

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE GOIÁS Uni-ANHANGUERA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**

FERNANDO JULIO BARROS
PAULO VINICIUS CAMPOS DA SILVA

GOIÂNIA
Novembro/2019

**FERNANDO JULIO BARROS
PAULO VINÍCIUS CAMPOS DA SILVA**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES NO
DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao núcleo de ciências exatas curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário de Goiás – Uni-ANHANGUERA, sob orientação do Professor Especialista André Silveira Neves, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Goiânia
Novembro/2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

FERNANDO JULIO BARROS

PAULO VINÍCIUS CAMPOS DA SILVA

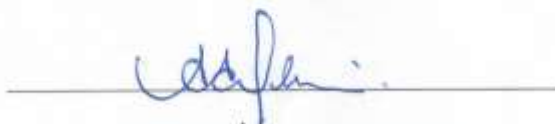
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES NO DIMENSIONAMENTO
DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário de Goiás
– Uni-ANHANGUERA, defendido e aprovado em ____ de ____ de ____ pela banca
examinadora constituída por:



Professor Esp. André Silveira Neves

Orientador



Professor Me. Álvaro Adelino Oliveira

Membro



Professor Me. Murilo Parreira Leal

Membro



Professor Esp. Romes de Paula Machado Júnior

Membro

Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.

Nikola Tesla

RESUMO

O uso de semicondutores na alimentação de equipamentos elétricos e eletrônicos traz grandes benefícios como menor custo, maior eficiência e mais conforto, porém também traz desvantagens pois, quando são introduzidos no sistema elétrico produzem correntes distorcidas em relação a corrente senoidal. Por consequência, também é gerada uma deformação na tensão. As cargas que produzem esses efeitos são denominadas cargas não-lineares. O presente trabalho tem por finalidade apresentar os efeitos que essas cargas trazem aos transformadores de potência; como essas consequências podem afetar o seu dimensionamento e mostrar algumas medidas que podem ser adotadas para mitigar esses efeitos. Para realizar a análise foram feitas simulações utilizando o software Multisim, onde foi modelado um transformador trifásico com os parâmetros obtidos através de um ensaio no Laboratório de Metrologia em Equipamentos (LABMETRO) da Universidade Federal de Goiás e a carga não linear foi representada por um retificador trifásico alimentando uma carga indutiva. Através da análise de Fourier, o Multisim apresentou o espectro harmônico da carga, a magnitude de cada uma das correntes, bem como a distorção harmônica total (TDH) e esses dados foram utilizados para o cálculo e escolha do *K-factor* cujo valor obtido foi 5,23 e por equivalência obteve-se um Fator-K de 1,12. Portanto, um transformador alimentando uma carga dentro dos moldes da simulação realizada deverá ser dimensionado especificando-se um *K-factor* igual a 7, que é o valor normalizado imediatamente superior ao valor calculado, ou aplicar o Fator K, que mostra que se deve utilizar apenas 89% da potência nominal do transformador para que as consequências das distorções harmônicas não potencializem suas perdas, e assim diminuam sua vida útil.

PALAVRAS-CHAVE: *K-factor*. Fator-K. Harmônicas.

LISTA DE SIGLAS

AHC	Active Harmonic Conditioners
ANSI	American National Standards Institute
ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
DSP	Digital Signal Processor
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
NI	National Instruments
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SPICE	Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Ampère
B	Indução máxima do Núcleo
DITH%	Distorção Harmônica Total de Ordem h
DTT%	Distorção Harmônica Total de Tensão
DTTP%	Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Pares não Múltiplas de 3
DTTi%	Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Ímpares não Múltiplas de 3
f	Frequência
h	Ordem Harmônica
hmin	Ordem Harmônica Mínima
hmax	Ordem Harmônica Máxima
Hz	Hertz
I	Corrente Elétrica
Ih	Corrente Harmônica
Ir	Corrente Nominal
KΔP	Fator de Perda Adicional
KDR	Fator de Resistência
PDC	Perdas nos Enrolamentos
PEC	Perdas por Correntes Parasitas nos Enrolamentos
PH	Perdas por Histerese
PF	Perdas por Correntes Parasitas no Núcleo
PSL	Perdas Adicionais
PLL	Perdas em Carga
R	Resistência
V	Volt
Vh	Tensão Harmônica
V1	Tensão Fundamental
Z	Impedância

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sinal de corrente de entrada de um retificador trifásico.	14
Figura 2. Visão geral das perdas nos transformadores.	15
Figura 3. Estrutura básica de um filtro passivo.	21
Figura 4. Filtro ativo e harmônicas em derivação.	22
Figura 5. Exemplo de medição das tensões de entrada e saída de um transformador.	23
Figura 6. Ligações para ensaio de curto-circuito no transformador.	24
Figura 7. Dados gerados no ensaio em curto-circuito.	25
Figura 8. Configuração de transformador trifásico na configuração delta – estrela alimentando a carga não-linear.	26
Figura 9. Medição das tensões de linha e de fase no primário e no secundário do transformador.	26
Figura 10. Forma de onda da corrente no lado da baixa tensão do transformador após a simulação.	27
Figura 11. Espectro harmônico da carga.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise de Fourier apresentando a magnitude das correntes harmônicas, o número de harmônicas e a distorção harmônica total (TDH).	28
Tabela 2. Equivalência entre K-factor e Fator-K.	29
Tabela 3. Cálculo do K-factor.	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1. Transformadores	13
2.2. Componentes harmônicas	13
2.3. Perdas em transformadores	14
2.4. A influência das correntes harmônicas nas perdas do transformador	17
2.5. Determinação das perdas para transformadores sob cargas não-lineares	18
2.5.1. K-factor	18
2.5.2. Fator K	18
2.5.3. Fator de perda adicional	19
2.6. Grandezas harmônicas de acordo com o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)	19
2.7. Filtros de harmônicas	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. O software Multisim	23
3.2. Levantamento dos dados para cálculo do K-factor	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Forma de onda da corrente	27
4.2. Espectro harmônico e magnitude das correntes harmônicas geradas pela carga	27
4.3. Cálculo e aplicação do K-factor	29
4.4. Considerações do fabricante	31

5. CONCLUSÃO	32
5.1. Conclusões e limitações do estudo	32
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	33
 REFERÊNCIAS	 34
 ANEXO B. Dados complementares do relatório de ensaio do transformador.	 37
 ANEXO C. Relação dos instrumentos utilizados no ensaio do transformador.	 38
 ANEXO D. Limites para aprovação do transformador após o ensaio.	 39

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o número de máquinas e equipamentos que utilizam sistemas eletrônicos na sua alimentação tem aumentado exponencialmente tanto na indústria quanto nas residências. Esses dispositivos utilizam um sistema de comutação de alimentação através de um retificador na entrada que absorve correntes harmônicas. Outros dispositivos que causam distorções harmônicas devido ao seu princípio de funcionamento são as lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga, máquinas de solda e equipamentos com núcleo magnético saturado. Independente do princípio de funcionamento, todas as cargas que podem causar distorções harmônicas são denominadas cargas não-lineares (SCHNEIDER ELETRIC, 2015).

As correntes harmônicas que circulam no sistema de distribuição aumentam as perdas elétricas, limitando a capacidade de transporte de demanda, podendo ainda provocar a queima de capacitores e fusíveis, sobreaquecimento de transformadores e motores, medições incorretas de energia elétrica, dentre outros (KAGAN, OLIVEIRA e ROBBA, 2015).

De acordo com Moreno (2001), um dos problemas causados pelas harmônicas é o aquecimento excessivo no enrolamento de transformadores. Em decorrência do efeito pelicular, uma vez que a frequência do sinal aumenta, a corrente elétrica tende a circular pela periferia do condutor aumentando as perdas por efeito joule devido ao aumento da resistência desse condutor.

Delaere e Desmet (2005), corroboram com o autor citado acima afirmando que a presença de correntes harmônicas nos transformadores traz como principal consequência o aumento nas perdas, elevando sua temperatura de operação e assim danificando a isolação das bobinas e reduzindo drasticamente sua vida útil.

Os mesmos autores, apresentam algumas medidas que podem ser tomadas para minimizar os efeitos das harmônicas nos transformadores. Uma delas é a redução da carga máxima do transformador através do cálculo e aplicação do Fator K à sua potência nominal. Outra medida é a utilização do K-factor, desenvolvida por fabricantes dos Estados Unidos é uma medida que deve ser tomada na fase de projeto do transformador considerando que ele trabalhará sob cargas não-lineares.

