão:

$$P_{EC} = P_{EC-O} \cdot \frac{\sum_{h=1}^{h_{max}} h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (37)$$

Onde tem-se que:

P_{EC} - é a perda nos enrolamentos por correntes parasitas;

P_{EC-O} - é a perda nos enrolamentos por correntes parasitas;

h - ordem das harmônicas;

h_{max} - é a maior harmônica considerada;

I_h - é o valor da corrente harmônica na frequência determinada.

5.6 FATOR DAS PERDAS HARMÔNICAS PARA CORRENTES PARASITAS

É conveniente definir um único número que pode ser usado para determinar as capacidades do transformador para suprir cargas. F_{HL} é o fator proporcional aplicado

para determinar as perdas por correntes parasitas, o qual representa, para aquecimento, um resultado das correntes harmônicas nas cargas.^{12, 13}

Esse método é também chamado de método normalizado do fator K, o qual prevê que as perdas no núcleo são fixas e independentes das correntes harmônicas no secundário, desde que a distorção harmônica no primário seja baixa, essa é uma imposição normativa.¹⁴

F_{HL} é a razão entre as perdas totais por correntes parasitas devido as harmônicas, (P_{EC}), e as perdas nos enrolamentos devidas as correntes parasitas na frequência de potência, quando não há nenhuma corrente harmônica P_{EC-o} . Pode-se analisar essa razão pela expressão abaixo.^{12, 14}

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} h^2 I_h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (38)$$

Onde F_{HL} é o fator de perdas devido a harmônicas por correntes parasitas. Os outros termos possuem mesma denominação que os das expressões já mostradas.

Essa equação permite calcular em termos dos valores eficazes reais correntes harmônicas. Os analisadores de harmônicas permitem que os cálculos sejam feitos com os valores das harmônicas normalizados e com o valor total em rms ou com o valor da frequência fundamental. Essas mudanças podem ser feitas dividindo o numerador e o denominador por I , a corrente da carga em rms, ou por, I_1 , a corrente fundamental da carga em rms. Fazendo essas substituições na expressão 35, tem-se as expressões 36 e 37 representando-as respectivamente.^{12, 13}

Tem-se assim a expressão:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I} \right]^2} \quad (39)$$

Onde é aplicada a corrente da frequência harmônica em questão é dividida pela corrente rms da carga. Com a divisão pela corrente na frequência fundamental

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-o}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (40)$$

Com essas mudanças no equacionamento chega-se a valores muito próximos para ambos os cálculos. Isso pode ser demonstrado nos exemplo que será feito usando os dois métodos.¹³

5.7 FATOR K NA UL

5.7.1 Histórico do Fator K

Em 1988 um pré-artigo de Kerzenbaum, Majur, Mistry e Frank apresentou uma tabulação baseado na norma C57.110, a qual produz um somatório da corrente do transformador em unidade pu multiplicado ao quadrado do número da harmônica. Essa expressão foi denominada pelos autores como Coeficiente K.¹²

A empresa *International Transformer* adotou o UL e o termo “Coeficiente K” foi modificado para “Fator K”. A *ITC* ganhou o mercado convencendo a UL a usar as definições do Fator K. E assim em dezembro de 1990 se tornou a primeira indústria a possuir a listagem do Fator K. Em 1994 Frank reescreveu o pré-artigo e o publicou tornando-o um artigo oficial.¹²

5.7.2 Definição do Fator K

A primeira definição para cálculo do fator K para transformadores a seco definidos nos *Underwriters Laboratory Standards* foi escrita em 1961 e aperfeiçoada em 1962. Diferentemente do F_{HL} esse método se baseia somente nas correntes parasitas ou correntes de Foucault. Nesses artigos foi definido que:

- Fator K – Uma medição opcional aplicada a um transformador indicando a estabilidade de um transformador quando aplicado a ele cargas não senoidais.
- A equação que representa esse cálculo é apresentada na expressão 41.

$$\text{Fator K} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(pu)^2 h^2 \quad (41)$$

Onde

$I_h(pu)$ - é a corrente em rms na harmônica “h”;

h - é o valor da harmônica.

- A classificação de transformadores com Fator K não tem sido desenvolvidos para cargas com harmônicas maiores que a décima e quando essa é maior que $1/h$ da valor da corrente em rms da fundamental.

Pode-se analisar que a expressão do Fator K está diretamente relacionada a expressões usadas na norma C57.110, para o cálculo de perdas devido a harmônicas em transformadores. No próximo capítulo será mostrada essa relação.

O total da soma das harmônicas irá determinar a porcentagem da carga que não é linear. Logo, conhecendo esse valor, pode-se determinar o valor K que deverá ser atribuído aos transformadores. Quando a soma das harmônicas representar 0% da carga total que é submetido o transformador, é determinado que o valor desse seja $K=1$. Quando essa soma representar no mínimo 50% da carga do transformador será definido $K=4$, quando 100% $K=13$, quando 125% $K=20$ e quando for 150% $K=30$.²⁰

Esses valores serão decompostos com as parcelas de cada harmônica para aumentar a compreensão.

- $K=1$ – para esse valor o transformador é desenvolvido como sendo um transformador normal, que não está preparado para suportar correntes não senoidais em frequências diferentes de 60Hz.
- $K=4$ – 50 % da carga não é linear.
 - 16,7% da corrente medida é da 3^o harmônica.
 - 10% da corrente medida é da 5^o harmônica.
 - 7,1% da corrente medida é da 7^o harmônica.
 - 5,6% da corrente medida é da 9^o harmônica.
 - Além da 9^o harmônica as porcentagem da corrente fundamental através da harmônica 25 será igual ao recíproco do número ímpar da harmônica envolvida vezes 0.5.
- $K=13$ – 100 % da carga não é linear.
 - 33,3% da corrente medida é da 3^o harmônica.
 - 20% da corrente medida é da 5^o harmônica.
 - 14,3% da corrente medida é da 7^o harmônica.

11,1% da corrente medida é da 9^o harmônica.

Além da 9^o harmônica a porcentagem da corrente fundamental através da 25^o harmônica, será igual ao recíproco do número ímpar da harmônica envolvida vezes 1.

- K=20 – 125 % da carga não é linear.

41,7% da corrente medida é da 3^o harmônica.

25% da corrente medida é da 5^o harmônica.

17,9% da corrente medida é da 7^o harmônica.

13,9% da corrente medida é da 9^o harmônica.

Além da 9^o harmônica, a porcentagem da corrente fundamental através da 25^o harmônica, será igual ao recíproco do número ímpar da harmônica envolvida vezes 1.25.

- K=30 – 150 % da carga não é linear.