Segundo Oliveira (2015), os filtros são a medida mais usada para atenuar os efeitos das distorções harmônicas, tendo como objetivo a redução da amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmônicas. Relativo à estrutura, os filtros são divididos em filtro do tipo passivo, filtro do tipo ativo e filtro do tipo híbrido, que é uma combinação dos dois anteriores. Já relativo à conexão do filtro no sistema elétrico, eles são divididos em filtros série e filtros paralelos, também chamado de shunt.

Os filtros passivos são dispositivos compostos por indutores e capacitores e podem ajudar tanto na atenuação de harmônicos quanto na correção de fator de potência. Esses filtros criam uma baixa impedância que absorvem as correntes harmônicas na frequência em que o filtro estiver sintonizado, sendo assim deve-se ter um filtro para cada harmônica que se deseja eliminar (LIMA, 2017).

Também conhecidos como condicionadores ativos de harmônicas, os filtros ativos funcionam de maneira simples. Eles fornecem à carga não-linear a corrente harmônica requerida pela mesma, fazendo com que o sistema elétrico comum forneça apenas a corrente fundamental. Esse filtro apresenta algumas vantagens em relação ao filtro passivo pois é mais flexível e trabalha em tempo real reagindo às correntes harmônicas a medida em que elas vão surgindo podendo eliminá-las até a vigésima quinta ordem (SCHNEIDER ELETRIC, 2015).

Neste contexto, torna-se oportuno um estudo das causas das distorções harmônicas bem como o impacto que estas podem causar nos transformadores, a fim de calcular de forma mais eficiente a potência máxima que o transformador pode oferecer.

Este trabalho visa apresentar os efeitos causados pelas cargas não-lineares no dimensionamento de transformadores de potência, bem como estudar os efeitos das correntes harmônicas no seu dimensionamento, através de simulações realizadas no software Multisim.

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema em questão, apresentando de forma resumida as causas das correntes harmônicas, bem como as suas consequências para os transformadores de potência.

O capítulo 2 aborda estudos relacionados a este trabalho, apresentando algumas soluções para o problema.

O capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados para a realização da pesquisa.

O capítulo 4 traz os resultados e discussões obtidos através das simulações no Multisim, bem como o valor do K-factor que deve ser aplicado ao transformador.

O capítulo 5 mostra as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Transformadores

Os transformadores são elementos de suma importância para o sistema elétrico pois têm a função de adequar o nível de tensão à necessidade de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica (CAMARGO, 2007). No Brasil, enquanto na geração os níveis variam de 6,9 quilovolts (kV) a 30 kV, na transmissão esses níveis vão de 230kV a 750kV, enquanto na distribuição de 34,5 kV a 127 volts (GOMES, 2012).

Basicamente, um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos acoplados por meio de um fluxo magnético comum. Se um desses enrolamentos, o primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, então será produzido um fluxo alternado cuja amplitude dependerá da tensão do primário, da frequência da tensão aplicada e do número de espiras. Uma porção desse fluxo, denominado fluxo mútuo, concatena um segundo enrolamento, o secundário, induzindo neste uma tensão cujo valor depende do número de espiras do secundário, assim como da magnitude do fluxo comum e da frequência. Ao se estabelecer uma proporção adequada entre os números de espiras do primário e do secundário, praticamente qualquer relação de tensões, ou relação de transformação, pode ser obtida (UMANS, 2014, p. 63-64).

Os transformadores funcionam como um elo entre o sistema de geração e distribuição de energia e o consumidor final. Quando uma tensão alternada é conectada ao primário do transformador, uma tensão é induzida no seu secundário sendo que essa tensão dependerá de sua relação de transformação. Esse equipamento possibilita a elevação dos níveis de tensão gerados pelas usinas para que a potência gerada seja transmitida a longas distâncias. Ao chegar próximo consumidor, os níveis de tensão são rebaixados nas subestações e seguem para o sistema de distribuição das concessionárias onde a tensão é novamente rebaixada para ser entregue às unidades consumidoras.

2.2. Componentes harmônicas

Uma tensão ou corrente harmônica são sinais senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental de alimentação, dessa forma pode-se dizer que um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal (MORENO, 2001).

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência. Existem harmônicas de ordem ímpar e harmônicas de ordem par. As harmônicas de ordem ímpar são comuns em instalações elétricas em geral enquanto as de ordem par surgem no caso de haver assimetria do sinal devido a presença da componente contínua (MORENO, 2001).

Harmônicas de sequência nula (harmônicas homopolares), são bastante prejudiciais às redes elétricas, pois as correntes harmônicas nas fases somam-se no condutor de neutro,

trazendo vários problemas para a instalação e equipamentos a ela ligados (DELAERE e DESMET, 2005).

A Figura 1 mostra um sinal de corrente típico de um retificador trifásico, apresentando a componente fundamental, o espectro harmônico de algumas de suas componentes harmônicas ímpares, distorção harmônica total da corrente (TDHI), e o Fator de Crista (FC) que é a proporção entre o valor de pico e o valor rms.

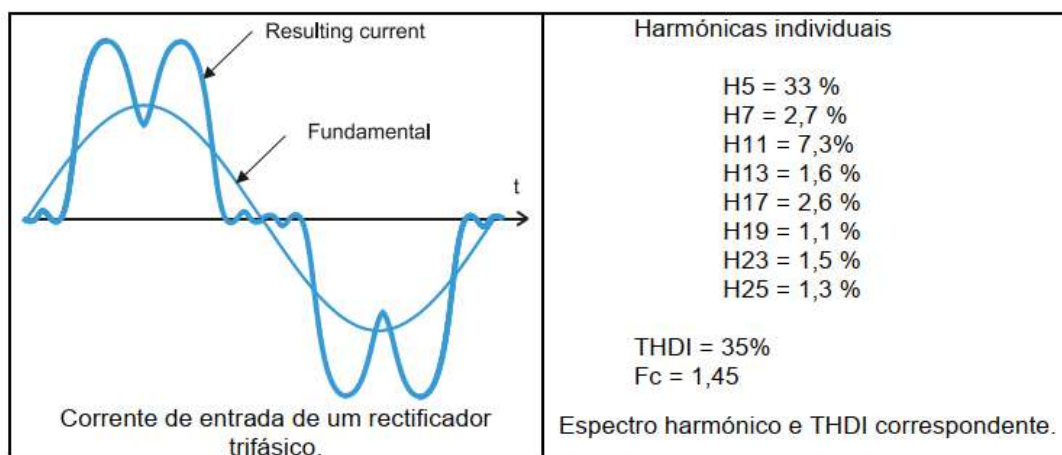


Figura 1. Sinal de corrente de entrada de um retificador trifásico.

Fonte: Schneider Electric (2015).

Esse tipo de deformação geralmente é imposto por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente como transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação. Outros elementos não lineares são as cargas eletrônicas que produzem descontinuidades na corrente devido ao chaveamento dos conversores tais como: retificador carregador; inversores de frequência; fonte de alimentação monofásica (MORENO, 2001).

2.3. Perdas em transformadores

Os transformadores quando estão operando sob carga estão sujeitos a perdas nos enrolamentos causadas tanto pelas correntes de carga quanto pelas correntes parasitas (Correntes de Foucault) que circulam neles; perdas no núcleo: causadas por histerese e também pelas correntes parasitas; e outras perdas adicionais causadas na união de núcleo, e na estrutura e tanque do transformador. (SANTOS, 2012).

A Figura 2 mostra um diagrama que traz uma visão geral das perdas nos transformadores.



Figura 2. Visão geral das perdas nos transformadores.

Onde

P_{DC} são as perdas DC nos enrolamentos;

P_{EC} são perdas por correntes parasitas nos enrolamentos;

P_H são as perdas por histerese;

P_F são as perdas decorrentes de correntes parasitas no núcleo.

A perda no núcleo é composta pelas perdas por histerese (P_H) e pelas perdas causadas por correntes parasitas (P_F). Essas perdas são mostradas nas equações (2.1) e (2.2), respectivamente (DELAERE e DESMET, 2005).

$$P_H = v f B^n K_h \quad (2.1)$$

$$P_F = K_e f^2 B^2 \tau_{\text{chapa}}^2 v \quad (2.2)$$

Onde

K_E e K_h são constantes que variam de acordo com material do núcleo;

v é o volume do material (m^3);

n é um número que depende do tipo de material;

τ_{chapa} é a espessura da laminação (mm);

B é o valor máximo de indução no núcleo dado em (Wb/m^2);

f é a frequência de alternância do campo magnético (Hz).