50% da corrente medida é da 3^o harmônica.

30% da corrente medida é da 5^o harmônica.

21,4% da corrente medida é da 7^o harmônica.

16,7% da corrente medida é da 9^o harmônica.

Além da 9^o harmônica a porcentagem da corrente fundamental através da 25^o harmônica, será igual ao recíproco do número ímpar da harmônica envolvida vezes 1.5.

Para tornar essa compreensão mais acessível será definido o valor do fator $K = 4$ os outros em relação a esse. Como foi mostrado anteriormente, a capacidade de suportar correntes harmônicas pode ser analisada com os demais valores de K , o qual significa resumidamente que um $K=4$ tem a capacidade de suportar quatro vezes mais correntes parasitas que um transformador $K=1$. Um transformador intitulado como $K=9$ tem a capacidade de suportar 163% a mais cargas harmônicas que um $K=4$. E transformadores intitulados como $K=13$ tem capacidade de suportar 200% das cargas harmônicas que um transformador $K=4$.²⁰

Com essas definições é possível que um transformador agüente cargas harmônicas sem sobre-aquecer. Conseguindo ter seu tempo de vida mantido, sem que esse seja reduzido por causa do sobreaquecimento.

5.8 RELAÇÃO ENTRE O FATOR K E A NORMA C57.110

A definição do Fator K é baseada no uso da corrente em rms usada para calcular em pu o Fator K na equação 42. Substituindo a corrente em rms na equação UL o Fator K é dado por

$$\sum_{h=1}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2 = \frac{1}{I_R^2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 h^2 \quad (42)$$

onde tem-se que:

I_R - é a corrente em rms do transformador.

O fator de perdas harmônicas, que é definido como padrão, é definido pela Equação 43, que é definida como pode-se analisar essa mesma equação com a corrente fundamental tratada como uma constante.

$$\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} = \frac{\frac{1}{I_1^2} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\frac{1}{I_1^2} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \quad (43)$$

A partir da simplificação dos termos $\frac{1}{I_1^2}$ tem-se uma nova equação representada na Equação 44.

$$\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2 = F_{HL} \sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 \quad (44)$$

Assim substituindo a Equação 44 na Equação 43 tem-se

$$Fator K = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (45)$$

A Equação 45 demonstra a relação entre a perda devida a harmônicas com o Fator K da UL. O fator de perdas é uma função das correntes da harmônica e é independente da magnitude relativa. O Fator K da UL é dependente dos dois da magnitude e da distribuição das correntes harmônicas.

Para medições de correntes de harmônicas em instalações já existentes, o valor do Fator K é diferente do valor do fator de perdas harmônicas. Para definir uma medição de cargas através do Fator K vai ser preciso saber a corrente em rms do secundário do transformador.

Para um transformador novo o qual tenha os valores das correntes harmônicas do secundário forem especificados como um valor pu da corrente em rms, o Fator K e o F_{HL} terão o mesmo valor. O valor numérico do Fator K vai ser igual ao F_{HL} somente quando a raiz quadrada da soma das correntes harmônicas é igual ao corrente rms do secundário do transformador.

6. ESTIMATIVA DE VIDA DE UM TRANSFORMADOR A SECO

A durabilidade de um sistema isolante depende, praticamente, da temperatura e do tempo ao qual o mesmo está exposto. A relação entre tempo e temperatura e seus efeitos na isolação tem sido objeto de estudo por vários anos.

A estimativa da expectativa de vida útil dos materiais isolantes é efetuada empregando-se a teoria clássica de "Arrhenius-Darkin". Esta estabelece que a vida útil da isolação está intimamente associada à temperatura de operação, bem como ao tempo de exposição da mesma. O processo de deterioração do isolante consiste em um fenômeno químico, onde uma oxidação lenta e gradual leva ao endurecimento do verniz isolante¹⁹.

Conseqüentemente, o mesmo torna-se quebradiço, levando à perda da flexibilidade mecânica e da rigidez dielétrica. Em outras palavras, trata-se do envelhecimento gradual do isolante ao longo do tempo, que vai perdendo suas propriedades isolantes¹⁸ até que não mais suporta a tensão aplicada e ocasiona um curto-circuito entre as partes energizadas.

A degradação térmica de materiais orgânicos e inorgânicos de um equipamento elétrico pode ser estimada pela equação da taxa de reação conhecida como a expressão de Arrhenius, dada por:

$$\frac{dEV_u}{dt} = Ae^{\frac{-E}{k\theta}} \quad (46)$$

Onde

EV_u - vida útil do isolamento do enrolamento;

t - tempo de vida em anos;

$\frac{dEV_u}{dt}$ - taxa de redução da vida útil em relação ao tempo;

A - constante do material;

k - constante de Boltzmann igual a $0,8617 \times 10^{-4}$ [eV];

θ - temperatura absoluta do ponto mais quente em graus Kelvin;

E - energia de ativação da reação de envelhecimento [eV].

A análise da equação mostra que a mesma, na forma apresentada, fornece valores absolutos da vida útil de um determinado sistema isolante. Há de se reconhecer que o cálculo da vida útil a partir da temperatura de operação da isolação é um tanto difícil. A razão disto está na necessidade de se esperar um longo período de tempo, até que a isolação sofra a primeira deterioração, para aí sim, avaliar o tempo de vida da mesma.

Reconhecendo estes aspectos, são utilizadas estratégias que permitem expressar a vida útil da isolação do transformador, como uma porcentagem de uma referência conhecida. Esta consiste na vida útil nominal do isolante, vinculada com a temperatura nominal da sua classe de isolamento²⁰.

Para contemplar o que foi anteriormente exposto, faz-se necessário modificar a Equação 46 de onde surge a expressão matemática que dá origem à conhecida “curva de Arrhenius”. Para tanto, integrando-se a Equação 46 e aplicando logaritmo natural em ambos os lados, obtêm-se:

$$\ln EVu = \left(\frac{E}{k}\right) \cdot \frac{1}{\theta} + A \quad (47)$$

Essa expressão indica que o tempo de vida da isolação é função da energia de ativação específica do material, e da temperatura da isolação, considerada constante ao longo de toda sua vida útil. As “curvas de Arrhenius” são obtidas traçando-se $\ln EVu$ versus $1/\theta$, cuja inclinação é, obviamente, E/k .

Conhecendo-se dois pontos quaisquer, EVu_1 e EVu_2 , pertencentes à curva de Arrhenius, com suas respectivas temperaturas, θ_1 e θ_2 e utilizando a equação

$$\ln EVu_1 - \ln EVu_2 = \left(\frac{E}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2}\right) \quad (48)$$

A Equação 48 permite avaliar a redução da vida útil do material isolante em uma determinada condição operacional em função de valores conhecidos. Isto equivale a dizer que o tempo de vida da isolação pode ser obtido em função de parâmetros

conhecidos, quais sejam aqueles associados às condições nominais de operação do equipamento. Neste sentido, considerando-se que o tempo de vida útil nominal da isolação seja igual a EVu_2 , a uma temperatura nominal θ_2 , quando a temperatura de operação sofre um acréscimo $\Delta\theta$, ou seja, quando θ_1 é igual a $\theta_2 + \Delta\theta$ e substituindo o valor de θ_1 na expressão (2.3) e após algumas transformações, pode-se escrever:

$$EVu = EVu_{nom} e^{-\left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{\Delta\theta}{\theta_{nom}(\theta_{nom}+\Delta\theta)}\right)} \quad (49)$$

Sendo:

EVu - tempo de vida útil do transformador para $\theta = \theta_{nom} + \Delta\theta$;

EVu_{nom} - tempo de vida útil nominal do transformador para $\theta = \theta_{nom}$;

$\Delta\theta$ - acréscimo de temperatura em relação a θ_{nom} em graus °C;

θ_{nom} - temperatura nominal do transformador em graus Kelvin.

Para o emprego da expressão, observa-se a necessidade do conhecimento da vida útil nominal, da classe de isolamento do transformador e, fundamentalmente, da temperatura da isolação do enrolamento do transformador na condição operacional que se deseja analisar.

6.1 REDUÇÃO DA VIDA ÚTIL EM FUNÇÃO DE UM AUMENTO DE TEMPERATURA

É importante ressaltar que na avaliação da perda de vida útil, é de fundamental relevância o conhecimento dos aspectos relativos à elevação da temperatura em áreas estratégicas localizadas no interior dos transformadores.

Nestes, a região mais sensível a ser investigada consiste da isolação do enrolamento de baixa tensão, uma vez que este sofre de forma direta os efeitos advindos de uma maior elevação de temperatura. Para a determinação das elevações da temperatura que o mesmo está sujeito, geralmente recorre-se às medições in loco ou estimativas via modelos térmicos do transformador.

Adicionalmente, devem-se estabelecer valores nominais para a vida útil do isolante, bem como sua respectiva temperatura de referência. Quanto a esta questão, deve-se ressaltar que a escolha é subjetiva. Prova disto é que não se observou, na

literatura pesquisada, um consenso com relação ao tempo de vida nominal para os transformadores, sejam eles a seco ou com óleo isolante.

O fato de que os limites de funcionamento e o tempo de vida dos equipamentos está diretamente relacionado com as condições de trabalho a qual o transformador é exposto. Dentre as principais pode-se citar:

- Tensões de alimentação puramente senoidais, equilibradas e simétricas;
- Carregamento nominal e senoidal;
- Funcionamento contínuo.

Assim, qualquer situação operativa que não àquelas descritas, podem ocasionar diminuição da vida útil do transformador. Logo quando há uma elevação da temperatura o resultado é uma redução significativa da vida útil do transformador. Como vai ser demonstrado no capítulo posterior as harmônicas tem um impacto direto da redução da vida dos transformadores.

6.2 CÁLCULO DO EFEITO DE HARMÔNICOS NA VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR

Este item tem por objetivo estimar a vida útil de transformadores quando estes estão alimentando cargas não lineares. Estimativa de Vida Útil (EVu) em função da metodologia da Norma ANSI/IEEE.

A vida útil do transformador pode ser estimada, tomando-se como base a Equação 50.

$$EVu = EVu_{nom} e^{-\left(\frac{E}{k}\right)\left(\frac{\Delta\theta}{\theta_{nom}(\theta_{nom}+\Delta\theta)}\right)} \quad (50)$$

O cálculo da estimativa do incremento na temperatura do ponto mais quente do transformador, devido a circulação das correntes harmônicas, são determinados, respectivamente pelas Equações e , conforme mostrado:

$$\Delta\theta_{corrigido} = \theta_{isol} \left[\left(\frac{P_{LL}}{P_{NT}} \right) - 1 \right] \quad (51)$$

7. PRINCIPAIS FONTES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As cargas não-lineares são aquelas em que a impedância tem valores diferentes no tempo ao longo da onda da tensão de alimentação, gerando uma corrente de linha com forma de onda não senoidal. ¹

Alternativamente, uma carga linear que, mesmo com a impedância fixa recebe, inserido a montante, um dispositivo eletrônico de controle ou um conversor no qual a corrente circule apenas durante um ciclo ou um intervalo de tempo, também configura uma carga-não linear, sendo essa a forma mais comum. Assim, é possível afirmar que qualquer carga eletrônica pode se caracterizar como uma carga não-linear. ⁵

Cada tipo de conversor produz uma forma de onda de corrente peculiar, e a decomposição harmônica dessa onda mostra sempre as mesmas ordens harmônicas, mesmo com amplitudes diferentes por causa das indutâncias de correntes alternadas (CA) ou correntes contínuas (CC), sendo chamadas de harmônicos Característicos. Sob alimentação senoidal equilibrada, os conversores CA-CC monofásicos os produzem em todas as ordens ímpares de corrente. Conversores trifásicos de seis pulsos produzem apenas as ordens $6k\pm 1$, e conversores trifásicos de 12 pulsos produzem apenas as ordens $12k\pm 1$, com $k=1,2,3\dots$. Cada componente de ordem harmônica h da corrente produz um efeito diferente nas perdas do transformador, seja pela amplitude ou pela frequência. ¹⁴

De maneira geral, as harmônicas podem ser classificadas como “harmônicas características” e “harmônicas não-características”. É possível definir as “harmônicas características” como harmônicas teoricamente previsíveis, ou seja, com amplitude e frequência esperadas, valores que, inclusive podem ser determinados com boa aproximação. Essa aproximação pode ser feita durante a fase de projeto de uma instalação com base nas características dos equipamentos geradores das distorções. Geralmente são criadas por conversores de potência. ⁷

As “harmônicas não-características” são ondas imprevisíveis por surgirem em decorrência de efeitos aleatórios ou de modelamento prévio extremamente difícil. Comumente, as harmônicas não- características são geradas por lâmpadas de descarga e por equipamentos industriais com princípio de operação baseado no surgimento de arcos elétricos, dentre esses pode-se citar os fornos de fundição. ¹

Na atualidade as fontes de harmônicas mais significativas são os conversores estáticos de potência, representados de maneira geral, pelos retificadores e inversores.

Tais equipamentos têm sua utilização intensificada principalmente no segmento industrial, tendendo a se acentuar ainda mais nos próximos anos.