A perda nos enrolamentos que são as perdas em carga (P_{LL}) é composta pelas perdas dc nos enrolamentos ($I^2 R$), pelas correntes parasitas (P_F) e pelas perdas adicionais como perdas em partes estruturais, tanques, etc. (DELAERE e DESMET, 2005).

Essas perdas são mostradas na equação (2.3).

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{EC} + P_{SL} \quad (2.3)$$

Onde

P_{LL} são as perdas em carga;

P_{DC} é perda devido à corrente de carga e à resistência em corrente contínua (dc) dos enrolamentos;

P_{EC} são as perdas por correntes parasitas nos enrolamentos;

P_{SL} são perdas adicionais geradas por dispersão em abraçadeiras, tanques etc.

As perdas por corrente contínua nos enrolamentos (P_{DC}) são dadas pela equação (2.4).

$$P_{DC} = I^2 R \quad (2.4)$$

Onde

I é a corrente de carga

R é a resistência equivalente em corrente contínua dos enrolamentos.

Portanto essa parcela de perdas é proporcional ao quadrado da corrente de carga, incluindo as componentes harmônicas, e não depende da frequência como é o caso das perdas no núcleo.

Para esclarecimento sobre a geração de correntes parasitas nos enrolamentos, pode-se afirmar que fluxos dispersos geram tensões através de cada condutor. Estas tensões são responsáveis pela circulação de correntes parasitas nesses enrolamentos. Estes fluxos correm axialmente através das bobinas e se curvam radialmente através dos enrolamentos, tendo maior concentração entre os enrolamentos da baixa e alta tensão. Devido a maior concentração de corrente parasita no início e final dos enrolamentos, há um aumento significativo da temperatura nessas regiões (HLATSHWAYO, 2013).

As linhas de fluxos dispersos no interior dos enrolamentos de alta tensão geralmente se dividem em composições, com uma parcela seguindo em direção ao núcleo, tanque, partes estruturais ou ainda por caminhos de retorno com alta relutância não magnética, como ar para transformadores do tipo seco, ou para o óleo para transformadores imersos em líquidos isolantes. No enrolamento de baixa tensão essa composição de fluxo disperso tende a ter maior concentração para o lado da coluna do núcleo, devido sua baixa relutância no caminho do retorno. Geralmente o lado interno do enrolamento de baixa tensão apresenta maior perda por correntes parasitas, se comparado com o de alta tensão (HLATSHWAYO, 2013).

2.4. A influência das correntes harmônicas nas perdas do transformador

A perda I^2R deve-se à circulação de correntes pela resistência dos enrolamentos. É mensurada medindo a resistência em corrente contínua em plena carga nos enrolamentos. Também conhecida como perda ôhmica, é proporcional ao quadrado da intensidade da corrente e somado com componentes harmônicas, mas independe da frequência (DELAERE e DESMET, 2005). Como não existe nenhum método de teste que meça individualmente as perdas por correntes parasitas (Foucault) e por dispersão, adota-se que as perdas por dispersão e correntes parasitas são a subtração da perda total pela ôhmica.

A equação (2.5) mostra como é obtida as perdas por correntes parasitas juntamente com as perdas por dispersão.

$$P_{LL} - I^2R = P_{EC} + P_{SL} \quad (2.5)$$

Assume-se que a perda por correntes parasitas varia com o quadrado da corrente em rms e o quadrado da frequência harmônica de ordem h , conforme a equação (2.6) mostrada abaixo.

$$P_{EC} = P_{EC,R} = \sum_{h=1}^{h=h_{m\acute{a}x}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 \quad (2.6)$$

Onde

h = ordem da harmônica 1, 2, 3 e etc.;

$h_{m\acute{a}x}$ = a maior ordem de harmônica a ser considerada;

I_h = corrente da harmônica de ordem h , amperes;

I_R = corrente nominal, amperes;

$P_{EC,R}$ = perda por corrente de Foucault em corrente e frequências nominais.

As perdas no núcleo ocorrem devido a corrente de magnetização, que não incluem harmônicas, e são muito pequenas quando comparadas às correntes de carga. Sendo assim a norma ANSI/IEEE C57.110 considera que a presença de harmônica não contribui para o aumento das perdas no núcleo (DELAERE e DESMET, 2005).

Porém Lisita et al. (2003), afirma que a presença de harmônicas podem aumentar as perdas no núcleo pois a componente dc da corrente de carga somada a essas distorções fazem com que haja uma indução maior nas partes que formam o núcleo, levando a um aumento da corrente de excitação, indução por correntes parasitas não-senoidais e até a elevação do ruído sonoro do transformador. Estes fatores somados, causam um aumento das perdas no núcleo.

Sendo assim nota-se que a presença de componentes harmônicas no transformador, aumenta de forma indireta as perdas no núcleo. A componente dc da corrente de carga juntamente com as distorções harmônicas causam um aumento na indução no núcleo levando assim a uma elevação da corrente de excitação. Consequentemente esse fato potencializa as perdas no núcleo.

2.5. Determinação das perdas para transformadores sob cargas não-lineares

Quando o assunto é dimensionamento de transformadores é de suma importância a determinação das perdas adicionais que o equipamento está submetido devido cargas não lineares conectadas a ele. Para melhor escolha existem três métodos que auxiliam na seleção da potência para cada caso.

2.5.1. K-factor

O K-factor foi desenvolvido por fabricantes de transformadores por meio do *Underwrits Laboratories* nos Estados Unidos. É um fator calculado considerando o aumento das perdas parasitas a fim de especificar um transformador projetado para lidar com esse fato (DELAERE e DESMET, 2005).

Um dos métodos usados para dimensionar com mais precisão um transformador que lide com perdas adicionais é o K-factor. Com um aparelho medidor de qualidade da energia, determina-se um transformador com um K-factor acima dos valores normalizados que são: 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50.

Se uma carga for puramente linear (corrente senoidal) ela terá o seu K-factor unitário, ou seja, o fator indica o nível de correntes parasitas (Foucault) que serão K vezes o valor na perda da frequência fundamental de alimentação. Com isso transformadores projetados com K-factor tem suas perdas muito baixas na frequência fundamental.

A equação (2.7) mostra como é calculado o K-factor.

$$K = \sum_{h=2}^{h=h_{m\acute{a}x}} h^2 I_h^2 \quad (2.7)$$

Onde

h = é o número de harmônicas;

I_h = a fração da corrente total de carga rms na harmônica de número h.

2.5.2. Fator K

Esse método consiste em estimar o quanto a potência de um transformador comum deve ser reduzida para que a sua perda total por cargas harmônicas seja menor que a perda fundamental projetada (MORENO, 2001).

$$k = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} \left(h^q \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Onde

e é a relação entre perdas de correntes parasitas na frequência fundamental e as perdas ôhmicas, ambas na temperatura de referência;

h é o número de harmônicas;

I é o valor rms da corrente fundamental, incluindo todas harmônicas;

I_h é a intensidade da corrente da harmônica h , dada em ampères;

I_1 é a intensidade da corrente fundamental, dada em ampères;

q é uma constante exponencial que é dependente do tipo de enrolamento e da frequência. São valores típicos: 1,7 para transformadores de seção transversal redonda ou retangular em ambos enrolamentos e 1,5 para aqueles com enrolamentos de baixa tensão laminados.

2.5.3. Fator de perda adicional

O terceiro método utilizado no dimensionamento de transformadores é conhecido como **fator de perda adicional**. É um fator que considera tanto a resistência-série equivalente em corrente contínua (R_{DC}) quanto o valor da resistência-série em corrente alternada (R_{AC}).

Enfim, conhecendo espectro harmônico da corrente de carga pode-se calcular o fator de perda adicional ($K_{\Delta P}$) através da somatória das perdas dependentes de frequência em cada frequência que afeta a RAC (DELAERE e DESMET, 2005).

$$K_{\Delta P} = \sum_{f > f_1} K_{\Delta R}(f) \left(\frac{I_f}{I_r} \right)^2 \quad (2.9)$$

Onde

$K_{\Delta P}$ é o fator de perda adicional;

$K_{\Delta R}$ é o fator de resistência;

I_f é a corrente na frequência harmônica f , dada em ampères;

I_r é a corrente nominal, dada em ampères.

2.6. Grandezas harmônicas de acordo com o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)

O Módulo 8 do PRODIST, 2018, define as expressões para o cálculo das grandezas de Distorção harmônica total de ordem h ($DIT_H\%$); Distorção harmônica total de tensão ($DTT\%$); Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 ($DTT_P\%$); Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 ($DTT_i\%$) (ANEEL, 2017).