As principais fontes de distorções harmônicas encontradas em instalações elétricas serão citadas e brevemente comentadas a seguir.

7.1 FONTES DE ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICAS (FONTES CHAVEADAS)

Os modernos equipamentos eletrônicos monofásicos, tais como microcomputadores, impressoras, televisores e demais equipamentos baseados em microprocessadores, fazem uso de fontes de alimentação chaveadas. Pode-se descrever uma fonte chaveada como uma fonte que pode receber diretamente a energia em AC. Fazendo uso, basicamente, de uma ponte retificadora monofásica a diodo com retificação de onda completa, capacitores, um circuito chaveador (transformação do sinal retificado em sinal AC novamente, esse em alta frequência) e um novo circuito retificador. Esse tipo de fonte é utilizado, pois possui peso e dimensões reduzidas, além de não requisitar um transformador na entrada de tensão. Através da Figura 21 é possível analisar seu funcionamento. ¹⁵

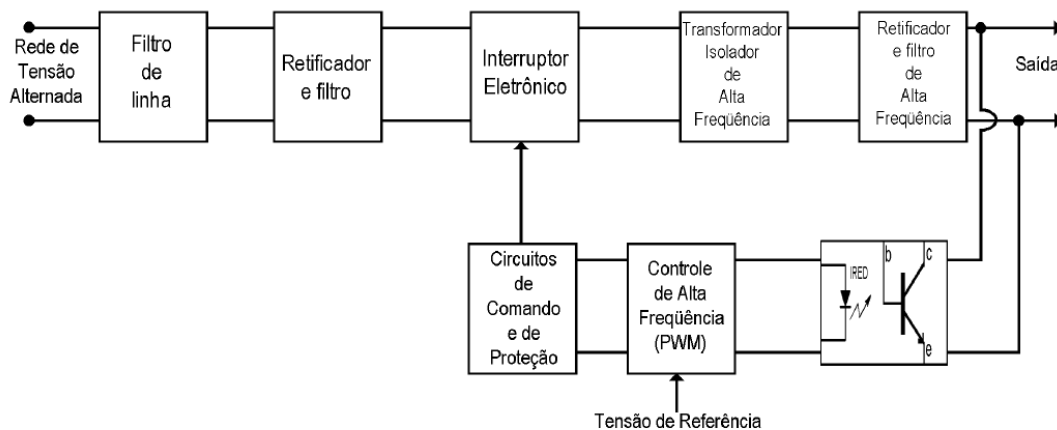


Figura 21 - Diagrama de blocos mostrando o mecanismo de regulação de tensão de uma fonte chaveada

Fonte: Fontes chaveadas, 2003 ¹⁵

Entretanto devido ao efeito do primeiro bloco funcional da fonte chaveada, a corrente à entrada (no lado da alimentação elétrica) flui em pulsos de curta duração, caracterizando uma onda periódica não senoidal e portanto, possuidora de conteúdo harmônico. ¹⁵

Uma característica própria de uma fonte chaveada é a de provocar um significativo conteúdo de 3^o harmônica na corrente drenada da rede elétrica, considerando-se que as correntes de 3^o harmônica de cada fase são somadas nos neutros dos sistemas trifásicos. O que torna preocupante o uso, cada vez maior, desse tipo de equipamento é que os prédios mais antigos não possuem os condutores de neutro dimensionados corretamente, levando-se em conta os efeitos das harmônicas.¹

Nos locais onde há grandes concentrações desses equipamentos, como nos edifícios comerciais, existe uma grande presença de harmônicas que podem afetar severamente a operação e o desempenho das instalações elétricas. A figura 22 mostra um circuito típico de uma fonte monofásica, onde prevalecem a 3^a harmônica com 78% e a 5^a com 44%, além da presença da 7^a e 9^a também. O destaque é para a taxa de distorção global de 93% e para o elevado fator de crista (2,4).

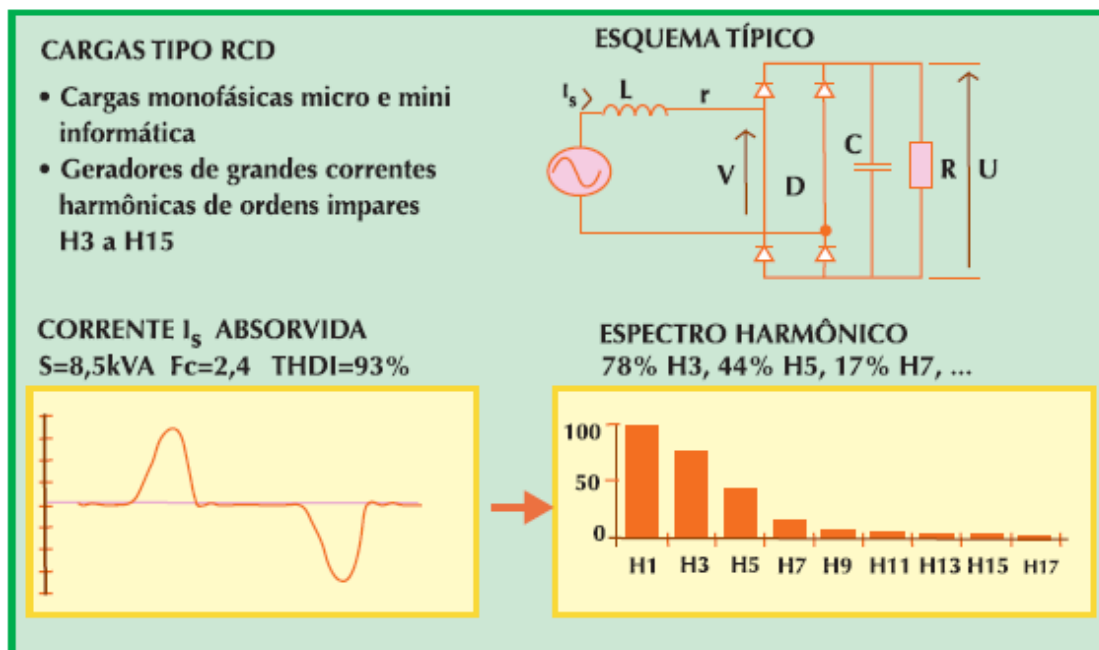


Figura 22 - Circuito típico de uma fonte de alimentação monofásica

Fonte: *Harmônicas nas instalações elétricas*³

As grandes vantagens do emprego de fontes chaveadas é que possuem alto nível de regulação de tensão, pois são capazes de suportar grandes variações na tensão de entrada, mantendo constantes os valores de saída; são compactas e apresentam perdas em condução muito menores que suas antigas concorrentes lineares.

As maiores desvantagens do uso de fontes chaveadas no processo de conversão é que o emprego desta tecnologia provoca surgimento de uma gama muito grande de harmônicas sob o ponto de vista da frequência industrial, interferência eletromagnética conduzida e irradiada e elevado conteúdo de harmônica de 3ª ordem.

7.2 CONVERSORES TRIFÁSICOS

Dentre os conversores estáticos de potência, equipamentos bastante significativos sob a ótica da geração de distorções harmônicas fundamentalmente nos segmentos industrial e comercial de maior parte, destacam-se aqueles cuja topologia elétrica inclui a Ponte de Graetz. de acordo com a Figura 23. Dentre esses pode-se citar os inversores de frequência para controle de velocidade dos motores elétricos de indução e os “No-Breaks”.

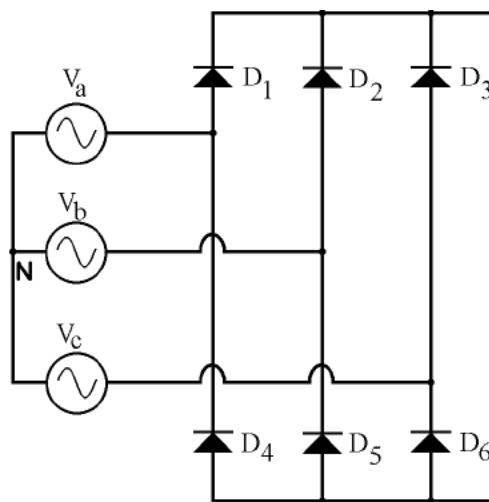


Figura 23 - Esquemático de uma Ponte de Graetz

Fonte: *Fontes chaveadas*, 2003¹⁵

Em um acionamento CA pode-se citar o inversor de frequência, a tensão de alimentação em 60 Hz é retificada e posteriormente invertida, produzindo-se tensão alternada de frequência variável a ser aplicada ao motor elétrico com o objetivo de se controlar a velocidade de giro do rotor e manter a configuração da curva do conjugado.¹

Os variadores de velocidade são uma carga muito poluidora, com alto conteúdo de harmônicas, alcançando valores de distorção de corrente superiores a 100%, o que significa que a soma das harmônicas supera o valor da fundamental.³

Na Figura 24 pode-se notar a forma de onda produzida pelo inversor de frequência com sua forma de onda bastante deformada e um amplo espectro de harmônicas, desse pode-se destacar os 81% de 5ª harmônica, 74% de 7ª, 42% de 11ª, além da presença de correntes de 13ª, 17ª e 19ª ordens.

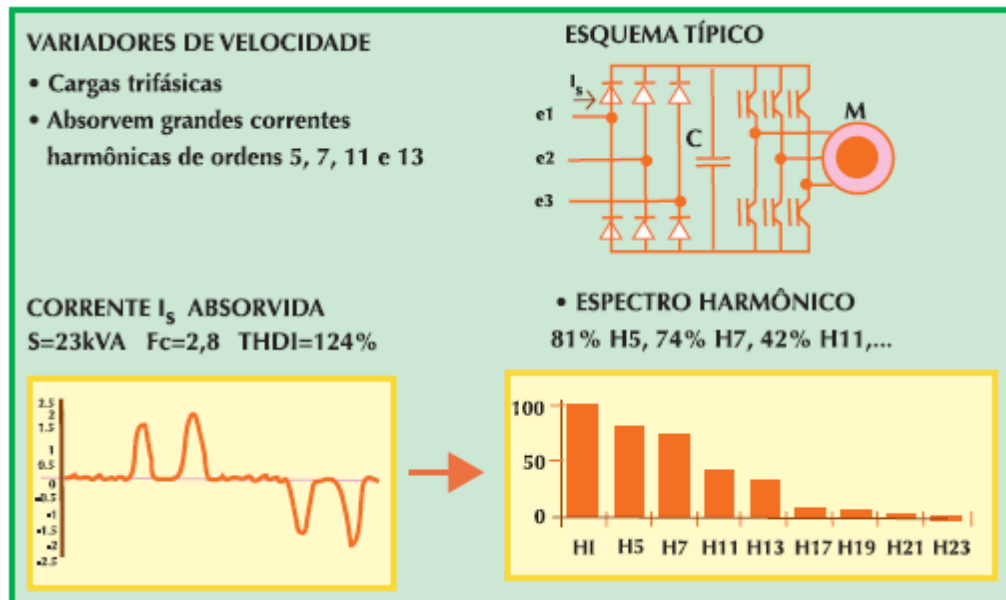


Figura 24 - Esquemático de um típico variador de velocidade

Fonte: *Harmônicas nas instalações elétricas* ³

A onda de corrente gerada pelo variador também apresenta um alto valor de crista. Fator esse que apresenta um baixo fator RMS, porém pode ser responsável por ativar dispositivos de proteção. Esse tipo de equipamento sugere uma atenção especial no caso de se utilizar transformadores para alimentação desses equipamentos.

7.3 EQUIPAMENTOS A ARCO

Estes tipo de equipamento produz uma elevada gama de distorções harmônicas, principalmente de corrente. Isto ocorre devido ao fato da inconstância do arco elétrico gerado, como é o caso dos aparelhos de solda elétrica a eletrodo, sejam eles do tipo transformador acoplado retificador ou do tipo gerador de corrente contínua. As lâmpadas à descarga (fluorescentes, vapor de sódio, vapor de mercúrio, etc.) equipadas com reatores magnéticos ou eletrônicos igualmente são fontes de elevadas distorções harmônicas.⁷

A característica tensão-corrente do arco elétrico é a não-linearidade. Após a ignição do arco elétrico a tensão decresce e a corrente aumenta, sendo limitada somente

pela impedância do sistema de potência. Isto dá ao arco a aparência de que possui uma resistência negativa por uma porção do seu ciclo de operação.⁵

7.4 FORNOS A ARCO

Uma combinação do retardo na ignição do arco e a alta não-linearidade do arco voltaico introduzem harmônicas da frequência fundamental no sistema elétrico. A corrente elétrica do forno é limitada principalmente pelos condutores do circuito alimentador, terminais de ligação e pouca contribuição do sistema de potência e do transformador do forno.⁶