A (DIT_H %) é calculada conforme a equação (2.10).

$$DIT_H \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.10)$$

A ($DTT\%$) é calculada conforme a equação (2.11).

$$DTT\% = \frac{\sqrt{(\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2)}}{V_1} \times 100 \quad (2.11)$$

A (DTT_P %) é calculada conforme a equação (2.12).

$$DTT_P = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.12)$$

A (DTT_i %) é calculada conforme a equação (2.13).

$$DTT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.13)$$

Onde

V_h é a tensão harmônica de ordem h;

h é a ordem harmônica;

$h_{\max}$ é a ordem harmônica máxima;

$h_{\min}$ é a ordem harmônica mínima;

V_1 é a tensão fundamental medida.

2.7. Filtros de harmônicas

De acordo com Oliveira (2015), “Dentre as formas mais comuns adotadas para eliminação ou diminuição das correntes harmônicas está a aplicação de filtros ativos, passivos e híbridos.”

Um filtro passivo é constituído por resistores, capacitores e/ou indutores. Não contendo componentes ativos como chaves semicondutoras, podendo ser usados em cargas individuais ou centralizadas. O uso centralizado permite a junção de filtros passivos com capacitores, proporcionando a correção do fator de potência do sistema. Entretanto o

dimensionamento deve ser feito após um estudo apurado da instalação, pois filtros passivos só mitigam frequências harmônicas para qual foram projetados (POMÍLIO e DECKMANN, 2009).

A Figura 3 mostra os elementos que compõem um filtro passivo, podendo ser uma combinação entre capacitor e indutor, resistor e capacitor ou os três elementos (resistor, indutor e capacitor) juntos em um só filtro.

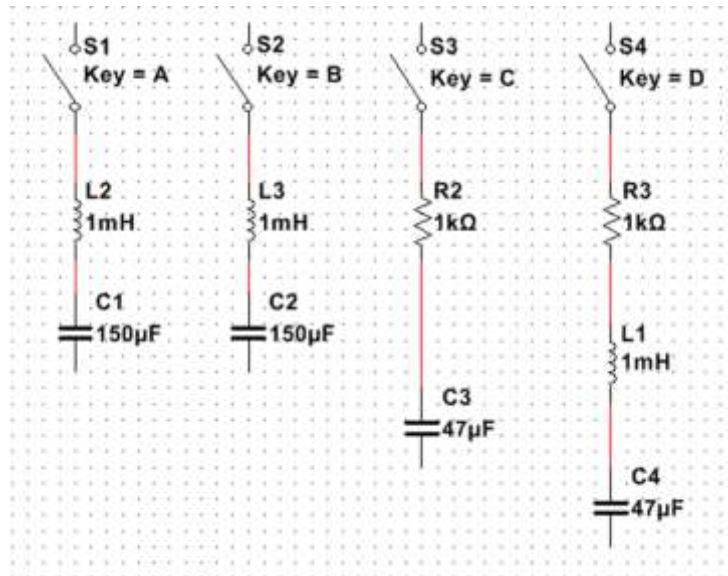


Figura 3. Estrutura básica de um filtro passivo.

Os filtros ativos também são conhecidos como Condicionadores Ativos de Harmônicos (AHC – Active Harmonic Conditioners). Trata-se de um dispositivo que gera harmônicas pleiteadas por cargas não-lineares, além de transferir potência reativa de distorção, assim sendo, não necessita de energia ativa e faz com que a fonte de alimentação do sistema forneça apenas a corrente fundamental, livre de componentes harmônicos (KARVE, 2002) Esses filtros fazem uso de semicondutores IGBTs (Transistor Bipolar de Porta Isolada) no circuito de potência e microprocessadores DSP no circuito de controle, o que torna o filtro ativo muito eficiente, pois pode se adaptar a diferentes tipos de harmônicos que possa surgir no sistema e, se configurado, repara o reativo de deslocamento. Diante de toda versatilidade e eficiência proporcionada, torna-se uma excelente solução técnica, porém de elevado custo.

A Figura 4 mostra o princípio de um filtro ativo em derivação.

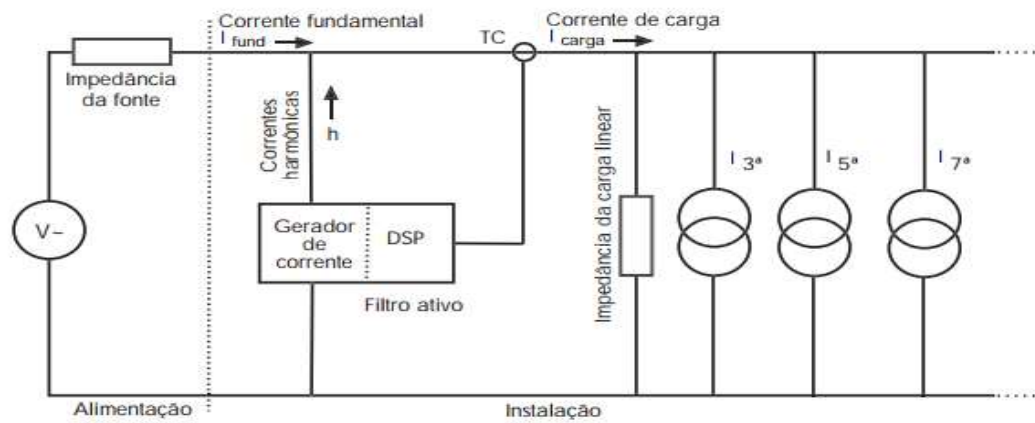


Figura 4. Filtro ativo e harmônicas em derivação.
Fonte: Karve (2002).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, apresenta-se os materiais que foram utilizados e os procedimentos realizados no desenvolvimento da pesquisa.

As distorções harmônicas nos transformadores foram simuladas através do software Multisim (National Instruments™) instalado em um notebook Lenovo CORE i5, com 4 GB de memória RAM. Os cálculos foram realizados através do software Excel 2013 (Microsoft Corporation) instalado no computador supracitado.

Para a modelagem do transformador no software foi utilizada a resistência de enrolamento de um transformador trifásico com potência de 75k kVA da marca Romagnole. Os equipamentos utilizados para a realização do ensaio constam no ANEXO C.

3.1. O software Multisim

De acordo com o site da National Instruments, o Multisim é um ambiente de simulação utilizado tanto pela indústria, oferecendo ferramentas de simulação SPICE (Programa de Simulação com Ênfase em Circuitos Integrados), quanto para projeto de circuitos para ensino e pesquisa nas áreas de eletrônica digital, analógica e de potência (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

A Figura 5 mostra o exemplo de medições de tensão no primário e no secundário de um transformador monofásico realizada no Multisim.

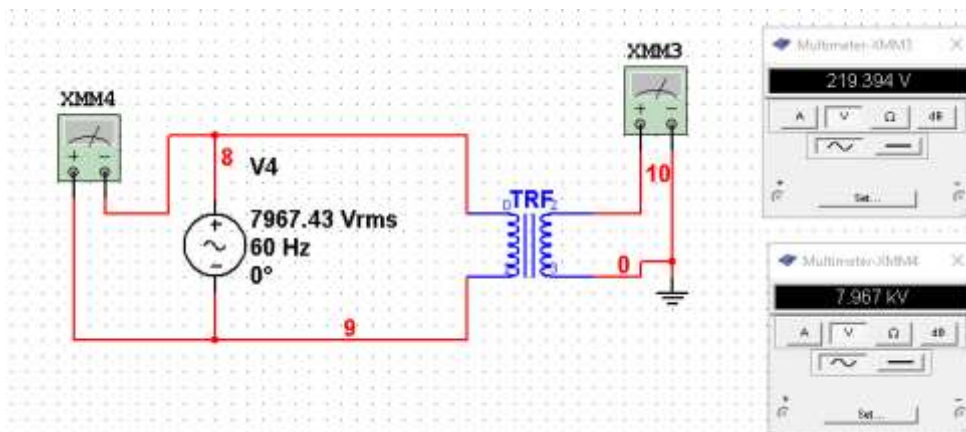


Figura 5. Exemplo de medição das tensões de entrada e saída de um transformador.

3.2. Levantamento dos dados para cálculo do K-factor

Conforme apresentado no item 2.5.1, para calcular o K-factor é preciso conhecer o espectro harmônico da carga e determinar o limite de harmônicas a serem consideradas.