No caso dos fornos industriais a arco, a impedância que limita a tendência de elevação contínua dos níveis de corrente do arco elétrico é composta, principalmente, pela impedância própria do sistema supridor, pela impedância de cablagens de média tensão, pela impedância do transformador destinado à alimentação do forno e pela impedância de condutores secundários, barramentos e terminais de conexão. Correntes da ordem de 50.000 Amperes (nos eletrodos de um forno) são relativamente comuns. O conteúdo harmônico gerado é aleatório e amplamente variável em função de uma série de fatores tais como as características da carga a ser fundida e as condições de fusão, a posição dos eletrodos e, fundamentalmente, as variações imprevisíveis no comportamento do arco elétrico entre tais eletrodos.¹

A corrente é não-periódica com conteúdos harmônicos inteiros e fracionários (esses últimos, denominados “inter-harmônicos”). Medições e estudos citados em documentações técnicas específicas revelam que, nos circuitos de alimentação de alguns tipos de equipamentos dessa natureza, as harmônicas inteiras entre a 2ª e a 7ª predominam sobre as demais. Tais estudos mencionam também que no estágio de fusão as componentes harmônicas apresentam amplitudes típicas da ordem de 8 a 10% da onda fundamental.¹

Durante o refino do material fundido (estando o mesmo já em fase pastosa ou líquida), a forma de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmônicas pares, e a amplitude chega a cerca de 2 a 3% da fundamental. Entretanto, é importante salientar que esses valores podem alterar-se e atingir patamares bem mais significativos dependendo das características construtivas do forno, de sua rotina operacional e de outras peculiaridades eventualmente existentes.¹

Devido a estas peculiaridades do arco elétrico e do espraiamento das frequências harmônicas geradas, a implementação de filtros passivos para correntes harmônicas para atuação junto a estes fornos é extremamente difícil.⁵

7.5 LÂMPADAS DE DESCARGAS

Lâmpadas de descarga, e em particular as do tipo fluorescente, são cargas cuja característica principal é também a não-linearidade. Lâmpadas de descarga operando com reatores eletromagnéticos ou eletrônicos (lâmpadas fluorescentes, a vapor de mercúrio, a vapor de sódio e a vapores metálicos), fornos a arco e equipamentos de solda a arco são cargas elétricas geradoras de distorções harmônicas uma vez que a tensão e a corrente dos arcos elétricos apresentam características não lineares. A partir do instante da ignição (início do surgimento do arco), a tensão (de arco) decresce à medida que a corrente (do arco) aumenta, situação que tende a um curto-circuito. Em algumas aplicações o comportamento do arco chega a ser aleatório e imprevisível, como no caso dos fornos e soldas a arco.⁶

No caso das lâmpadas de descarga, os reatores operam como impedâncias externas limitadoras de corrente de forma que haja a estabilização do arco (e do fluxo luminoso) de acordo com as capacidades termomecânicas dos bulbos. Tanto os reatores eletromagnéticos quanto os eletrônicos produzem distorções harmônicas. Os eletromagnéticos as produzem em função do próprio comportamento do arco (uma vez que a corrente elétrica distorcida circula através deles, fato que provoca o surgimento tensões distorcidas) e os eletrônicos, que utilizam-se de fontes chaveadas, geram distorções em função de suas próprias características eletroeletrônicas.^{1,6}

7.6 EQUIPAMENTOS DE SOLDA A ARCO

Entre os equipamentos elétricos que operam sobre os princípios do arco elétrico, além dos fornos a arco e das lâmpadas de descargas já mencionados nessa dissertação, podem-se destacar os aparelhos de solda, por serem de grande aplicação na indústria metalúrgica e na construção civil que empregam estruturas metálicas e serralherias, como fontes geradoras de harmônicas.⁶

Os aparelhos mais usados são os soldadores a transformador com núcleo móvel e soldadores sob processos MIG e TIG, muito embora empreguem-se, também, soldadores acionados por geradores rotativos de corrente contínua.^{1,5}

Esse tipo de equipamento representa uma carga que apresenta consumo de energia instável e sobre apenas uma fase. Conforme indicado na Figura 25, a forma de onda da corrente gerada pela máquina de soldar tem uma semelhança com a forma da fonte de alimentação monofásica, porém seu tempo de consumo de energia é maior, uma vez que sua passagem por zero é de menor duração.⁵

A taxa de distorção global é de 58% devida, sobretudo, à presença marcante da 3ª harmônica (56%), com discreta presença (9%) das harmônicas de ordem 5ª e 7ª.

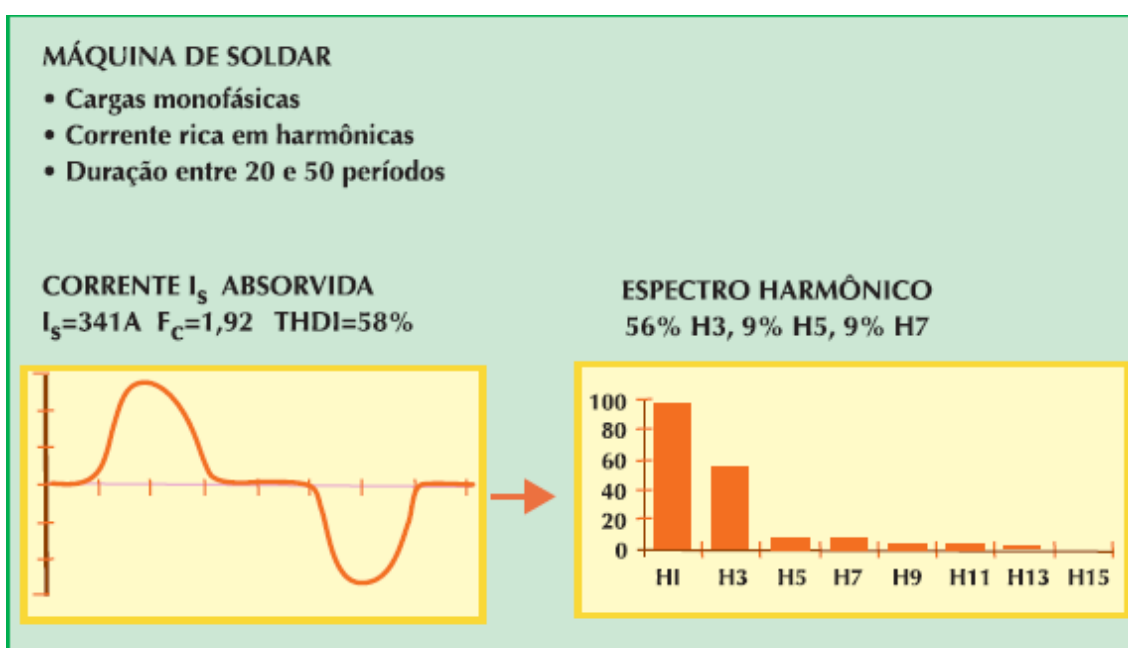


Figura 25 - Corrente absorvida e espectro harmônico para uma máquina de soldar típica.