Foi considerado um transformador de 75kVA, cujos dados da impedância nos enrolamentos foram obtidos através de um ensaio em um transformador da marca Romagnole realizado no Laboratório de Metrologia em Equipamentos (LABMETRO) da Universidade

Federal de Goiás (UFG). Com esses dados foi possível modelar o transformador no Multisim, a fim de se obter uma simulação mais próxima da realidade.

Apenas as impedâncias dos enrolamentos foram utilizadas na modelagem pois as impedâncias do núcleo não são obtidas no ensaio. As perdas no núcleo foram desprezadas pois segundo Delaere e Desmet (2005), as perdas no núcleo ocorrem devido a corrente de magnetização, que não incluem harmônicas, e são muito pequenas quando comparadas às correntes de carga.

A Figura 6 apresenta as configurações para a realização do ensaio a vazio no transformador, onde ele é alimentado no primário e o secundário é curto-circuitado.



Figura 6. Ligações para ensaio de curto-circuito no transformador.

As medições obtidas são enviadas para um computador na bancada onde o operador controla os parâmetros pertinentes a cada ensaio. A Figura 7 apresenta a imagem da tela do computador da bancada no ensaio em curto.



Figura 7. Dados gerados no ensaio em curto-circuito.

O Relatório de Ensaio, a Relação de Instrumentos e os Dados Complementares estão apresentados no Anexos A, B, C e D respectivamente.

Esse transformador está conectado a um retificador trifásico que por sua vez alimenta uma carga indutiva.

Dentre as opções de dispositivos oferecidos pelo Multisim, não há um transformador trifásico. Portanto, foram utilizados três transformadores monofásicos ligados de maneira a formar um transformador trifásico com o primário ligado em delta e o secundário ligado em estrela.

A Figura 8 mostra a configuração do transformador e da carga que foi utilizada nas simulações.

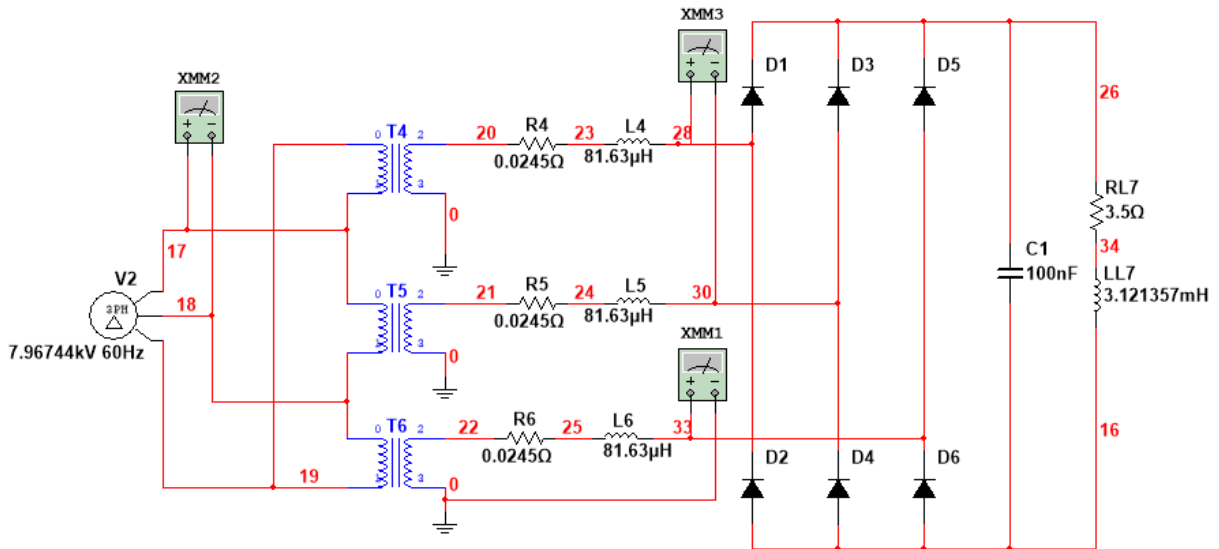


Figura 8. Transformador trifásico na configuração delta – estrela alimentando a carga não-linear.

As tensões medidas pelos voltmímetros XMM1, XMM2 e XMM3 são mostradas na Figura 9.

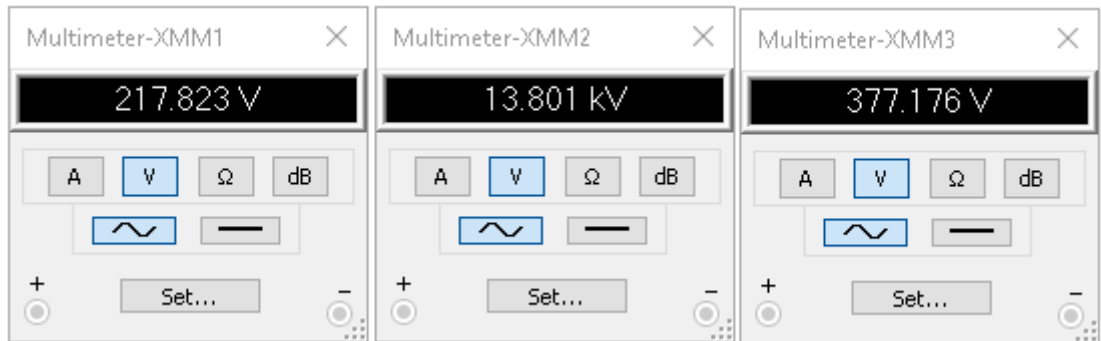


Figura 9. Medição das tensões de linha e de fase no primário e no secundário do transformador.

Após as simulações será calculado o K-factor, também foi determinado o Fator-K e assim será determinada a máxima potência que esse transformador poderá fornecer para trabalhar com uma carga não-linear com as características da carga modelada na simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após as simulações no Multisim foram obtidos a forma de onda na carga, utilizando-se o alicate amperímetro acoplado ao osciloscópio; através da função análise de Fourier obteve-se o espectro harmônico da carga, sendo que a leitura foi realizada no lado de baixa tensão do transformador; também foi obtido a distorção harmônica total (THD) da carga.

4.1. Forma de onda da corrente

Através do osciloscópio pôde-se verificar que o sinal da corrente analisada no lado de baixa tensão do transformador imediatamente antes do retificador, apresentou uma distorção bastante significativa se comparada a um sinal senoidal sem a presença de harmônicas.

Para medir a corrente foi utilizado um alicate amperímetro ligado ao osciloscópio e ajustado na escala de 1 mV/mA. A leitura da corrente no osciloscópio é mostrada Figura 10.

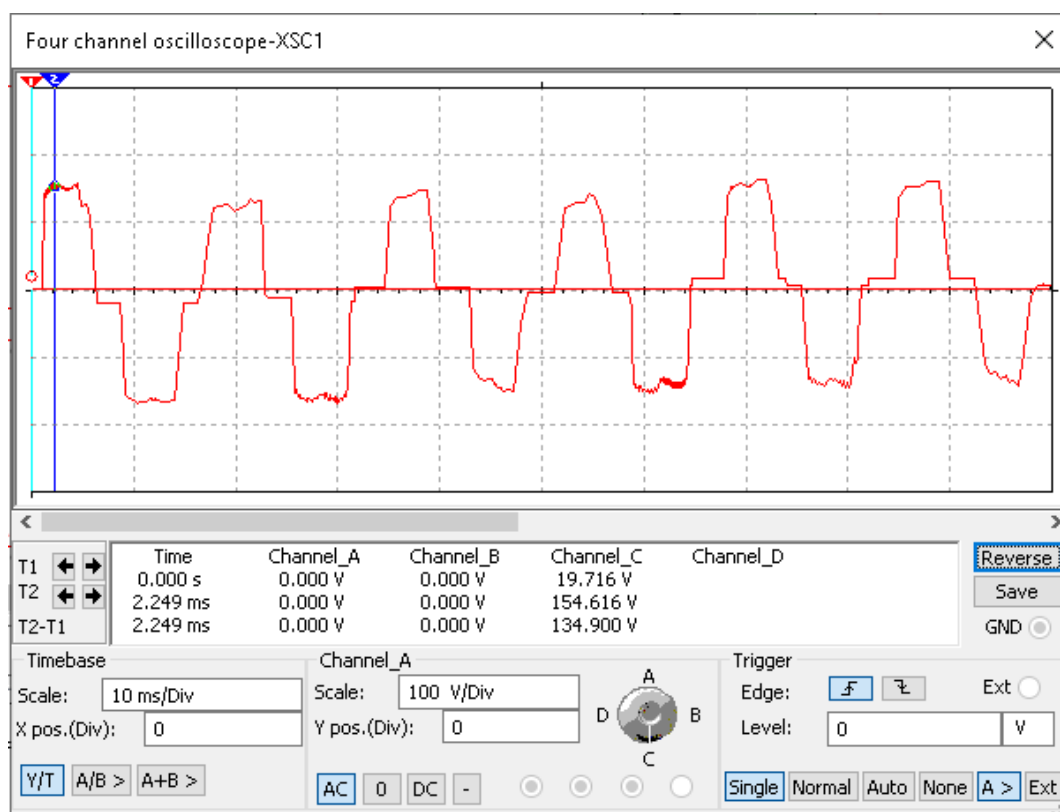


Figura 10. Forma de onda da corrente no lado da baixa tensão do transformador após a simulação.