- Harmônicas em máquinas de soldar.

Fonte: *Harmônicas nas instalações elétricas*³

8 DESENVOLVIMENTO DE TRANSFORMADORES ADEQUADOS A CARGAS NÃO LINEARES

Para o desenvolvimento desse tipo de transformador, preparado para suportar as correntes harmônicas na rede, tem que se possibilitar com mudanças estruturais o mesmo. Algumas possibilidades de adequação serão mostradas nesse capítulo.

8.1 ADAPTAÇÃO DO NÚCLEO

Tem-se como fator importante desse tipo transformador, a densidade de fluxo menor que um transformador convencional. Devido ao fato que as harmônicas no secundário do transformador causam uma corrente harmônica no primário, aumentando assim a densidade de fluxo do transformador.

Para se evitar essa densidade de fluxo um método bastante utilizado é o aumento do tamanho do núcleo, caso contrário a perda no núcleo será menor. A adição no tamanho do núcleo em um transformador adaptado ao fator K o tornará também mais silencioso.

8.2 ADAPTAÇÃO DO NEUTRO

Quando há correntes harmônicas com múltiplas de três (3,6,9, etc), as correntes da sequência zero fluem através do neutro, mesmo que as correntes de fase estejam balanceadas. Somando-se ao fato que essas correntes podem gerar um sobreaquecimento no neutro, também gera uma tensão elevada entre o neutro e o terra¹⁷.

Uma maneira de ajustar o transformador a esse excesso de correntes é sobredimensioná-lo. Em situações normais a medida tomada é dobrar a impedância do condutor. Essa medida é comumente usada em transformadores de média tensão¹³.

8.3 ADAPTAÇÃO DAS BLINDAGENS ELETROSTÁTICAS

Blindagens eletrostáticas são comumente especificadas entre os enrolamentos primário e secundário. A presença de um escudo tende a diminuir a capacitância que surge entre os enrolamentos, isso reduz o acoplamento dos transientes entre os dois enrolamentos. Distorções nas tensões produzidas por equipamentos ligados ao secundário do transformador serão reduzidas, mas não eliminados por completo no enrolamento primário do transformador.¹³

As blindagens não são desenvolvidas para reduzir as correntes harmônicas. Elas possuem um efeito pequeno sobre as correntes harmônicas, mas pela virtude de seu acoplamento com os enrolamentos, que possuem tais correntes, perdas adicionais devido ao aquecimento são induzidas. Para se conseguir uma redução significativa sobre as correntes harmônicas é necessário o uso de filtros.¹³

Desde que as blindagens estejam em um campo magnético entre os enrolamentos primário e secundário, perdas por correntes parasitas podem ocorrer na blindagem, essas são aumentadas pelas correntes harmônicas. É de suma importância que essas blindagens sejam desenvolvidas para que as correntes parasitas produzidas pelas harmônicas não resultem em aquecimento excessivo no transformador. ¹³

Essas blindagens também servem para proteger o secundário dos transientes que podem haver no primário. Esse fato é especialmente importante para transformadores com secundários não aterrados. Esses transientes podem gerar no secundário picos de tensão. Esses picos de tensão podem prejudicar os enrolamentos de tensão do secundário e os equipamentos nele ligado. Essas blindagens reduzem drasticamente os transientes acoplados entre os dois enrolamentos. ¹³

8.4 ADAPTAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE

O material isolante usado nas bobinas deve ser preparado para suportar níveis mais altos de temperatura. Em transformadores com $K=1$ é utilizado material isolante de classe F nos enrolamentos primários e secundários. Esses são mudados para classe H, garantindo assim uma capacidade maior que os anteriores, citado no capítulo sobre transformadores a seco.

8.5 ADAPTAÇÃO NOS ENROLAMENTOS

Sabendo-se que as correntes de harmônicas aumentam substancialmente as perdas devido as correntes parasitas nos enrolamentos, essas devem ser consideradas no cálculo do aumento da temperatura quando se vai fabricar um novo transformador. Para cada enrolamento as perdas por correntes parasitas, em pu, na região de maior temperatura podem ser definidas com a frequência de operação em rms em termos da Equação 52.

$$P_{LL}(pu) = I(pu)^2 \times (1 + F_{HL} \times P_{EC-R}(pu))pu \quad (52)$$

Onde tem-se:

$P_{LL}(pu)$ – é a perda nas cargas em pu;

$I(pu)$ – é corrente rms em pu;

F_{HL} - é o fator de perdas nos enrolamentos devido as correntes de parasitas;

$P_{EC-R}(pu)$ - é a perda em pu devido as correntes parasitas nos enrolamentos nas condições rms.

Para ajustar a densidade de perdas em pu em cada um dos enrolamentos, o efeito do F_{HL} deve ser conhecido em cada um dos enrolamentos. Assim o enrolamento de baixa tensão pode ter sua densidade de perdas menor com o aumento dos enrolamentos. Mas é importante dizer que mesmo para um único valor de perdas os efeitos em cada um dos enrolamentos pode ser diferente. Assim tem-se que redimensionar os enrolamentos de maneira individual.

8.6 MUDANÇAS ESTRUTURAIS

Nesse capítulo serão mostradas as diferenças entre dois transformadores com a mesma classe de tensão e com a mesma potência, porém com diferentes valores de Fator K, para esses exemplos será usado os valores $K=1$ e $K=4$.

No caso do GEAFOL^R as mudanças estruturais são as mais aparentes. Como podem ser vistas nas Figuras 26 ($K=1$) e 27 ($K=4$), onde são mostrados transformadores de 1000kVA e de 900kVA de potência respectivamente e classe de tensão 25kV. Como se pode perceber mesmo tendo uma diferença de 10% em questão de potência ele possuem a mesma dimensão. Há um aumento na quantidade de material usado nos enrolamentos, assim também como aumento do espaçamento entre o núcleo e os enrolamentos. Proporcionando assim que o ar circule com mais facilidade no interior do transformador, garantindo o seu rendimento.