4.2. Espectro harmônico e magnitude das correntes harmônicas geradas pela carga

Através da ferramenta Análise de Fourier, foi obtido o valor da corrente fundamental e a magnitude de cada corrente harmônica, o número de harmônicas e a distorção harmônica

total (TDH). Como trata-se de um retificador trifásico, não há desbalanceamento de fase, portanto, a análise foi realizada em apenas uma das fases do transformador.

A Tabela 1 apresenta os valores dessas correntes medidos na fase A da baixa tensão do transformador.

Tabela 1. Análise de Fourier apresentando a magnitude das correntes harmônicas, o número de harmônicas e a distorção harmônica total (TDH).

Análise de Fourier - Correntes na Fase A		
Número de Harmônicas: 21		
THD: 26,7122%		
Harmônica	Frequência (Hz)	Magnitude da Corrente(A)
0	0	0,000216547
1	60	158,107
2	120	0,00191444
3	180	0,00077663
4	240	0,0018315
5	300	32,7348
6	360	0,000199341
7	420	19,5423
8	480	0,00177594
9	540	0,00149267
10	600	0,00168992
11	660	12,6009
12	720	0,000159082
13	780	9,70918
14	840	0,00151945
15	900	0,00214469
16	960	0,00129535
17	1020	6,80029
18	1080	0,000610932
19	1140	5,56121
20	1200	0,00160917
21	1260	0,00202501

A partir da Tabela 1, foi elaborado um gráfico apresentando o espectro harmônico da carga. Esse espectro também é gerado pelo Multisim por meio da análise de Fourier, porém, para melhor visualização o espectro foi elaborado utilizando o software Excel.

A Figura 11 apresenta o espectro harmônico da carga mostrando a amplitude de corrente em cada uma das frequências.

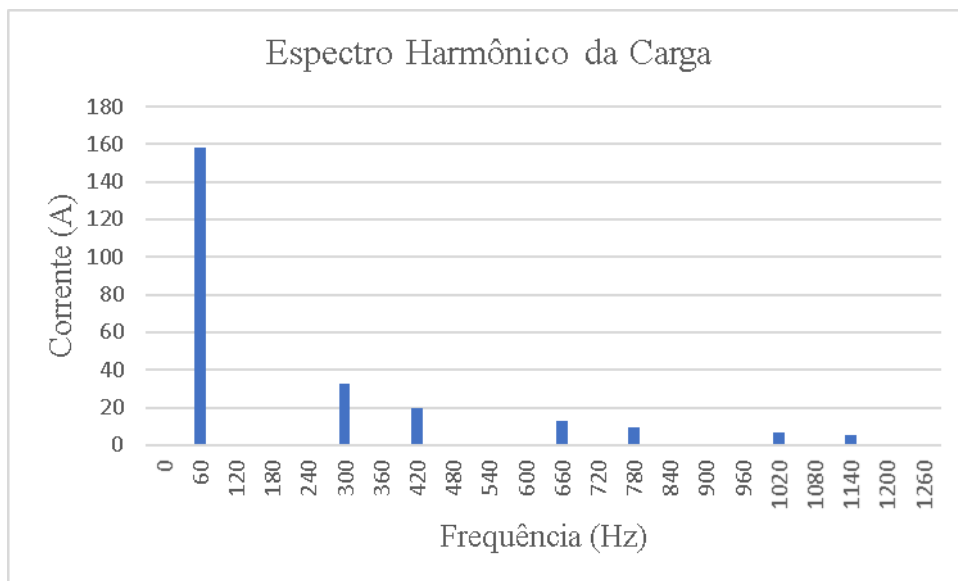


Figura 11. Espectro harmônico da carga.

4.3. Cálculo e aplicação do K-factor

Após a análise dos dados obtidos por meio do analisador do Multisim, o cálculo do K-factor foi realizado. O K-factor é uma referência da intensidade das harmônicas que a carga pode gerar e esses valores são normalizados.

A Tabela 2 apresenta os valores padrão do K-factor, sendo esta válida para transformadores com potência de até 3150 kVA (ABB, 2007). A tabela apresenta uma equivalência entre o K-factor (que é um fator que deve ser considerado na fase de projeto para se especificar um transformador que suporte trabalhar com cargas não-lineares sem aumento de perdas) e o Fator K, que é um fator pela qual a potência nominal do transformador deve ser dividida, para determinar qual a potência máxima que ele poderá trabalhar com cargas não-lineares sem aumento das perdas.

Tabela 2. Equivalência entre K-factor e Fator-K.

Equivalência entre o K-factor e o fator de sobreclassificação, Fator K.													
TDH	0,136	0,194	0,241	0,281	0,35	0,413	0,443	0,472	0,501	0,529	0,585	0,641	0,727
K - Factor U	2	3	4	5	7	9	10	11	12	13	15	17	20
Fator K	1,02	1,04	1,06	1,08	1,12	1,15	1,17	1,19	1,2	1,22	1,25	1,28	1,33

Fonte: ABB (2010). Adaptado.

O K-factor foi calculado de acordo com a equação (2.7) e foi obtido o valor foi de 5,23, assim, deve-se escolher um K com o valor imediatamente superior ao calculado. Por meio da Tabela 2, foi definido que o K-factor será igual a 7. Esse valor encontra-se dentro do limite esperado, uma vez que a Tabela 1 mostra que a THD é de 26,71%.

A Tabela 3 apresenta o cálculo do K-factor, de acordo com a equação (2.7).

Tabela 3. Cálculo do K-factor.

Harmônica	Magnitude da Corrente (A)	I_h/I_1	$(I_h/I_1)^2$	h^2	$(I_h/I_h)^2 \times h^2$
1	158,117	1,000000	1,00000000	1	1,0000000
3	0,01193	0,000075	0,00000001	9	0,0000001
5	32,7698	0,207250	0,04295270	25	1,0738175
7	19,5549	0,123674	0,01529516	49	0,7494629
9	0,0193	0,000122	0,00000001	81	0,0000012
11	12,6430	0,079960	0,00639357	121	0,7736215
13	9,7428	0,061618	0,00379674	169	0,6416484
15	0,0300	0,000190	0,00000004	225	0,0000081
17	6,8330	0,043215	0,00186754	289	0,5397202
19	5,6189	0,035536	0,00126284	361	0,4558839
21	0,0477	0,000301	0,00000009	441	0,0000401
K-FACTOR					5,23

Com a definição do K-factor, pode-se calcular qual a potência máxima que um transformador não projetado para alimentar cargas não lineares pode trabalhar. Esse cálculo é feito utilizando o Fator K, disponível na Tabela 2.

Analisando a Tabela 2 observa-se que para um K-factor igual a 7, o valor do fator de sobreclassificação (Fator-K) é igual a 1,12. Com esse valor foi calculada a potência máxima que o transformador modelado na simulação poderia oferecer.

A potência corrigida é calculada conforme a equação (4.1)

$$P_{CR} = P_n / \text{Fator-K} \quad (4.1).$$

Onde

P_{CR} é a potência corrigida;

P_n é a potência nominal do transformador, que é de 75 kVA;

Fator-K é de 1,12.

Portanto a potência corrigida será de 66,97 kVA.

Pode-se ainda afirmar que um transformador com potência nominal de 75 kVA e com *K-factor* igual a 7 corresponde a um transformador comum com potência igual a 84 kVA, ou seja, suportaria uma carga 1,12 vezes maior que um transformador comum.

Com o cálculo é possível observar que esse transformador, que não foi projetado para operar sob cargas não-lineares, deve sofrer uma redução de aproximadamente 11% da sua potência nominal para operar sem os impactos que as correntes harmônicas causam.

4.4. Considerações do fabricante

Segundo a empresa fabricante de transformadores Romagnole (2019), a importância do impacto das correntes harmônicas muitas vezes não são consideradas no momento da especificação do transformador, seja por falta de conhecimento ou até mesmo de forma intencional. O *K-factor* deixou de ser algo restrito às indústrias e deve ser considerado em projetos residenciais e comerciais devido ao fato da implementação de circuitos eletrônicos na maioria dos equipamentos.

O fabricante ressalta a importância de se considerar a incidência de harmônicas no momento da elaboração do projeto elétrico e prever o *K-factor* pertinente ao transformador que irá suprir o sistema. Esse cuidado evita que o transformador tenha sua capacidade de operação reduzida.

Ainda de acordo com a Romagnole (2019), os transformadores a seco são mais suscetíveis aos impactos causados pelas correntes harmônicas, uma vez que apresentam maior dificuldade para dissipar o calor gerado por essas correntes. Soma-se a isso, o fato de esses transformadores operarem em locais onde há grande possibilidade de alimentarem cargas não-lineares como shoppings, hospitais, edifícios comerciais, dentre outros.

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusões e limitações do estudo

O trabalho mostrou que o aumento dos dispositivos que implementam sistemas eletrônicos na sua alimentação vem crescendo nas últimas décadas e hoje está presente não só nas indústrias como também em instalações comerciais e residenciais. Esses elementos causam distorções na forma de onda afetando o sinal tanto da tensão como da corrente, e são denominadas cargas não-lineares.

As correntes harmônicas podem elevar as perdas nos transformadores de potência, gerando um aumento em sua temperatura durante a operação, danificando sua isolamento e reduzindo vida útil da máquina. Os transformadores a seco são mais afetados pois tem mais dificuldade em dissipar o calor gerado durante seu funcionamento.

É necessário conhecer as características da carga para que sejam tomadas medidas para mitigar o efeito das distorções harmônicas no transformador. Conhecendo-se o comportamento da carga deve ser escolhido o método apropriado para diminuir os impactos no transformador. Essas medidas podem ser a implementação de filtros ativos ou passivos, e fatores de correção como o *K-factor* e o Fator – K.

O primeiro fator é o mais indicado pois é determinado analisando-se as características da carga já na fase do projeto elétrico para que seja selecionado um transformador fabricado para suportar as perdas causadas pelas correntes harmônicas e é recomendado por fabricantes como Romagnole e Tamura.

Já o Fator-K é um fator de correção aplicado a transformadores que não foram fabricados para tralhar sob cargas não-lineares que consiste em reduzir a potência máxima que ele pode oferecer a fim de reduzir os danos causados pelas correntes harmônicas.

No transformador analisado através da simulação, a aplicação do Fator-K indicou que o transformador deveria sofrer uma redução de aproximadamente 11%, e essa é uma medida difícil de se implementar pois em qualquer instalação elétrica a tendência é que a carga cresça ao longo do tempo. Portanto, é necessário escolher um transformador que atenda a carga sem prejuízo à potência nominal que ele pode oferecer e isso é alcançado através do estudo das características da instalação na fase de projeto, para que se possa especificar um transformador com *K-factor* adequado, fazendo com que ele trabalhe no ambiente de carga não-linear sem prejuízos à sua vida útil.

A limitação apresentada nesse estudo foi o fato de não ser possível analisar a temperatura do transformador durante seu funcionamento, uma vez que o Multisim não apresenta tal ferramenta de análise.

Entende-se que o trabalho contribui de forma a alertar para as consequências que as distorções harmônicas podem causar em um elemento de suma importância no sistema elétrico como é o caso dos transformadores de potência, bem como apresentou soluções relativamente simples para esse problema.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Uma análise mais precisa poderia ser feita em uma instalação real utilizando-se analisadores de energia, fazendo a medição da temperatura do transformador e comparando com a temperatura nominal e operação.

Outro estudo relevante seria sobre a viabilidade econômica entre a implementação de filtros para atenuar as distorções harmônicas e a compra do transformador com um *K-factor* adequado.

REFERÊNCIAS

- ABB. **Loading transformers with non sinusoidal current - K factor**, 2007. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/be0cadaf6a6708fcc1257792005162cb/Loading_transformers_with_non_sinusoidal_currents_KFactor.pdf>. Acesso em: 15 nov 2019.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**, 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>. Acesso em: 19 mai 2019.
- CAMARGO, I. **Transformadores Trifásicos**, 2007. Disponível em: <<http://www.gsep.ene.unb.br/osem/ivan/maquina/TRANSFORMADORES%20TRIF%C1SICOS.pdf>>. Acesso em: 18 Março 2019.
- DELAERE, G.; DESMET, J. Harmônicas - Seleção dimensionamento de transformadores. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, nov 2005. Disponível em: <<https://www.procobre.org/pt/publicacion/guia-3-5-2-selecao-e-dimensionamento-de-transformadores-com-harmonicas/>>. Acesso em: 16 Março 2019.
- GALHARDO, M. A.; PINHO, J. T. **Conceitos de Distorção e Não-Linearidade**, 2003. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081212104950-aju_01_163-0k.pdf>. Acesso em: 16 Março 2019.
- GOMES, F. V. **Visão Geral do Sistema Elétrico de Potência**, 2012. Disponível em: <http://www.ufjf.br/flavio_gomes/files/2011/01/Aula-02_ENE005.pdf>. Acesso em: 18 Março 2019.
- HLATSHWAYO, M. C. **The Computation of Winding Eddy Losses in Power**, 2013. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/5ece/4ac049aa61046b31f8d01a639dde8195ed32.pdf>>. Acesso em: 2 set 2019.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2015.
- KARVE, S. Filtros ativos de harmônicos. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, jul 2002. Disponível em: <<https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/qe12-guia-3-3-3-filtros-ativos-harmnicas.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2019.
- LIMA, C. H. **Controle de harmônicos e potência reativa em cargas desbalanceadas utilizando um filtro híbrido trifásico duas baseado no inversor nove chaves**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2017.
- LISITA, L. R. et al. Perda Adicional no Núcleo em Transformadores Trifásicos Alimentando Cargas Não-Lineares. **IEEE Latino Americana**, Dezembro 2003.
- MORENO, H. Harmônicas nas instalações elétricas - Causa, efeitos e soluções. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, nov 2001. Disponível em:

<<https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/qe01-manual-harmonicas.pdf>>. Acesso em: 20 Abril 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS, 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/shop/select/multisim>>. Acesso em: 19 mai 2019.

OLIVEIRA, W. J. **Projeto de filtros passivos para redução de correntes harmônicas na subestação de 2x300 kVA da estação elevatória de água do Jequi**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2015.

POMÍLIO, J.; DECKMANN, S. **Condicionamento de energia e dispositivos FACTS**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2009.

ROMAGNOLE. **A importância do Fator K no dimensionamento de transformadores**, 2019. Disponível em: <<https://www.romagnole.com.br/noticias/artigos/importancia-do-fator-k-no-dimensionamento-dos-transformadores>>. Acesso em: 09 nov. 2019.

SANTOS, C. R. **Efeitos de cargas não-lineares no dimensionamento de transformadores de distribuição**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2012.

SCHNEIDER ELETRIC. **Eliminação de harmônicas em instalações**, 2015. Disponível em: <https://www.apc.com/salestools/LARD-8K6K8S/LARD-8K6K8S_R2_PT.pdf>. Acesso em: 18 maio 2019.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétrica de Fitzgerald e Kingley**. 7ª. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2014.

ANEXO A. Relatório de ensaio do transformador.