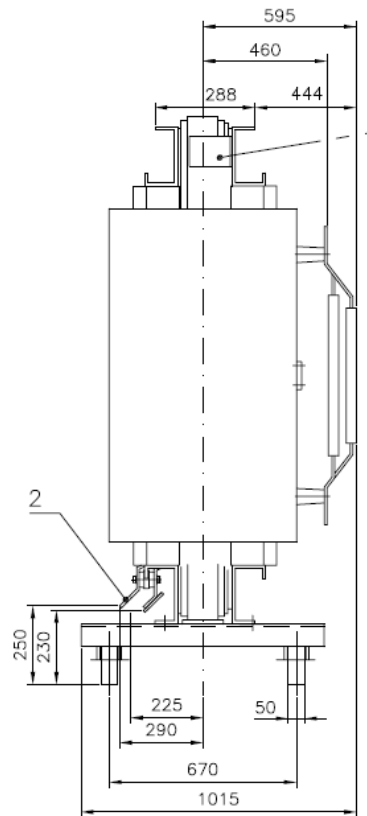


Figura 26 - Transformador com Fator $K = 1$

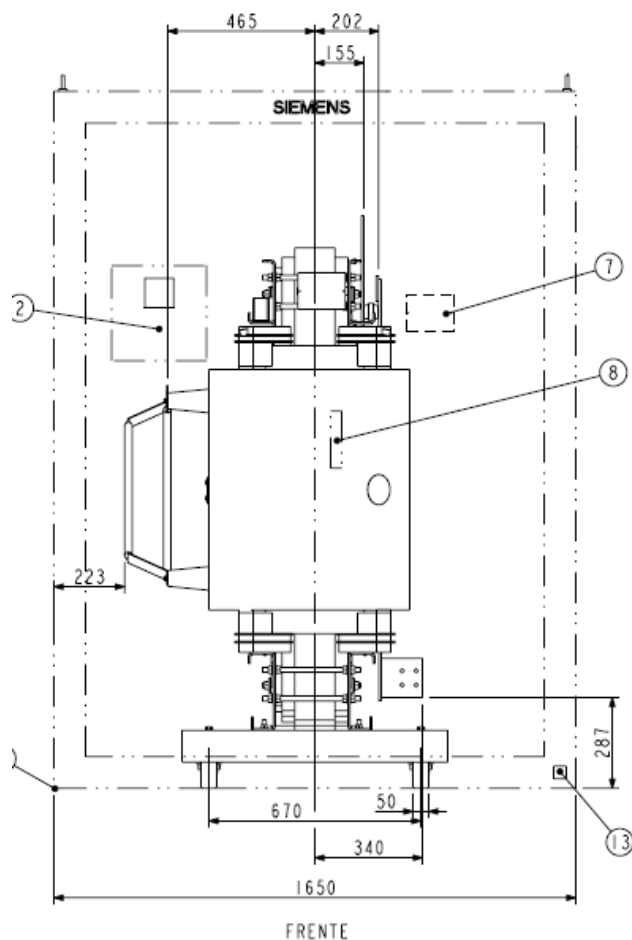


Figura 27 - Transformador GEAFOL com Fator $K = 4$

Essa diferença é devida as medidas adquiridas pela SIEMENS para adaptar as correntes harmônicas e ao aumento dos enrolamentos e do diâmetro do distanciamento entre os enrolamentos, permitindo assim, que o ar quente flua com mais facilidade dentro do transformador.

CONCLUSÃO

Este trabalho estabeleceu como principal alvo de análise o transformador a seco e sua relação com as cargas harmônicas, relacionado-as com as perdas e efeitos térmicos sofridos pelos transformadores. Foi realizado também, um esclarecimento sobre as harmônicas e seu cálculo através da Série de Fourier, um comparativo entre transformadores a seco e a óleo isolante, uma descrição do Fator K e suas utilizações em transformadores a seco, além de uma comparação matemática entre as expressões do Fator K com a da F_{HL} .

Pode-se concluir que os transformadores a seco possuem várias vantagens em relação aos transformadores a óleo. Dentre essas vantagens pode-se citar o tamanho menor, a maior segurança. Outras vantagens podem ser analisadas na Tabela 2.

Finalmente, foram apresentadas possíveis abordagens sobre como corrigir os transformadores, a fim de garantir sua funcionalidade, mesmo quando exposto a harmônicas. A partir dessas análises foi possível quantificar as melhorias com relação ao tempo de vida útil e funcionamento de transformadores a seco, percebendo-se que, ao dimensionar corretamente um transformador é possível permitir seu correto funcionamento, mesmo quando esse é submetido a cargas harmônicas.

REFERÊNCIAS

- [1] ISONI, Marcos; **A Moderna Eficientização Energética e seus Possíveis Efeitos sobre o Desempenho Operacional de Equipamentos e Instalações Elétricas - Distorções Harmônicas – Uma Revisão de Conceitos Gerais.**, 2001.
- [2] ARRIGALA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER P. S., **Power System Harmonics.** 1985.
- [3] MORENO, Hilton; **Harmônicas nas Instalações Elétricas**, 2001.
- [4] HAYKIN, Simon; VEEN, Barry V.; **Sinais e Sistemas**, 1999.
- [5] DIAS, Guilherme A. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais**; 1998.
- [6] MARTINS, Joel; **Estudo da Expectativa de Vida do Transformador de Distribuição de Energia Elétrica, da Deterioração do Óleo Mineral Isolante e da Isolação Celulósica.** 2004.
- [7] ISONI, Marcos, **A Eficientização Energética e seus Efeitos sobre Equipamentos e Instalações**, 2004.
- [8] PAICE, Derek A.; **Power Electronic Converter Harmonics**, 1995.
- [9] BOMBASSARO, Paulo R., **Atendimento a Cargas Geradoras de Harmônicos em Sistemas Primários de Distribuição**, 2002.
- [10] Vários Autores; **Electric power transformer engineering**, 2004.
- [11] SIMONE, Gilio A.; **Transformadores**, 2001.
- [12] PIERCE, Linden W.; **Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents**, 1996
- [13] **IEEE Std C57.110TM-2008**
- [14] BARBOSA, Renato J. S., ANDRADE, José C. B., TERRA, Luiz D. B.; **Estimativa do Fator K para transformadores com Cargas Distorcidas**, 2008.
- [15] MEHL, Evaldo - **Fontes Chaveadas**, Ewaldo L. M. Mehl, 2003.
- [16] FILHO, João M.; **Manual de equipamentos elétricos**, 2005.
- [17] FRANK, Jerome M.; **Origin, Development, and Design of K-Factor Transformers**, 1997.
- [18] Linden W. Pierce, **Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers**, 1994.

- [19] Fuchs E. F., Roesler D. J., Kovacs K. P., **Aging of Electrical Appliances due to Harmonics of the Power Systems Voltage**, 1988.
- [20] Vários autores, **K-Factor Dry Type Transformers – Type FHK**, 1997
- [21] Manual SIEMENS GEAFOL
- [22] HERNÁNDEZ, J.L. ; CASTRO; M.A., CARPIO, J. ; Colmenar, A. **Harmonics in Power Systems**, 2009