LABMETRO - Laboratório de Metrologia em Equipamentos de Conversão de Energia Elétrica
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
Escola de Engenharia Elétrica e de Computação
FUNAPE - Fundação de Apoio à Pesquisa

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE ROTINA

Nº 0

DADOS TÉCNICOS DO TRANSFORMADOR							
CLIENTE	ENSAIO TESTE	POTÊNCIA (kVA)	75				
FABRICANTE	ROMAGNOLE	Nº DE FASES	3				
Nº DE SÉRIE	868955-21-10-2019	TIPO DE LIGAÇÃO	Triângulo / Estrela (Dyn1)				
VAT(V)	13800	FREQÜÊNCIA (Hz)	60				
VBT(V)	380	ENROLAMENTO	Alumínio				
IAT(A)	3,14	MÉTODO DE RESFRIAMENTO	ONAN				
IBT(A)	113,95	TEMP. DE REFERÊNCIA (°C)	75				
Z(%)	3,50	NORMA DE REFERÊNCIA	NTC-10 Rev. 7 EFIC. E				
ENSAIO DE RELAÇÃO DE TENSÕES							
TAP (V)	13800	13200	12600	12000	0	0	0
FASE A	62,969	60,228	57,484	54,751	0,000	0,000	0,000
FASE B	62,969	60,010	57,251	54,750	0,000	0,000	0,000
FASE C	62,990	60,259	57,500	54,765	0,000	0,000	0,000
RESISTÊNCIA DE ISOLAMENTO (M ohms). Tensão 5 kV				ENSAIO DE TENSÃO APLICADA			
AT-BT 5000	AT-MASSA 5000	BT-MASSA 5000	VAT 34 kV 60 s VBT 10 kV 60 s				
ENSAIO DE PERDAS A VAZIO							
TENSÃO DE ENSAIO (V)	380,00	CORRENTE DE EXCITAÇÃO (%)	0,82				
CORRENTE DE EXCITAÇÃO (A)	0,94	PERDAS A VAZIO (W)	281,69				
ENSAIO DE TENSÃO INDUZIDA							
TENSÃO APLICADA (V)	760	FREQÜÊNCIA (Hz)	180	DURAÇÃO (s)	40		
ENSAIO DE PERDAS EM CARGA E IMPEDÂNCIA DE CURTO-CIRCUITO							
CORRENTE DE ENSAIO (A)	3,14	PERDAS ÔHMICAS À 75 °C (W)	1055,55				
TENSÃO DE C-C (V)	489,71	PERDAS ADICIONAIS À 75 °C (W)	43,14				
PERDAS EM C-C (W)	958,14	PERDAS EM C-C À 75 °C (W)	1098,69				
TEMPERATURA DE ENSAIO (C)	33,1	IMPED. DE C-C À 75 °C (%)	3,62				
AVALIAÇÃO FINAL DAS PERDAS							
PERDAS A VAZIO (W)	281,69	IMPEDÂNCIA DE C-C (%)	3,62				
CORRENTE DE EXCITAÇÃO (%)	0,82	PERDAS TOTAIS (W)	1380,38				
RESULTADO: APROVADO		CT:	SEM CT		Projeto:		
OBSERVAÇÕES:							

Carlos Alberto Roldão
Téc. Lab. CREA: 2902/TD-GO
Goiânia, 31/10/2019 14:24 hs

ANEXO B. Dados complementares do relatório de ensaio do transformador.

CLIENTE ENSAIO TESTE
FABRICANTE ROMAGNOLE
N. DE SÉRIE 868955-21-10-2019

POTÊNCIA 75000
N. DE FASES 3

DADOS COMPLEMENTARES	
Resistência à temperatura de ensaio (%)	Imped. de curto-circuito à temp. de ensaio (Ohm)
1,28	156,07
Resistência à temperatura de referência (%)	Imped. de curto-circuito à temp. de ensaio (%)
1,46	3,55
Perdas ôhmicas BT à temperatura de ensaio (W)	Impedância de curto-circuito à temp. de referência (Ohm)
452,64	165,35
Perdas ôhmicas AT à temperatura de ensaio (W)	Impedância de curto-circuito à temp. de referência (%)
455,35	3,62
Perdas ôhmicas à temperatura de referência (W)	Componente resistiva da Imped. à temp. de ensaio (Ohm)
1055,55	97,32
Perdas adicionais à temperatura de ensaio (W)	Componente resistiva da Imped. à temp. de referência (Ohm)
50,15	111,59
Perdas adicionais à temperatura de referência (W)	Reatância XL (Ohm)
43,14	122,01
Perdas em curto-circuito à temp. de referência (W)	Reatância XL (%)
1098,69	3,31

ANEXO C. Relação dos instrumentos utilizados no ensaio do transformador.

RELAÇÃO DE INSTRUMENTOS			PQ.01-REV. 1	
CERT. CALIB.	DESCRIPTIVO DO SISTEMA	Nº IDENT	CALIB.	EXPIRA
CCR33618	Wattímetro Digital, fabricante Yokogawa, modelo WT 230, n.s. 91JB32540.	91JB32540	04/05/2018	04/05/2020
CCR33718	Multímetro Digital, fabricante TEKTRONIX, modelo DMM4020, n.s. 2076040, pat. 015132.	2076040	04/05/2018	04/05/2020
CCR33818	Multímetro Digital, fabricante TEKTRONIX, modelo DMM4020, n.s. 2076038, pat. 015133.	2076038	04/05/2018	04/05/2020
57913	Megôhmmetro analógico MEGABRAS, modelo MI - 5500e.	MG 6007 A	18/01/2019	18/01/2021
CCR35418	Transformador de Corrente, fabricante YOKOGAWA, modelo 2241, n.s. 15564, pat. 695510.	15564	11/05/2018	11/05/2023
CCR35518	Transformador de Corrente, fabricante YOKOGAWA, modelo 2241, n.s. 15565, pat. 695509.	15565	09/05/2018	09/05/2023
CCR35618	Transformador de Corrente, fabricante YOKOGAWA, modelo 2241, n.s. 15566, pat. 695508.	15566	11/05/2018	11/05/2023
81593	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO, marca: GE; tipo: PTG3-1-60-242F.	52915980	03/05/2018	03/05/2023
81594	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO, marca: GE; tipo: PTG3-1-60-242F.	52915979	03/05/2018	03/05/2023
81595	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO, marca: GE; tipo: PTG3-1-60-242F.	52915978	03/05/2018	03/05/2023
81596	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO, marca: GE; tipo: PTG3-2-60-482SS	52915976	03/05/2018	03/05/2023
81597	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO, marca: GE; tipo: PTG3-2-60-482SS	52915975	03/05/2018	03/05/2023
81598	TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO, marca: GE; tipo: PTG3-2-60-482SS	52915974	03/05/2018	03/05/2023
CE04-MT0318	Medidor de Relação de Transformadores TTR 130 ME MULT TEST	566	06/03/2018	06/03/2020

ANEXO D. Limites para aprovação do transformador após o ensaio.

LIMITES PARA APROVAÇÃO						
Corr. Exct. Máx (%)		Perdas vazio Máx (W)		limites Imp. C-C (%)		Perdas totais max (W)
3,24		324,50		3,238 / 3,762		1478,70
TAP 1	TAP 2	TAP 3	TAP 4	TAP 5	TAP 6	TAP 7
62,586 / 63,215	59,865 / 60,467	57,144 / 57,718	54,423 / 54,970	0,000 / 0,000	0,000 / 0,000	0,000 / 0, 000

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES NO DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

BARROS, Fernando Julio¹; SILVA, Paulo Vinícius Campos¹; NEVES, André Silveira²

¹Aluno do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário de Goiás – Uni-ANHANGUERA.

²Professor orientador Especialista do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário de Goiás – Uni-ANHANGUERA.

O uso de semicondutores na alimentação de equipamentos elétricos e eletrônicos traz grandes benefícios como menor custo, maior eficiência e mais conforto, porém também traz desvantagens pois, quando introduzido no sistema elétrico produz correntes distorcidas em relação a corrente senoidal. Por consequência, também é gerado uma deformação na tensão. As cargas que produzem esses efeitos são denominadas cargas não-lineares. O presente trabalho tem por finalidade apresentar os efeitos que essas cargas trazem aos transformadores de potência; como essas consequências podem afetar o seu dimensionamento e mostrar algumas medidas que podem ser adotadas para mitigar esses efeitos. Para realizar a análise foram feitas simulações utilizando o software Multisim, onde foi modelado um transformador trifásico com os parâmetros obtidos através de um ensaio no Laboratório de Metrologia em Equipamentos (LABMETRO) da Universidade Federal de Goiás e a carga não linear foi representada por um retificador trifásico alimentando uma carga indutiva. Através da análise de Fourier, o Multisim apresentou o espectro harmônico da carga, a magnitude de cada uma das correntes, bem como a distorção harmônica total (TDH) e esses dados foram utilizados para o cálculo e escolha do *K-factor* cujo valor obtido foi 5,23 e por equivalência obteve-se um Fator-K de 1,12. Portanto, um transformador alimentando uma carga dentro dos moldes da simulação realizada deverá ser dimensionado especificando-se um *K-factor* igual a 7, que é o valor normalizado imediatamente superior ao valor calculado, ou aplicar o Fator K, que mostra que se deve utilizar apenas 89% da potência nominal do transformador para que as consequências das distorções harmônicas não potencializem suas perdas, e assim diminuam sua vida útil.

PALAVRAS-CHAVE: *K-factor*. Fator-K. Harmônicas.